

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II



FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Dipartimento di Ingegneria dei Materiali e della Produzione

Dottorato di Ricerca in

Tecnologie e Sistemi di Produzione

Indirizzo Gestione dei processi e dei sistemi

**ANALISI DELLE CRITICITÀ NELLA PROGETTAZIONE
E GESTIONE DI UN SISTEMA RICONFIGURABILE DI
PRODUZIONE**

Coordinatore

Prof. Ing.
Giuseppe Giorleo

Candidato

Ing. Luigi Guerra

Tutor

Prof. Ing.
Vincenzo Zoppoli

XII° Ciclo di Dottorato

RINGRAZIAMENTI

Ho sempre ritenuto la stesura di questo lavoro il vero completamento di un percorso formativo intrapreso diversi anni fa. Ne esco indubbiamente arricchito, tanto dal lato culturale, quanto da quello umano e questo è frutto non tanto delle mie capacità, ma piuttosto delle persone con cui, a vario titolo, ho avuto l'opportunità di relazionarmi.

Desidero innanzitutto ringraziare la Prof.ssa Santillo, il Prof. Rizzo, il Prof. Zoppoli e il Prof. De Carlini per la possibilità concessami, per la fiducia riposta nel mio lavoro e per avermi guidato nell'approfondimento scientifico concedendomi, in ogni caso, ampia libertà d'operato.

Grazie ai miei colleghi, Teresa Murino, Guido Guizzi, Mosè Gallo, Elpidio Romano, Roberto Grisi, Giuseppe Naviglio, Pasquale Zoppoli, Rosanna Esposito, Luigi Monica, perché dalle lunghe chiacchierate, dalle riflessioni comuni, ho sempre tratto spunto per affrontare tante circostanze lavorative e della vita. Grazie, ancora, per le goliardie e per le occasioni di svago vissute insieme.

Grazie a Gabriele, Antonio, Paolo, Stefano D., Stefano C., Marco, Alessandro, perché, in ogni circostanza, li ho avuto sempre al mio fianco.

Ringrazio la mia famiglia, per il modo in cui ha sempre sostenuto le mie scelte, per la pazienza e la comprensione nei momenti difficili e per l'affetto con il quale arricchisce da sempre i giorni della mia vita.

E, infine, grazie ad Antonia, che con i suoi sorrisi e la sua dolcezza ha reso più leggero ogni momento speso su questo lavoro.

A mio padre e a mia madre

“Cento volte al giorno mi capita di pensare che la mia vita, quella interiore e quella pubblica, dipende dal lavoro di altre persone, vive e scomparse e mi dico che devo impegnarmi a restituire quanto ho ricevuto e ancora ricevo. Non sono un uomo dotato di particolari talenti, ma sono appassionatamente curioso”

Albert Einstein

PREFAZIONE

Il progressivo processo di globalizzazione, l'incendere turbolento dei mercati, il crescente grado di customizzazione, l'accresciuta competenza e coscienza ambientale degli utenti finali, rappresentano le principali sfide che un'azienda moderna deve essere in grado di raccogliere ed affrontare. L'applicazione dei risultati offerti dal progresso tecnologico, nonché lo sviluppo e l'impiego nei moderni sistemi produttivi di adeguati sistemi cognitivi, ben si prestano al soddisfacimento delle mutevoli esigenze del consumatore e al contemporaneo abbattimento dei costi sostenuti nel compimento delle attività produttive.

In tale conteso, diviene sempre più determinante per salvaguardare la propria posizione competitiva la capacità di distribuire e ridistribuire, in modo rapido ed efficiente, le risorse a disposizione. Si prefigura, in definitiva, la necessità di un adattamento dinamico della produzione industriale.

L'obiettivo del presente lavoro è quello di analizzare le problematiche che è necessario affrontare nella progettazione e gestione di un *Sistema di Produzione Riconfigurabile*, individuando i fattori strategici e operativi che possano renderlo una valida alternativa ai sistemi di produzione di tipo tradizionale.

Diversamente da quanto accade per un comune sistema di produzione flessibile, infatti, la struttura modulare di un RMS ne garantisce una più efficace regolabilità in termini di scalabilità fisica, consentendo l'abbattimento dei costi di mancato utilizzo che affliggono i primi. Tale risultato, tuttavia, non può prescindere dallo studio dell'evoluzione del sistema in funzione di quella del mercato, poiché questo è in grado di influenzare in modo determinante le scelte effettuate in merito alle risorse fisiche di cui dotarsi (macchine modulari e moduli produttivi aggiuntivi) e alle successive configurazioni che il sistema dovrà assumere. In questo caso, inoltre, a causa della marcata dinamicità del problema diventa ancor più critico il legame esistente fra politiche implementate per la scalabilità del sistema, parametri operativi di controllo, obiettivi e strategie di mercato adottate.

Nel primo capitolo sono stati presi in considerazione i fattori che hanno costituito terreno fertile per la germinazione di nuovi paradigmi produttivi quali: sistemi di produzione agili, sistemi di produzione flessibili, sistemi di produzione riconfigurabili.

Nel secondo capitolo, dopo aver individuato le principali proprietà di cui un sistema deve essere dotato per poter essere annoverato fra i sistemi di produzione riconfigurabili, verranno prese in considerazione alcune caratteristiche fisiche e logiche del sistema, al fine di rendere più evidenti le criticità che possono sorgere nella loro progettazione e gestione.

Nel terzo capitolo sono state illustrate le principali differenze esistenti fra i sistemi di produzione oggetto di studio e i sistemi di produzione di tipo tradizionale, fornendo degli strumenti utili per la valutazione della convenienza di un investimento in una forma produttiva piuttosto che in un'altra.

Nel quarto capitolo, dopo aver sottolineato il legame esistente fra performance offerte da un sistema riconfigurabile e corretta progettazione delle famiglie di prodotti, fra le tecniche tradizionalmente adoperate nell'ambito dei sistemi di produzione di tipo cellulare, sono state individuate quelle che meglio si prestano ad un'estensione dinamica del problema e che quindi potrebbero rivelarsi utili nel caso trattato. Inoltre, il parallelismo con le discipline evoluzionistiche ha consentito l'introduzione di un nuovo strumento di supporto per effettuare considerazioni riguardanti l'evoluzione futura delle famiglie inizialmente individuate.

Infine, nel quinto capitolo, è stato costruito un modello basato sull'applicazione dei principi della System Dynamics che consentisse una rappresentazione delle problematiche di scalabilità della capacità in un sistema produttivo riconfigurabile. La definizione di opportuni parametri di controllo e di performance, ha consentito di valutare la risposta di un sistema riconfigurabile al variare della politica di scalabilità adottata, allorché si verificassero specifici scenari di mercato. Un'accurata analisi di sensitività ha permesso di valutare la robustezza dei risultati ottenuti, di dettagliare specifici comportamenti del sistema e ha fornito spunti per l'individuazione di aree nelle quali ulteriori investimenti miranti al miglioramento della reattività o del tasso di utilizzazione del sistema divengono non convenienti.

INDICE

Capitolo I - FATTORI CHIAVE DEL CAMBIAMENTO	1
1.1 Adattamento dinamico della produzione industriale.....	2
1.1.1 <i>Aspetti economici ed influenza dei mercati. Globalizzazione e decentralizzazione della produzione</i>	4
1.1.2 <i>Fattori sociali e politici</i>	9
1.1.3 <i>Fattori ambientali</i>	11
1.2 Aziende in movimento	16
1.2.1 <i>Produzione Globale e Networked Manufacturing</i>	17
1.2.2 <i>Evoluzione tecnologica</i>	19
1.3 Bibliografia	22
Capitolo II - CARATTERISTICHE DI UN SISTEMA RICONFIGURABILE DI PRODUZIONE	24
2.1 Flessibilità e riconfigurabilità	25
2.2 Sistemi Riconfigurabili di Produzione	30
2.2.1 <i>Caratteristiche chiave di un RMS</i>	32
2.3 Fattori abilitanti	36
2.3.1 <i>Fattori fisici</i>	37
2.3.2 <i>Fattori logici</i>	47
2.4 Bibliografia	54
Capitolo III - SISTEMI DI PRODUZIONE TRADIZIONALI E RICONFIGURABILI ..	59
3.1 Paradigmi produttivi a confronto	60
3.2 Modelli per il confronto fra alternative di investimento	63
3.2.1 <i>Un approccio parametrico all'analisi dell'investimento</i>	64
3.2.1.a Modello per un DML	65
3.2.1.b Modello per un FMS	66
3.2.1.c Modello per un RMS.....	67
3.2.1.d Considerazioni aggiuntive sui parametri α^S e β^S	69
3.2.2 <i>Confronto tramite Analisi di Riconfigurabilità e calcolo del Costo del Ciclo di Vita</i>	70

3.2.2.a	Cambio del mix di produzione	74
3.2.2.b	Cambio nel tempo di produzione disponibile	75
3.2.2.c	Riconfigurazioni.....	77
3.2.2.d	Analisi dei costi sostenuti nel ciclo di vita del sistema.....	78
3.2.3	<i>Valutazione dell'investimento tramite Real Options</i>	80
3.3	Bibliografia	85
Capitolo IV - GENERAZIONE ED EVOLUZIONE DELLE FAMIGLIE DI PARTI.....		87
4.1	Mercati e Produzione: il legame offerto dalla riconfigurabilità dei processi produttivi.....	88
4.2	Progettazione strategica di un RMS: il ruolo delle famiglie di prodotti	90
4.3	Formazione delle famiglie di prodotti: dalla Group Technology ai RMS	97
4.4	Tecniche di raggruppamento	99
4.4.1	<i>Tecniche descrittive</i>	102
4.4.2	<i>Programmazione Matematica</i>	104
4.4.3	<i>Analisi dei Cluster</i>	106
4.4.4	<i>Tecniche basate su Intelligenza Artificiale</i>	109
4.4.5	<i>Grafici Partizionati</i>	116
4.5	Tecniche di raggruppamento, estensione ai RMS.....	118
4.5.1	<i>Un Algoritmo di clustering gerarchico per la formazione di famiglie di parti/prodotti destinato a RMS</i>	118
4.5.1.a	Matrice di modularità.....	118
4.5.1.b	Matrice di comunanza	119
4.5.1.c	Matrice di compatibilità	120
4.5.1.d	Matrice di riusabilità	121
4.5.1.e	Matrice della domanda.....	121
4.5.1.f	Relazioni fra le matrici.....	122
4.5.1.g	Formazione delle famiglie.....	124
4.5.1.h	Selezione della famiglia	125
4.5.2	<i>Uno strumento di indagine basato su teorie evoluzionistiche</i>	130
4.5.2.a	Gestire l'evoluzione tramite l'approccio cladistico	133
4.5.2.b	Estensione ai sistemi produttivi dinamici: criticità ed opportunità.....	138
4.5.2.c	Analisi di un caso applicativo	140

4.6	Conclusioni	151
4.7	Bibliografia	152
Capitolo V - LA GESTIONE DELLA CAPACITÀ DI UN RMS		158
5.1.	Scalabilità della capacità di un sistema produttivo: analisi dello stato dell'arte.....	159
5.2.	Scalabilità della capacità: formulazione analitica per un RMS	164
5.3.	Struttura dei modelli di System Dynamics.....	169
5.4.	Modello logico, analitico e ipotesi di base.....	173
5.1.1	<i>Modello logico</i>	176
5.1.2	<i>Modello analitico</i>	180
5.1.2.a	Pianificazione e controllo della capacità del sistema	183
5.1.2.b	Controllo del livello inventariale	184
5.1.2.c	Controllo del livello del work-in-process	185
5.1.2.d	Domanda del mercato	185
5.1.2.e	Soddisfacimento della domanda del mercato.....	188
5.2	Creazione del modello.....	190
5.2.1	<i>Inizializzazione del modello</i>	196
5.3	Analisi del modello	200
5.3.1	<i>Analisi dei risultati – Scenario I</i>	202
5.3.1.a	Analisi di sensitività per la Politica 2.....	211
5.3.1.b	Analisi di sensitività per variazioni dei parametri U e SDT	216
5.3.2	<i>Analisi dei risultati – Scenario II</i>	225
5.3.2.a	Alcune considerazioni aggiuntive in merito all'andamento della variabile OB(t).....	234
5.3.2.b	Analisi di sensitività per variazioni dei parametri U e SDT	238
5.3.3	<i>Analisi dei risultati – Scenario III</i>	259
5.4	Conclusioni	268
5.5	Bibliografia	269
CONCLUSIONI.....		273

Capitolo I

FATTORI CHIAVE DEL CAMBIAMENTO

Per quanto spesso possa essere concepito come sinonimo di stravolgimento di pratiche consolidate, dietro le quali si celano le certezze di chi, in un modo o in un altro, partecipa alla vita aziendale, il cambiamento rappresenta in realtà la concretizzazione del progresso sociale, culturale e tecnologico dell'uomo, rivelandosi una delle principali leve competitive su cui puntare per il conseguimento dei propri obiettivi di mercato. Non a caso, il progressivo processo di globalizzazione, l'incedere turbolento dei mercati, il crescente grado di customizzazione, l'accresciuta competenza e coscienza ambientale dell'utente finale, rappresentano e continueranno a rappresentare sfide da affrontare con estrema razionalità. Una delle possibili chiavi di lettura del problema è quello di favorire il rapido adattamento dell'offerta alla domanda, ricorrendo a più efficienti tecnologie di processo e progettazione del prodotto, minimizzando nel contempo i costi diretti ed indiretti che l'azienda dovrà sostenere. Diviene, quindi, determinante per salvaguardare la propria posizione competitiva, la capacità di distribuire e ridistribuire, in modo rapido ed efficiente, le risorse a disposizione in presenza di mutamenti o sollecitazioni esterne. Si prefigura, in definitiva, la necessità di un adattamento dinamico della produzione industriale.

In questo capitolo verranno presi in considerazione i fattori che hanno costituito terreno fertile per la germinazione di nuovi paradigmi produttivi, quali: sistemi di produzione agili, sistemi di produzione flessibili, sistemi di produzione riconfigurabili. I sistemi citati, sebbene abbiano come denominatore comune l'adattamento alle esigenze del mercato, puntano all'efficienza e alla profittabilità sfruttando principi e tecnologie alternative.

1.1 Adattamento dinamico della produzione industriale

Molteplici, e di natura profondamente differente, sono stati gli avvenimenti che negli ultimi decenni hanno modificato in modo radicale l'assetto sociale ed economico globale, generando effetti immediatamente evidenti o mettendo in moto meccanismi di cui oggi è possibile cogliere solo l'incipit. Lo sconvolgimento dei preesistenti equilibri fra economia, ambiente e società ha esercitato, in particolare, una crescente pressione sul tessuto produttivo internazionale, trasformandone in modo profondo le caratteristiche e, di conseguenza, influenzando le strategie, le modalità operative e le tecnologie adoperate dalle aziende manifatturiere (Figura 1.1).

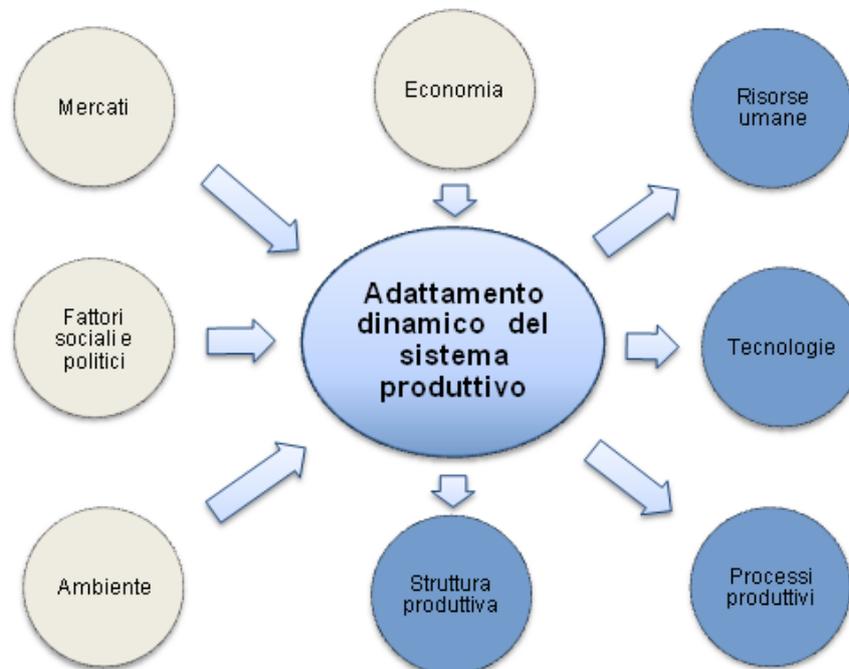


Figura 1.1 – Fattori del cambiamento e adattamento dinamico della produzione industriale¹

D'altra parte, l'evidenza del progressivo passaggio dall'*era della produzione di massa*, all'*era della produzione di nicchia*, risiede (Chryssolouris, 2005):

- nel graduale incremento della frequenza di introduzione di nuovi prodotti sui mercati;

¹ Liberamente adattata da (Wiendahl, et al., 2007).

- nel graduale incremento del tasso di introduzione di nuovi componenti o parti in prodotti già esistenti sul mercato;
- nell'incremento delle fluttuazioni nel volume della domanda;
- nelle più frequenti variazioni del mix produttivo richiesto;
- nell'incremento delle divergenze esistenti fra il ciclo di vita dei prodotti, quello dei processi e delle strutture (Figura 1.2);

accompagnati da processi trasversali quali cambiamenti in materia legislativa² e nelle tecnologie di processo.

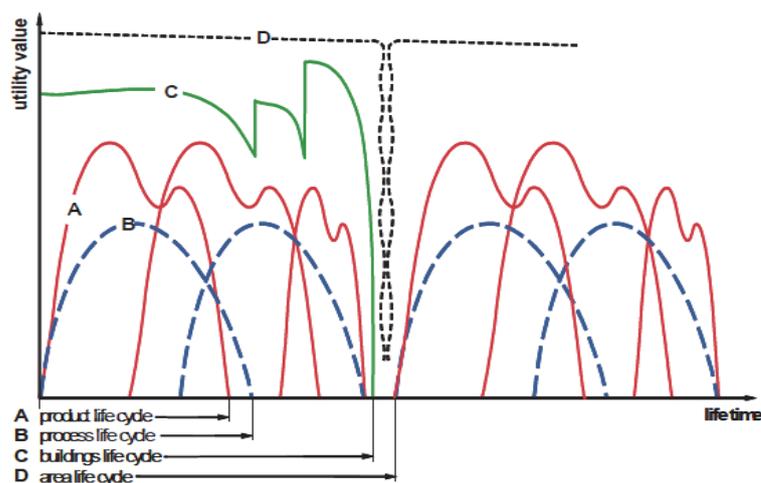


Figura 1.2 – Divergenze nel ciclo di vita degli elementi costitutivi di un'azienda
(Wirth, et al., 2004)

Nel prosieguo verranno approfonditi alcuni aspetti caratteristici dei fattori di cui si è detto, al fine di rendere più evidenti le influenze prospettate in Figura 1.1 e sottolineare quanto la *reattività* di un sistema produttivo sia divenuto parametro critico per la sua stessa sopravvivenza (Koren, et al., 1999).

² Soprattutto per quel che riguarda la sicurezza degli operatori e la tutela dell'ambiente.

³ Istituita nel 1995 sulla base degli accordi e delle convenzioni adottate dal *General Agreement on Tariffs and Trade* (GATT), la *World Trade Organization* (WTO) è l'organizzazione internazionale che sovrintende agli accordi commerciali tra i 153 stati che vi aderiscono e che rappresentano, a luglio 2008,

1.1.1 Aspetti economici ed influenza dei mercati. Globalizzazione e decentralizzazione della produzione

Diversi rapporti ufficiali resi noti dalla World Trade Organization³ indicano una crescita nel volume degli scambi internazionali maggiore di quasi due volte il *PIL* mondiale (Figura 1.3). Questo evidenzia il consolidamento della tendenza ad importare materie prime dai Paesi produttori, fabbricare parti e componenti in siti di produzione collocati in nazioni diverse da quella in cui è giuridicamente e amministrativamente collocata l'azienda per reimportare, successivamente, i prodotti finiti o eventualmente parti che necessitano esclusivamente di operazioni di finitura, assemblaggio e controllo (Figura 1.4).

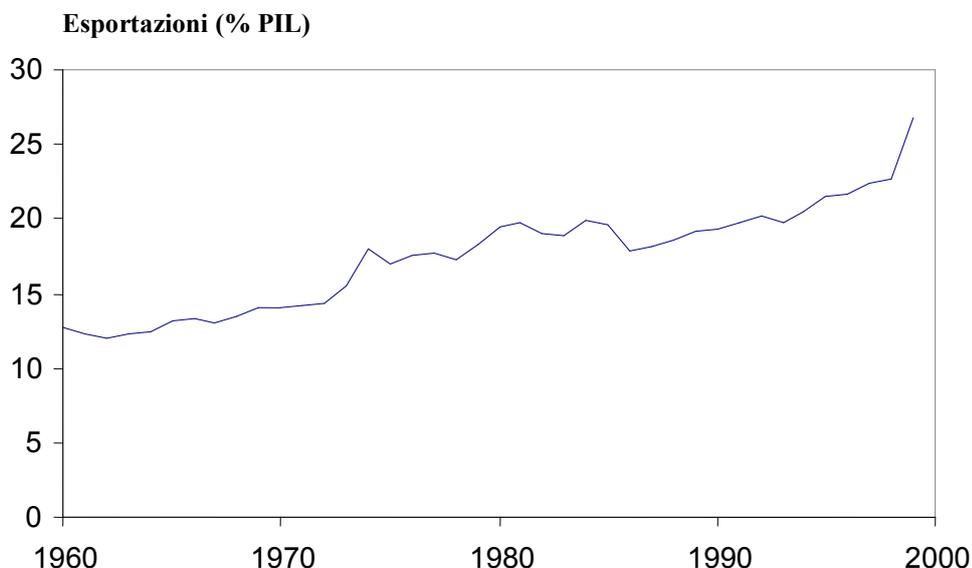


Figura 1.3 – Andamento delle esportazioni riferite al PIL nei Paesi afferenti alla WTO (Fonte WTO)

Quanto detto da adito ad una semplice considerazione: il taglio dei costi di produzione che si è in grado di spuntare rispetto al caso di realizzazione del prodotto nel stesso paese d'origine, si dimostra tale da giustificare ampiamente le nuove politiche di produzione.

³ Istituita nel 1995 sulla base degli accordi e delle convenzioni adottate dal *General Agreement on Tariffs and Trade* (GATT), la *World Trade Organization* (WTO) è l'organizzazione internazionale che sovrintende agli accordi commerciali tra i 153 stati che vi aderiscono e che rappresentano, a luglio 2008, il 97% del commercio mondiale di beni e servizi. Per informazioni più dettagliate si consulti: www.wto.org.

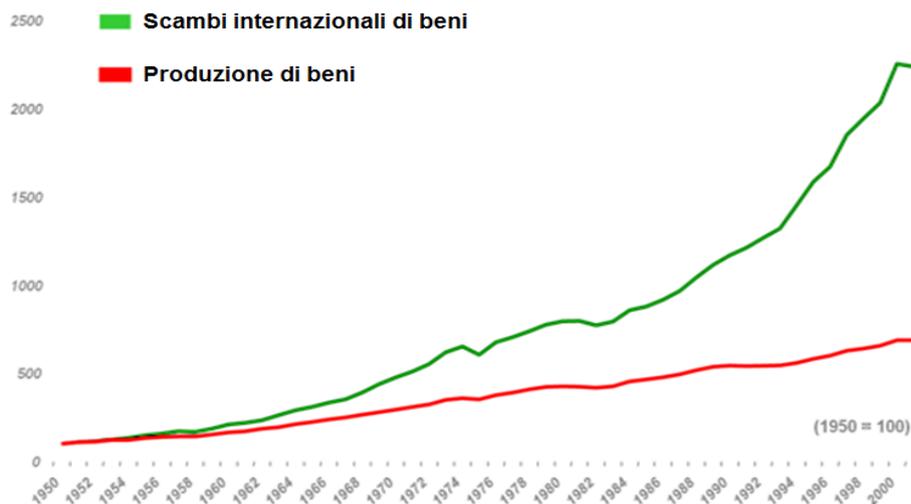


Figura 1.4 - Produzione di beni e scambi mondiali di merci (Fonte WTO)

Si punta, in effetti, a sfruttare gli specifici fattori produttivi esistenti in determinate aree del globo (basso costo del lavoro, elevata competenza delle maestranze o di uno specifico comparto, accesso a fattori tecnologici strategici, etc...), agevolati da una significativa riduzione nel costo dei trasporti intercontinentali (Figura 1.5). Ne deriva l'inevitabile aumento di interdipendenza dei mercati internazionali sia in riferimento al mercato dei beni, che in riferimento a quelli finanziari⁴.

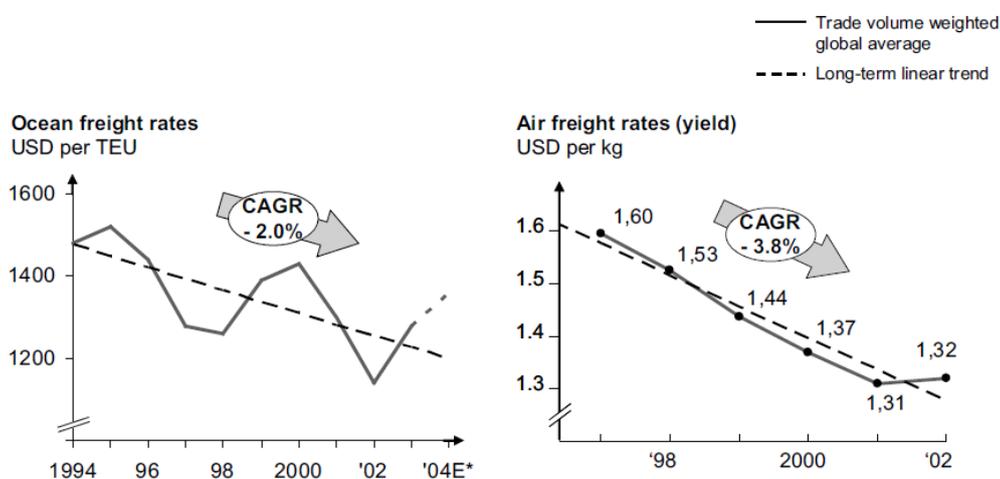


Figura 1.5 – Andamento dei costi di trasporto internazionali (Fonte LCGA Observer e IAFTA, 2004)

⁴ E il momento di crisi attualmente vissuto dalle più grandi economie mondiali ne è testimonianza.

Oltre a queste considerazioni di carattere squisitamente economico è, tuttavia, necessario considerare anche (Abele, et al., 2003):

- la crescente integrazione nella gestione dei sistemi economici;
- l'aumento del flusso di lavoratori e delle conoscenze attraverso i confini delle singole nazioni;
- l'aumento del flusso delle informazioni scambiate lungo la catena produttiva, da un Paese, all'altro;

le cui determinanti possono essere rintracciate nei seguenti fattori:

- *Progresso tecnico*, ha reso possibile l'abbattimento delle barriere naturali esistenti tra i mercati (costi di trasporto e di comunicazione) e dei costi di transazione (processo di “*morte delle distanze*”, Figura 1.6), grazie alla progressiva diffusione di piattaforme *ICT* (Moore, 1995);
- *Progresso sociale*, grazie al progressivo abbattimento delle barriere culturali (linguistiche e religiose), negli ultimi dieci anni l'accesso globale alle telecomunicazioni è passato dal 15% nel 1996 al 60% nel 2006, e, nello stesso periodo di tempo, si è registrato un incremento nell'utilizzo della rete internet del 1500% (Lamy, 2008).
- *Politiche di integrazione*, si è puntato alla liberalizzazione e alla riduzione (o eliminazione) delle restrizioni sul commercio internazionale e sulle transazioni finanziarie, abbattendo barriere di confine (dazi e restrizioni quantitative⁵, soprattutto nei Paesi in via di sviluppo, Figura 1.7 e Figura 1.8) e barriere interne (regole o consuetudini discriminatorie).
- *Politiche della concorrenza*, la liberalizzazione ha consentito l'eliminazione o, quantomeno, la riduzione delle restrizioni governative, favorendo la privatizzazione delle imprese statali.

⁵ Soprattutto a partire dalla fine degli anni'40, grazie agli accordi multilaterali sotto l'egida del *GATT* prima e del *WTO* dal 1994 in poi.

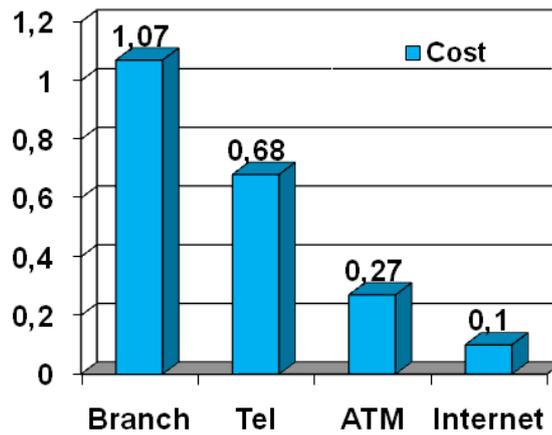


Figura 1.6 - Costi di transazione bancaria espressi in USD (Masduki, 1999)

Dazi doganali medi nei paesi industrializzati

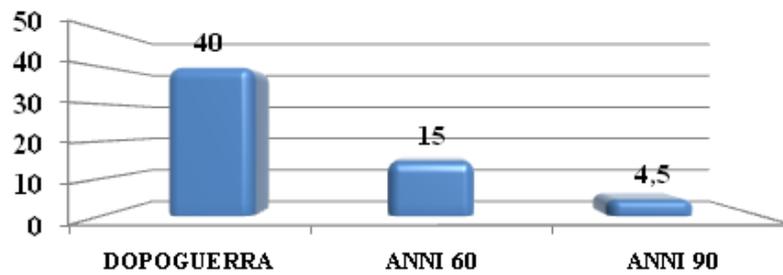


Figura 1.7 - Riduzione percentuale dei dazi doganali medi nei paesi industrializzati (Fonte WTO)

Dazi doganali medi di importazione dei maggiori PVS

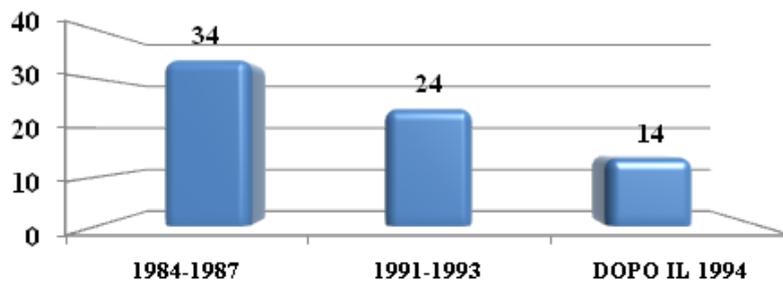


Figura 1.8 - Riduzione percentuale dei dazi doganali medi di importazione dei maggiori PVS (Fonte WTO)

L'analisi dei dati a disposizione, inoltre, prospettano l'esistenza di un processo di globalizzazione diviso in due fasi (Figura 1.9): una dal 1870 al 1914, l'altra dal 1960 ad oggi⁶ (Baldwin, et al., 1999).

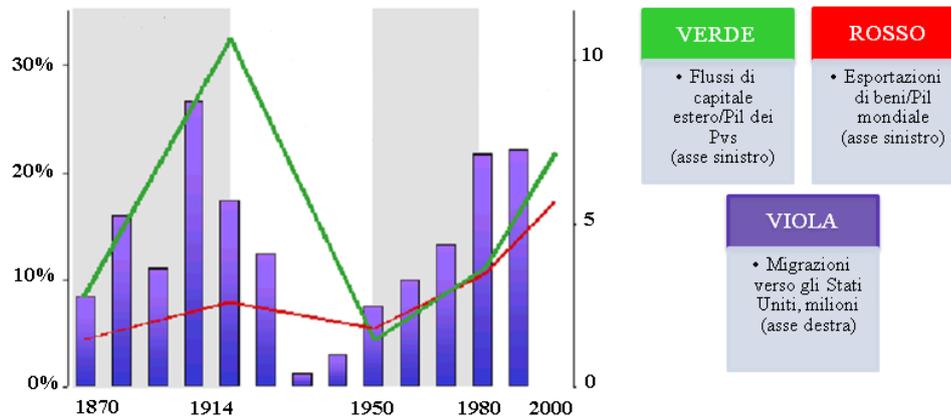


Figura 1.9 - Processo di globalizzazione, fasi (Baldwin, et al., 1999)

Sebbene entrambe le ondate siano mosse da cause comuni, è possibile registrare alcune profonde differenze:

- nella composizione dei flussi commerciali, caratterizzati in un primo momento da scambi di manufatti e beni primari e, successivamente, dal commercio intra-industriale;
- nella tipologia di capitali movimentati, potendosi registrare lo spostamento delle attenzioni degli investitori su prodotti caratterizzati da tempi di rientro del capitale più brevi, con conseguente incremento della frequenza dei cicli di investimento-disinvestimento;
- nei volumi dei flussi migratori, più consistenti nella prima fase;
- nella struttura socio-economica, che nella prima fase ha prodotto effetti redistributivi a vantaggio (svantaggio) del lavoro e a svantaggio (vantaggio) della rendita nel Nord Europa (Sud Europa), mentre nella

⁶ La prima, a seguito di politiche di liberalizzazione commerciale e del mercato sviluppo delle tecnologie, determina la crescita dei flussi di capitale, dei flussi migratori, il raddoppio degli scambi internazionali e favorisce la specializzazione dei PVS nella produzione di beni primari. La seconda è caratterizzata dal mancato recupero in termini di flussi di capitale/movimenti migratori e da una diminuzione del costo delle comunicazioni. È solo successivamente che si determinano processi di integrazione dei mercati internazionali ed una rinnovata spinta nel progresso tecnologico con la diffusione dell'*Information Technology* e delle reti di telecomunicazione.

seconda ha ampliato i differenziali di reddito esistenti tra lavoro qualificato e lavoro non qualificato;

- nella differente riduzione delle barriere naturali, che si è contraddistinta soprattutto per il calo dei costi di trasmissione delle informazioni nella seconda fase.

1.1.2 Fattori sociali e politici

La progressiva integrazione sociale, accompagnata dai processi di diffusione della cultura e della conoscenza, ha accelerato la progressiva migrazione dei consumi e della produzione di beni industriali dal gruppo U.S.A., EU e Giappone, verso i Paesi in via di sviluppo (Figura 1.10). Tale migrazione risulta particolarmente evidente soprattutto in quei settori in cui non siano richieste particolari competenze.

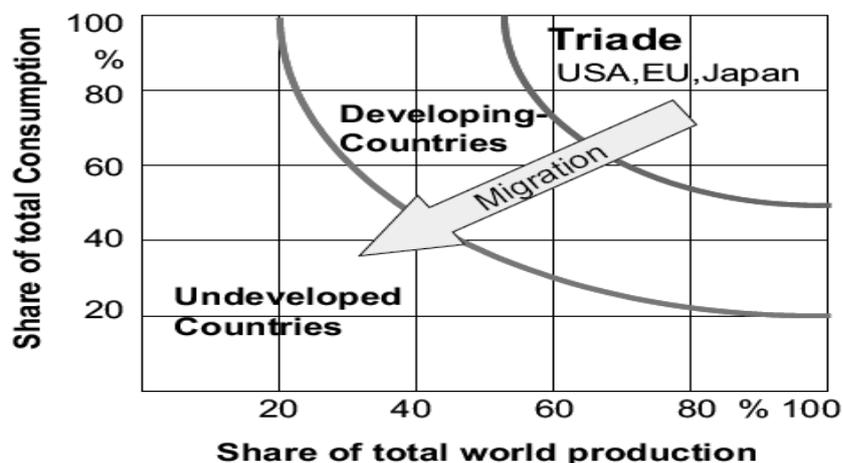


Figura 1.10 - Migrazione dei consumi e della produzione industriale (Westkämper, 2003)

Di fatto, ricchezza e occupazione sono aspetti che rendono la produzione una parte essenziale per lo sviluppo economico di un Paese e, dunque, se da una parte tale processo di migrazione favorisce l'apertura di nuovi mercati e il reperimento di nuove risorse produttive, è altrettanto vero che l'abbattimento dei costi ottenibile con le politiche di decentramento indebolisce la posizione economica, e quindi occupazionale, dei Paesi maggiormente industrializzati.

Per bilanciare tale tendenza, ripianare le consistenti perdite subite nel settore produttivo e rilanciare la competitività delle aziende del blocco in questione, il raggiungimento di una posizione di leadership nelle tecnologie produttive e nel *know-how*, la realizzazione di prodotti a basso impatto ambientale e progettati tenendo conto di un loro possibile recupero a fine ciclo vita, la capacità di fornire prodotti “cuciti” sulle esigenze dello specifico cliente, rappresentano fattori chiave per garantire, oltre alla ripresa di cui sopra, benessere sociale e il consumo controllato delle risorse limitate (Westkämper, 2003).

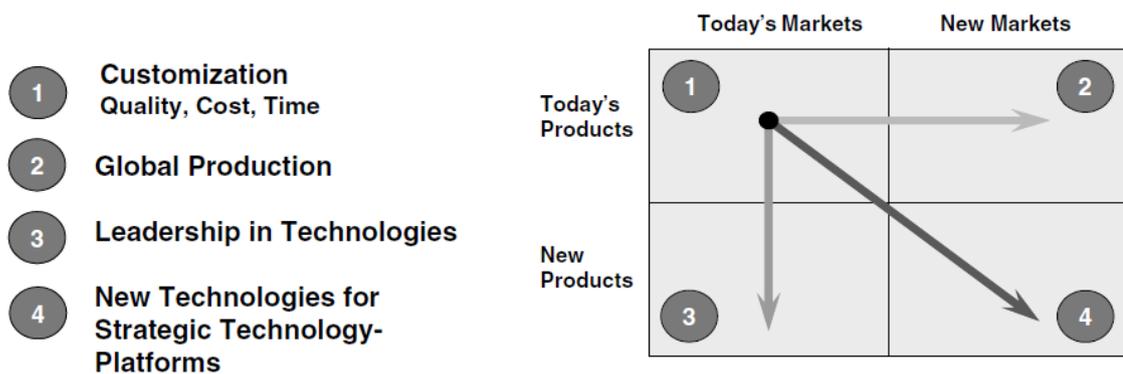


Figura 1.11 – Prospettive future per la competitività delle nazioni industrializzate (Westkämper, 2003)

È ragionevole, a tal proposito, immaginare un radicale cambiamento del tessuto produttivo delle aree considerate e della struttura specifica di ciascun settore manifatturiero. In particolare, possibili variazioni possono riguardare:

- un più consistente orientamento al ciclo di vita del prodotto, potendosi determinare una diversa organizzazione del lavoro e delle relazioni tra fornitori e clienti;
- l'applicazione diffusa delle conoscenze in campo produttivo. Sempre più comuni sono i sistemi “guidati” dalla conoscenza⁷ e sempre più pervasiva è l'applicazione della conoscenza nel settore produttivo, al punto da potersi prefigurare la nascita di veri e propri *Sistemi Meccatronici*

⁷ A tal proposito, è necessario distinguere fra *conoscenza esplicita* e *implicita*: la prima è necessaria per l'implementazione e il funzionamento dei sistemi, la seconda per automatizzare i processi di trasformazione e per controllarli.

Intelligenti (IMS - Intelligent Mechatronic Systems). L'obiettivo è quello di sfruttare la conoscenza non solo per il perfezionamento dei sistemi di produzione esistenti e per introdurre di nuovi ma anche di integrare tale conoscenza nei modelli logici di funzionamento dei sistemi, così da favorire un più deciso impiego degli strumenti di simulazione (Westkämper, 2003). Questi si dimostrano veri e propri strumenti di supporto alla pianificazione e al controllo dei processi produttivi e logistici, in grado di rispondere in tempi brevissimi alle mutevoli condizioni in cui le aziende si trovano a dover operare, favorendo l'ottimizzazione delle risorse e il conseguimento di elevati livelli di performance;

- la diffusione dei servizi ai prodotti, comprendenti, ad esempio, soluzioni di *IT Service Management, IT Portfolio Management, Mainframe*;
- il ruolo della forza lavoro, costituita da veri e propri responsabili scientifici in grado di avvalersi di conoscenze esplicite e di specifiche tecnologie nello svolgimento delle loro mansioni. Questo consente di aumentare l'efficacia del lavoro attraverso l'adeguata formazione e qualificazione, esalta le capacità di auto-organizzazione e favorisce nuove forme di collaborazione. Tali considerazioni, proposte già con il taylorismo, vengono rivisitate e adattate alle nuove contingenze dando vita a ciò che si potrebbe definire *Nuovo Taylorismo* (Westkämper, 2003).

1.1.3 Fattori ambientali

Il processo di globalizzazione, accompagnato dal processo di rapida diffusione dell'informazione, ha favorito, come detto in precedenza, sbocchi per nuovi mercati. Sebbene i consumi siano profondamente variabili da una regione all'altra del globo e sebbene in concomitanza di eventi eccezionali possano verificarsi periodi di stagnazione, il tasso di consumo globale cresce, mediamente, al crescere delle aspettative e della qualità della vita, oltre che a causa della maturazione della posizione sociale dei popoli.

Far fronte ad un incremento delle richieste significa, tuttavia, incrementare proporzionalmente la pressione esercitata sulle risorse messe a disposizione dal pianeta e, contemporaneamente, alterarne in modo spesso irreversibile i sempre più delicati equilibri che lo governano (Figura 1.12, Figura 1.13, Figura 1.14).

L'accresciuta attenzione del mondo politico, giuridico e sociale a tale problematiche ha portato alla nascita di concetti quali:

- *Produzione Sostenibile*, intesa come quel processo di sviluppo in cui l'utilizzo delle risorse, l'investimento dei capitali, le linee di sviluppo di nuove tecnologie e il progresso istituzionale, sono resi coerenti con le necessità odierne e future (AA.VV., 1987);
- *Ecologia Industriale*, intesa come l'insieme dei contributi multidisciplinari che hanno come obiettivo il perfezionamento del rapporto industria - ambiente (Ehrenfeld, 2004);
- *Green Accounting*, inteso come mezzo per correggere indicatori economici/transazionali, come ad esempio il *PIL*, al fine di valorizzare il contributo pagato dal pianeta in termini di risorse consumate a fronte della ricchezza prodotta (El Serafy, 1997).

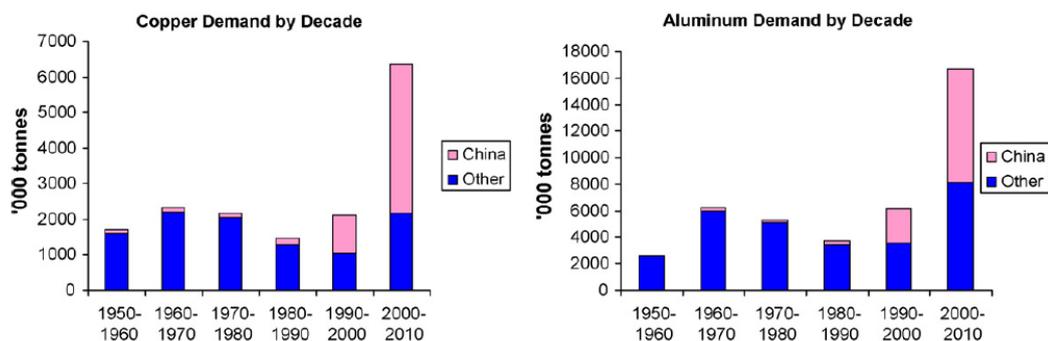


Figura 1.12 – Impatto del progresso socio/economico della Cina sul consumo di alcuni metalli di uso comune (AA.VV., 2005)

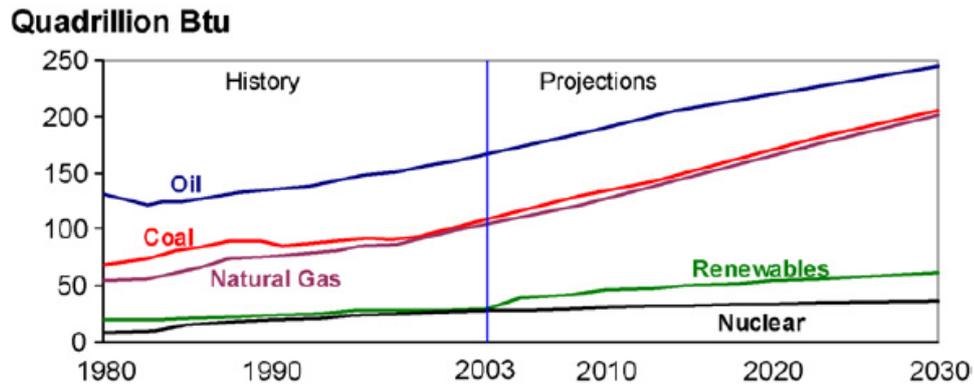


Figura 1.13 – Consumo energetico mondiale per tipologia di combustibile (Fonte EIA)⁸

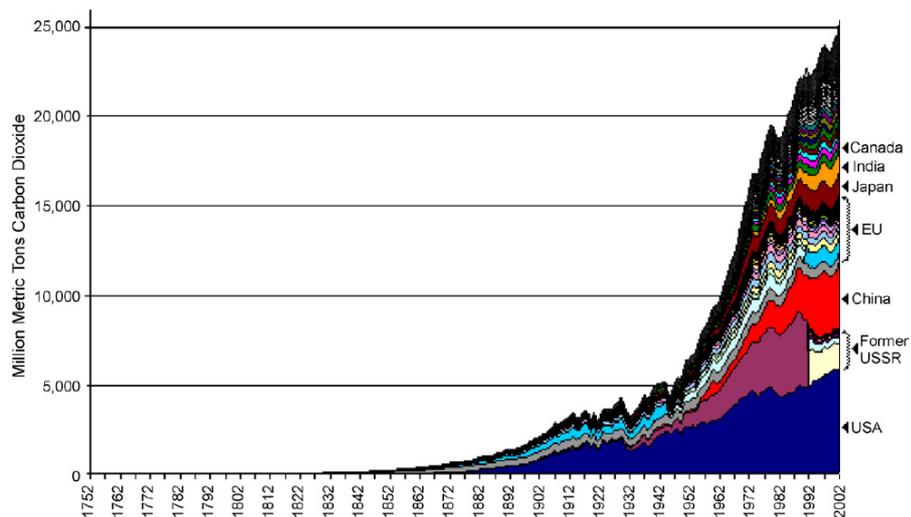


Figura 1.14 – Immissione di CO₂ in ambiente a seguito di processi di combustione industriale e cementificazione del territorio (Marland, et al., 2007)

Entrare nello specifico della tematica esula dagli obiettivi della presente ma vale la pena sottolineare quanto l’efficacia delle risposte fornite sia strettamente legata alla capacità di cogliere le interconnessioni che caratterizzano il problema: le questioni sociali ed economiche sono in grado di acuitizzare in modo evidente le problematiche di tipo ambientale (Figura 1.15).

⁸ Per un approfondimento si consulti www.eia.doe.gov.

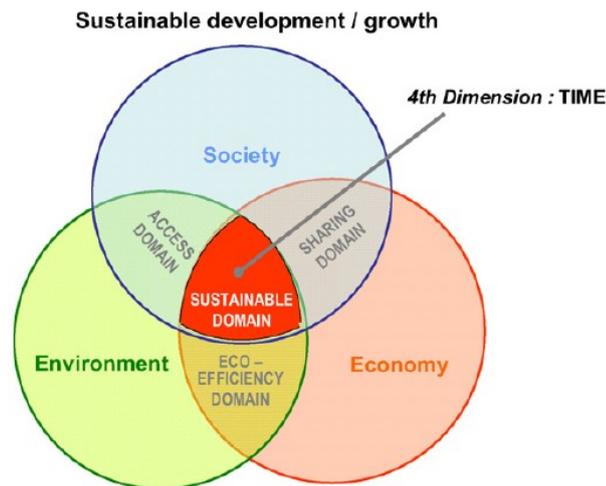


Figura 1.15 – Legami fondamentali per uno sviluppo sostenibile (Jovane, et al., 2008)

Il comparto produttivo, in particolare, dovrà essere in grado di:

- garantire lo sviluppo economico e la competitività;
- razionalizzare il ricorso alle risorse naturali (specialmente quelle non rinnovabili), gestendo quelle adoperate nel miglior modo possibile e minimizzando l’impatto ambientale;
- promuovere lo sviluppo sociale, favorire quello della cultura e delle conoscenze, accrescere la qualità della vita.

Tali sfide avranno risvolti in termini di caratteristiche richieste a⁹:

- *prodotti e servizi (Qualità sostenibile)*
 - sicurezza e minimizzazione dell’impatto ambientale durante l’intero ciclo di vita;
 - progettazione per la rifabbricazione/recupero/riciclo;
 - progettazione modulare;
 - packaging intelligenti e biodegradabili;
- *processi (Product vs Process Life Cycle Analysis)*

⁹ Tali tematiche sono esaustivamente trattate in (Jovane, 1998; Veleva, et al., 2001; Labuschagne, et al., 2005)

- progettazione e gestione per la minimizzazione dei rifiuti prodotti e per il riciclo on-site;
 - progettazione e gestione per la minimizzazione del ricorso a sostanze fisiche/chimiche potenzialmente dannose per la salute e per l'ambiente;
 - progettazione e gestione per la minimizzazione dei consumi energetici, la massimizzazione dei coefficienti di utilizzazione, il riutilizzo delle risorse a disposizione;
 - progettazione di ambienti di lavoro adattabili nel tempo alle esigenze della forza lavoro e del processo produttivo;
- *strategie d'impresa*
 - definizione programmata e preventiva delle attività che la costituiscono per l'analisi delle risorse effettivamente necessarie e perseguendo obiettivi economico-sociali compatibili da un punto di vista ambientale;
 - definizione e diffusione di linee guida nell'intera Supply Chain che favoriscano lo sviluppo sostenibile delle attività (Figura 1.16).

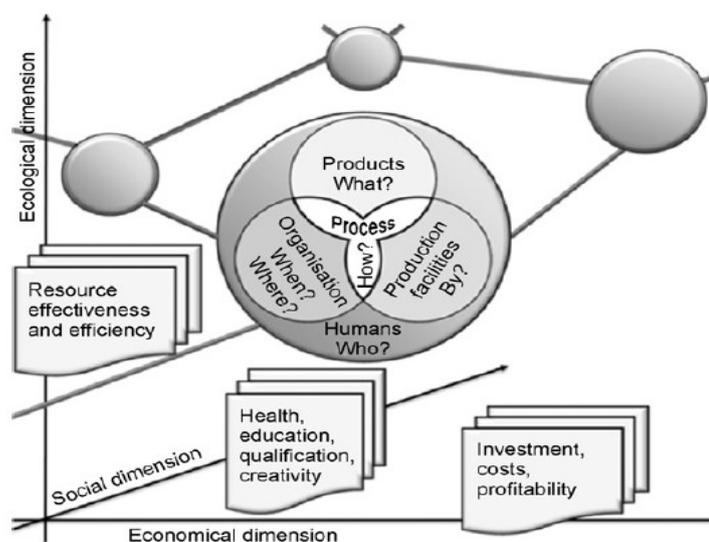


Figura 1.16 – Strategie di produzione sostenibili in una rete globale (Seliger, et al., 2008)

1.2 Aziende in movimento

Le esigenze d'adattamento derivanti da uno qualsiasi dei fattori di cui si è detto in precedenza (*Change Drivers*), comportano la valutazione di aspetti correlati per la definizione degli specifici obiettivi da perseguire e le strategie¹⁰ da mettere in atto (Figura 1.17).

Infatti, la focalizzazione su attività che favoriscano la creazione di valore aggiunto più direttamente percepibile agli occhi del cliente (*Change Focus*), investe il prodotto, il processo, le facility, la logistica e l'organizzazione aziendale (*Change Object*), comportando non solo un'adeguata valutazione degli sforzi necessari per implementarle (*Change Extension*) ma anche la determinazione di indici di performance in grado di garantire il conseguimento degli obiettivi attesi e la correzione dinamica delle politiche intraprese (*Performance Measurement System*).

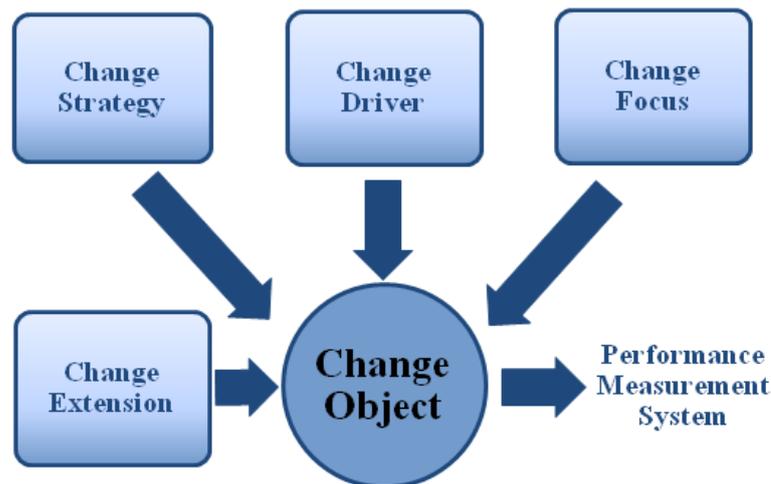


Figura 1.17 - L'azienda come oggetto del cambiamento¹¹

¹⁰ Si è, in generale, chiamati ad implementarne:

- *a livello operativo*, in tal caso è possibile operare all'interno di strutture pre-esistenti semplicemente installando o sostituendo, ad esempio, dei macchinari;
- *a livello tattico*, che mirino a diffondere un approccio di tipo proattivo, nel senso che consentano di organizzarsi a livello metodologico, tecnologico e delle risorse umane per percepire anticipatamente le tendenze e i cambiamenti in modo da pianificare le azioni nei tempi più opportuni;
- *a livello concorrenziale*, frutto di un investimento strategico.

¹¹ Liberamente adattata da (Wiendahl, et al., 2007).

A tal proposito, particolarmente interessanti appaiono le prospettive concernenti le nuove forme di organizzazione della produzione e l'evoluzione tecnologica.

1.2.1 *Produzione Globale e Networked Manufacturing*

Sebbene, in generale, la scelta di centralizzare o distribuire le attività produttive dipenda dal tipo di azienda considerata, dalla struttura dei costi, dal posizionamento della stessa nella catena del valore e dalla situazione concorrenziale (Tabella 1-1)¹², la capacità di adattare, all'occorrenza, le proprie attività produttive alle necessità locali, si sta rivelando una scelta strategia assolutamente vincente, permettendo di sostenere il ritmo al quale è necessario introdurre nuovi e sempre più personalizzati prodotti, assorbire le fluttuazioni nella domanda di quelli già esistenti ed evitare transazioni logistiche superflue (Westkämper, 2003).

Tabella 1-1 - Strategie di produzione globale (Abele, et al., 2003)

INTEGRAZIONE GLOBALE DELLE ATTIVITÀ PRODUTTIVE	ALTA	<i>Geocentric Global Manufacturing</i>	<i>Hybrid Manufacturing Strategies</i>
	BASSA	<i>Ethnocentric International Manufacturing</i>	<i>Polycentric Multinational Manufacturing</i>
		BASSO	ALTO
ADATTAMENTO LOCALE DELLE ATTIVITÀ PRODUTTIVE			

Pur dovendo far fronte all'inevitabile incremento della complessità gestionale del sistema¹³, inoltre, si va diffondendo il ricorso a strategie ibride, in grado di sfruttare i vantaggi provenienti dalla produzione locale, combinati a sinergie

¹² E in linea di principio da tutta una serie di fattori qualitativi e quantitativi quali: instabilità politica o sociale, standard di sicurezza sul lavoro adottati, economie di scala, costo dei fattori produttivi e del lavoro, il livello di automazione, fluttuazioni della domanda.

¹³ Concentrare semplicemente le attività produttive nei paesi d'origine e distribuire i prodotti finiti su mercati esteri non si è rilevata una strategia vincente: il processo produttivo, il più delle volte, non risulta ottimizzato perché non orientato alle esigenze del paese in cui il prodotto troverà mercato.

globali, grazie alla diminuzione dei costi associati alla trasmissione e all'elaborazione dei dati.

I processi produttivi diventano, in questo modo, parte di una più complessa rete di produzione, in grado di coprire diverse aree geografiche e la tradizionale *Supply Chain* si configura come l'insieme di più reti operanti per un fine comune (Figura 1.18).

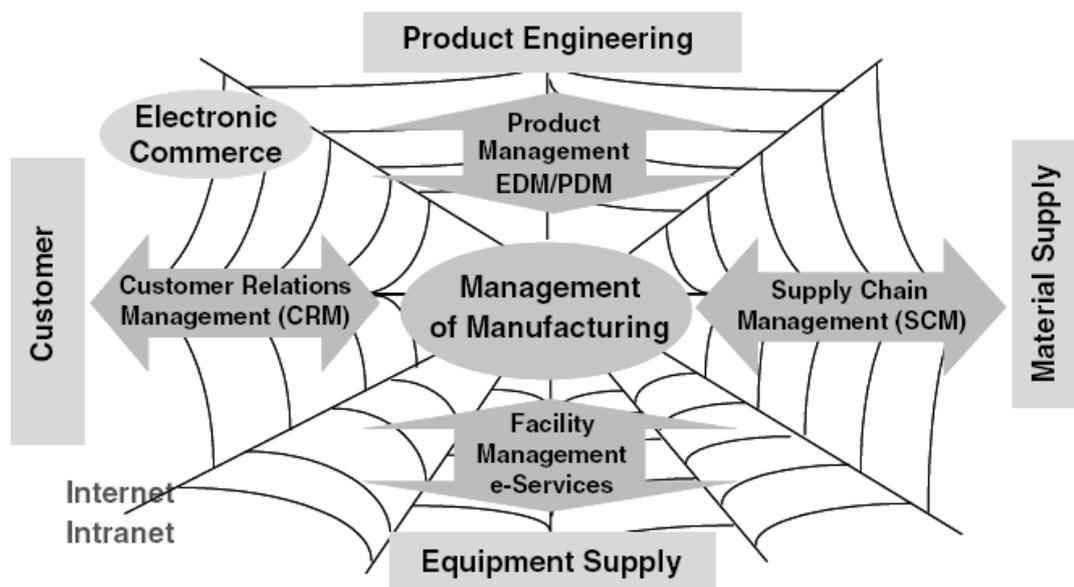


Figura 1.18 - Networked manufacturing (Westkämper, 2003)

Ciascuna delle reti è da considerarsi a tutti gli effetti un sistema dinamico e la gestione delle transizioni richiede, quindi, soluzioni e informazioni da implementare in tempo reale per:

- ottimizzare l'architettura della rete;
- adattare gli elementi del sistema e dei sottosistemi;
- organizzare un più adeguato sistema di gestione della produzione.

Nel perseguire tale insieme di obiettivi è, d'altro canto, opportuno tener conto del proporzionale aumento dell'instabilità dei processi e dei rischi legati all'incremento della difettosità/non conformità. In tale ambito risultano determinanti:

- la conoscenza dei processi e l'individuazione delle aree critiche;
- la gestione ottimale di materiali, processi e conoscenze;
- l'implementazione di varie forme di automazione flessibile

1.2.2 Evoluzione tecnologica

Lo sviluppo strategico di un'impresa è fortemente condizionato dai cicli di vita dettati dal progresso tecnologico, dalla ricerca di base fino all'effettiva implementazione della tecnologia presa in considerazione. Se, infatti, nel medio/breve periodo viene influenzato l'intero processo di ottimizzazione delle risorse e del sistema esistente, vengono poste anche le basi per individuare le aree oggetto di investimenti futuri e i cambi strutturali da realizzare (Figura 1.19).

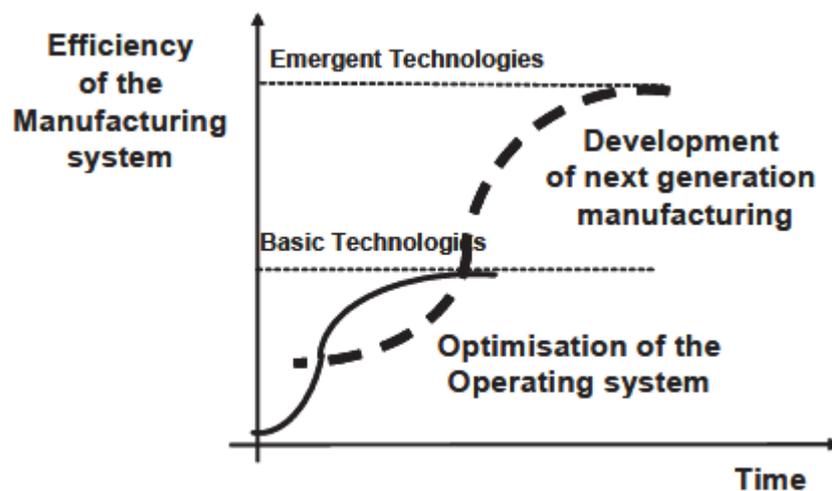


Figura 1.19 – Influenza dell'innovazione tecnologica sullo sviluppo strategico d'impresa (Westkämper, 2007)

Un'analisi esaustiva della prospettata evoluzione industriale non può prescindere dalla comprensione dei paradigmi tecnologici emergenti sotto la spinta dei risultati ottenuti grazie alla ricerca svolta in diversi settori (Figura 1.20).

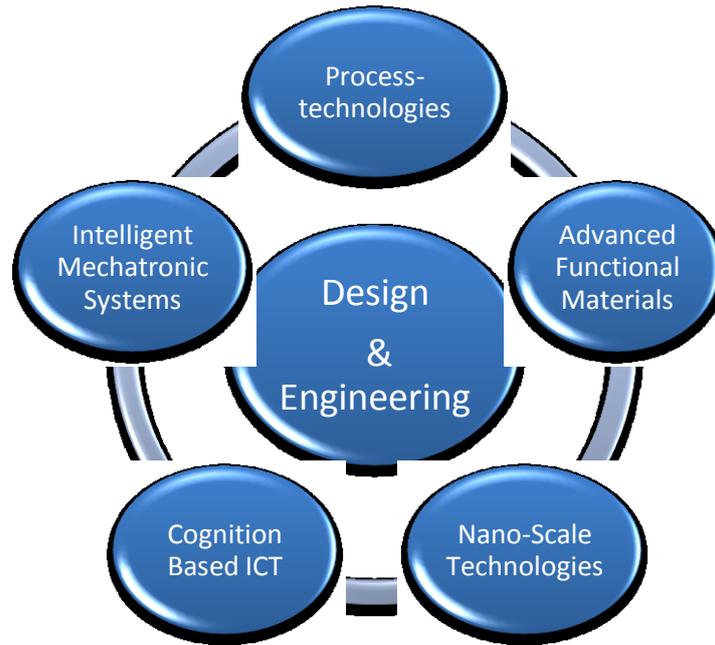


Figura 1.20 - I principali settori d'innovazione in campo manifatturiero (Westkämper, 2003)

Più nello specifico, i miglioramenti nelle tecnologie di processo hanno favorito il graduale superamento dei limiti legati alla qualità e alla precisione nell'esecuzione delle lavorazioni, tanto da consentire, con l'ausilio di opportuni strumenti di controllo, il ricorso a lavorazioni multi-mandrino/multi-utensile in grado di abbattere consistentemente i tempi medi di processamento e incrementare la produttività (Soshia, et al., 2009).

I più recenti sviluppi in materia di utilizzo di compositi, ceramici o leghe speciali, consente di poter fare affidamento su materiali capaci di garantire performance d'eccellenza, basso impatto ambientale, ridotto consumo delle risorse e dell'energia, mentre il ricorso alle nanotecnologie consente la miniaturizzazione delle parti, la riduzione del loro peso e delle loro dimensioni, il contenimento delle dispersioni termiche e il miglioramento della qualità delle superfici, accompagnati da una rilevante riduzione dei costi (AA.VV., 2005). L'applicazione di tali risultati al campo della robotica industriale ha favorito lo sviluppo dei già citati *Sistemi Meccatronici* e, più in generale, di veri e propri *Sistemi di Produzione Intelligenti* basati sull'applicazione della conoscenza, oltre che il ricorso sistematico alla simulazione e alla prototipazione dei sistemi di controllo (Rzevski, 2003).

I progressi registrati nell'ambito dell'*Information and Communication Technology (ICT)* consentono, infine, di gestire in modo sempre più rapido, efficace ed efficiente il crescente volume delle informazioni e delle transazioni, favorendo la ridefinizione dei rapporti fra aziende, clienti, fornitori e altre organizzazioni attraverso l'*IT Service Management (ITSM)* (Falk, 2004). Inoltre, grazie alla progressiva standardizzazione delle interfacce e al rinnovato supporto alla pianificazione e al controllo della produzione, che consentono l'abbattimento dei tempi per l'estrapolazione delle informazioni dai dati accumulati, è possibile affrontare con ottimi risultati problematiche caratterizzate da elevata aleatorietà e dinamicità (Carbonara, 2003).

L'integrazione delle nuove tecnologie nel processo produttivo, grazie anche all'adozione di specifici strumenti di pianificazione, controllo e gestione dell'informazione, consentono la migrazione verso forme di produzione adattativa (*Adaptive Manufacturing*), sfruttando le più disparate forme di automazione flessibile e robotica (Wiendahl, et al., 2007). Contemporaneamente:

- lo sviluppo di strumenti integrati per l'ingegneria industriale in grado di supervisionare le fasi di progettazione, produzione e gestione della produzione al variare di specifiche esigenze aziendale;
- la possibilità di ricorrere a rappresentazioni digitali della realtà e del comportamento dinamico del sistema produttivo nel suo intero ciclo di vita;
- l'integrazione delle informazioni a disposizione riguardanti prodotti, processi, risorse ed impianti;

spingono verso le prime forme di *Digital Manufacturing* (Westkämper, 2003).

1.3 Bibliografia

- AA.VV., *Data Presentation to China-Brazil Business Council*. Rapporto della Macquarie Bank Ltd, 2005.
- AA.VV., *Nanotechnology: Global Strategies, Industry Trends and Applications*. A cura di Schulte Jürgen. John Wiley & Sons, 2005.
- AA.VV., *Our Common Future*. Rapporto della World Commission On Environment and Development, Annex To General Assembly Document A/42/427, 1987.
- Abele E., Elzenheimer J., Liebeck T., Meyer T., *Globalization and Decentralization of Manufacturing*. In Dashchenko A.I., *Reconfigurable Manufacturing Systems and Transformable Factories*. Springer, 2003, pp. 3-13.
- Baldwin R.E., Martin P., *Two waves of globalisation: superficial similarities, fundamental differences*. Rapporto del National Bureau of Economic Research, Working Paper 6904, 1999.
- Carbonara N., *Information and communication technology and geographical clusters: opportunities and spread*. Technovation, Vol. 25 (3), 2003, pp. 213-222.
- Chryssolouris G., *Manufacturing Systems: Theory and Practice*, 2nd Edition. Springer Verlag, Berlino, 2005.
- Ehrenfeld J., *Industrial ecology: a new field or only a metaphor?*. Journal of Cleaner Production, Vol. 12 (8-10), 2004, pp. 825-831.
- El Serafy S., *Green accounting and economic policy*. Ecological Economics, Vol. 21 (3), 1997, pp. 217-229.
- Falk M., *ICT - linked firm reorganisation and productivity gains*. Technovation, Vol. 25 (11), 2004, pp. 1229-1250.
- Jovane F., *Concepts for Strategic Machinery Innovation*. Opening Presentation at ARMMS - Agile Reconfigurable Manufacturing Machinery Systems Thematic Network, Kick off Meeting, Bruxelles, 1998.
- Jovane F., Yoshikawa H., Alting L., *The incoming global technological and industrial revolution towards competitive sustainable manufacturing*. CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 57, 2008, pp. 641–659.
- Koren Y., Heisen U., Jovane F., Moriwaki T., *Reconfigurable Manufacturing Systems. A keynote paper*. Annals of the CIRP, Vol. 48 (2), 1999, pp. 527-540.
- Labuschagne C., Brent A.C., van Erck R.P., *Assessing the Sustainability Performances of Industries*. Journal of Cleaner Production., Vol. 13, 2005, pp. 373-385.
- Lamy P., intervista a, *WTO DG Lamy celebrates benefits of opening trade in telecoms*. Ginevra, 20 Febbraio 2008.

- Marland G., Boden T., Andres R.J., *Global, Regional, and National CO2 Emissions*. In Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, *Trends: A Compendium of Data on Global Change*. Rapporto del U.S. Department of Energy, Oak Ridge, U.S.A., 2007.
- Masduki S., *The Multimedia Super Corridor A Model for Fostering Economic Growth and Development using IT*. Proceedings of the World Trade Organization Information Technology Symposium, Ginevra, 1999.
- Moore M.G. *The death of distance*. The American Journal of Distance Education, Vol. 9 (3), 1995, Editoriale.
- Rzevski G., *On conceptual design of intelligent mechatronic systems*. Mechatronics, Vol. 13 (10), 2003, pp. 1029-1044.
- Seliger G., Severengiz S., Weinert N., *Sustainable Industrial Value Creation Networks*. Proceedings of the 15th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, Vol. 1, Sidney, Australia, 2008.
- Soshia M., Ishiguro H., Yam K., *A study on the development of a multi-purpose spindle system for quality productive machining*. CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 58 (1), 2009, pp. 327-330.
- Veleva V., *Indicators of Sustainable production: framework and methodology*. Journal of Cleaner Production, Vol. 9, 2001, pp. 447-452.
- Westkämper E., *Strategic Development of Factories under the Influence of Emergent Technologies*. Annals of the CIRP, Vol. 56 (1), 2007, pp. 419-422.
- Westkämper E., *New Trends in Production*. In Dashchenko A.I., *Reconfigurable Manufacturing Systems and Transformable Factories*. Springer, 2003, pp.15-26.
- Wiendahl H.P., *Changeable Manufacturing - Classification, Design and Operation*. Annals of the CIRP, Vol. 56 (2), 2007, pp. 783-809.
- Wirth S., Enderlein H., *Kompetenzwerke der Produktion, IBF-Fachtagung, Vernetzt planen und produzieren*. In Schenk M., Wirth S., *Fabrikplanung und Fabrikbetrieb*. Springer Verlag, 2004.

Capitolo II

CARATTERISTICHE DI UN SISTEMA RICONFIGURABILE DI PRODUZIONE

Il prospettato sviluppo di sistemi di produzione in grado di adattarsi rapidamente alle mutate richieste di mercato, sia in termini di volumi produttivi che in termini di tipologie di prodotto offerte, è reso possibile grazie all'implementazione di "fattori abilitanti" di tipo fisico e di tipo logico. I primi rendono tecnologicamente possibile la configurazione e la successiva riconfigurazione delle macchine utensili, dei sistemi di trasporto e dei robot adoperati a vario titolo nel sistema produttivo, nonché la loro redistribuzione all'interno dei reparti e il riposizionamento dei reparti stessi all'interno dei fabbricati. I fattori di tipo logico, invece, presiedono allo sviluppo dei modelli dinamici destinati al controllo dei processi di riconfigurazione, di pianificazione e controllo della produzione, della pianificazione della capacità necessaria e della circolazione delle informazioni all'interno del sistema.

In questo capitolo, dopo aver individuato le principali proprietà di cui un sistema deve essere dotato per poter essere annoverato fra i Sistemi di Produzione Riconfigurabili (RMS), verranno illustrate alcune delle caratteristiche fisiche e logiche di cui si è detto, non solo al fine di rendere più evidenti le differenze rispetto ai sistemi di produzione di tipo tradizionale ma anche per individuare le criticità che possono sorgere nella progettazione e nella gestione di un sistema di questo tipo.

2.1 Flessibilità e riconfigurabilità

L'analisi delle caratteristiche peculiari di un Sistema Riconfigurabile di Produzione (*RMS – Reconfigurable Manufacturing System*) presuppone una corretta interpretazione del termine “riconfigurabilità”. A tal proposito, un riferimento di assoluto rilievo è quello fornito dall'Università di Stuttgart (Heisel, et al., 2003), secondo la quale il termine deriverebbe da quello di “configurazione” del sistema:

“...la configurazione di un sistema corrisponde alla progettazione, alla selezione e alla composizione di moduli provenienti da uno determinato insieme che rispondono alle specifiche e alle richieste degli utilizzatori. Riconfigurazioni, invece, sono le successive conversioni e modificazioni di strutture, funzionalità, capacità e tecnologie attraverso la sostituzione, l'aggiunta o la rimozione di componenti discreti in modo autonomo...”

In realtà, tale definizione rappresenta un'estensione del termine che in un'interpretazione più rigida e tradizionale sta ad indicare una specifica forma di *adattabilità*. Procedendo ad una scomposizione della catena di produzione nei sottosistemi che la costituiscono e isolando i prodotti esistenti nel portafoglio aziendale con le loro specifiche caratteristiche costruttive e funzionali, è possibile individuare cinque differenti *classi d'adattabilità*, dove le classi di rango più elevato comprendono le caratteristiche delle classi di rango inferiore (Figura 1.1).

Più nello specifico è possibile distinguere fra (ElMaraghy, 2005):

- *Capacità di Changeover* - Capacità operativa posseduta da una singola macchina o workstation che rende in grado di eseguire, con tempi d'intervento e costi minimi, differenti operazioni su uno specifico componente;
- *Riconfigurabilità* - Capacità operativa posseduta da un sistema produttivo (cella di assemblaggio) che rende in grado di passare, con tempi d'intervento e costi minimi, dalla produzione (assemblaggio) di una parte/prodotto appartenente ad una specifica famiglia di parti/prodotti ad

un'altra parte/prodotto appartenente alla stessa famiglia di parti/prodotti, mediante l'aggiunta o la rimozione di elementi funzionali;

- *Flessibilità* - Capacità tattica posseduta dall'area logistico/produttiva che rende in grado di produrre, con tempi d'intervento e costi ragionevolmente bassi, famiglie di prodotti simili a quelle attualmente realizzate dal sistema, modificando i processi di produzione, i flussi di materiali e le funzioni logistiche;
- *Trasformabilità* - Capacità tattica posseduta dall'intera struttura produttiva che rende in grado di realizzare prodotti appartenenti ad una famiglia non precedentemente presente nel portafoglio aziendale. Richiede interventi strutturali nel settore logistico/produttivo, nella struttura degli impianti e degli edifici, nella struttura del processo, nell'organizzazione del personale;
- *Agilità* - Capacità strategica posseduta dall'azienda che rende in grado di sviluppare prodotti e servizi richiesti da nuovi mercati o segmenti di mercato.

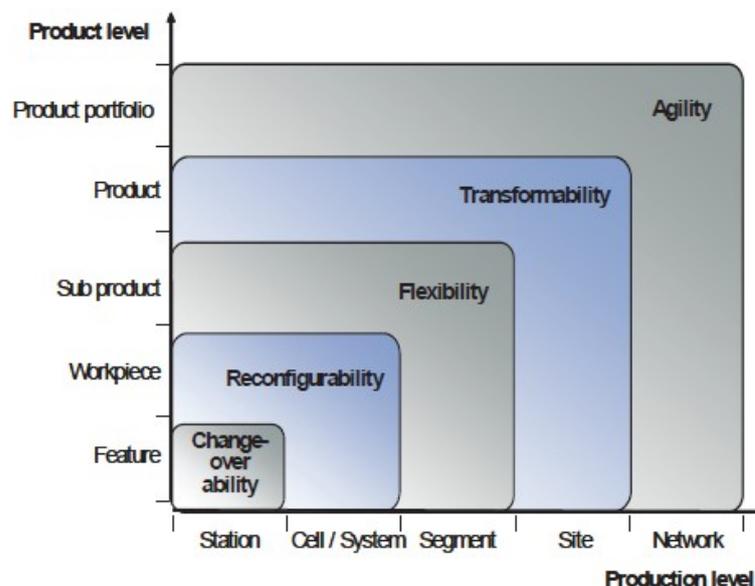


Figura 2.1 – Classi di adattabilità di un sistema produttivo (Wiendahl, 2005a)

Sebbene dalla classificazione di cui sopra il termine flessibilità lasci intendere caratteristiche di adattabilità superiori del sistema, è altrettanto vero che

distinguerla da forme di semplice riconfigurabilità diviene spesso possibile solo in specifici ambiti applicativi. Questo è dovuto principalmente all’accezione con cui, in letteratura e nella pratica industriale, viene oggi adoperato il termine e ai molteplici aspetti che, a vario titolo, vengono ad esso ricondotti.

Per quanto attiene al primo punto è necessario ricordare che la caratteristica “flessibilità” conferisce ad un sistema la capacità di mutare il suo assetto produttivo, senza che questo influisca sulla configurazione logistico/produttiva di cui è attualmente dotato. La caratteristica “riconfigurabilità” conferisce, invece, al sistema la capacità di mutare il suo assetto produttivo puntando proprio su una riconfigurazione rapida ed economica dell’area logistico/produttiva (Tolio, et al., 2006).

Per quel che concerne il secondo punto, in generale, è possibile individuare tre obiettivi specifici cui il termine flessibilità punta (Figura 2.2), a seconda che l’analisi prenda in considerazione i prodotti, le operazioni svolte o la capacità del sistema produttivo (Chryssolouris, 2005).



Figura 2.2 – Categorie e obiettivi della flessibilità (Chryssolouris, 2005)

Più nello specifico¹⁴, si definiscono:

- *Flessibilità di prodotto* - La capacità di un sistema di produrre un insieme di parti ricorrendo alle stesse macchine;

¹⁴ Per un ulteriore approfondimento sulla tematica si consulti (Koste, et al., 1999).

- *Flessibilità operativa* - La capacità di un sistema di produrre un insieme di prodotti ricorrendo a differenti materiali, macchine e cicli produttivi;
- *Flessibilità della capacità* - La capacità di un sistema di adattarsi, in termini di volume e mix produttivo, alle richieste di mercato, nel minor tempo possibile e conservando adeguati margini di profitto.

Tali forme di flessibilità possono essere applicate tanto alla linea produttiva, quanto alle celle di assemblaggio (Eversheim, et al., 1986) o all'intero sistema aziendale (Sethi, et al., 1990; De Toni, et al., 1998). In particolare, per quel che concerne le attività di produzione vere e proprie, è possibile distinguere fra (ElMaraghy, 2005):

- *Flessibilità delle macchine* - Numero di operazioni che una macchina può compiere senza dover effettuare un nuovo set-up;
- *Flessibilità del sistema di movimentazione* - Numero di percorsi che è possibile effettivamente adoperare per realizzare la movimentazione dei materiali da un punto all'altro del sistema produttivo, rispetto a quelli teoricamente adoperabili;
- *Flessibilità operativa* - Numero di piani produttivi alternativi cui è possibile ricorrere per la realizzazione di una specifica parte/componente;
- *Flessibilità di prodotto* - Sforzo richiesto, in termini economici e temporali, per l'introduzione di un nuovo prodotto nel portafoglio aziendale;
- *Flessibilità di processo* - Insieme di parti che è possibile realizzare nel sistema senza dover ricorrere a sostanziali cambiamenti nel ciclo produttivo;
- *Flessibilità nel routing* - Numero dei possibili instradamenti delle parti da produrre rispetto al numero di parti da produrre;

- *Flessibilità del volume produttivo* - Limite entro il quale è possibile soddisfare la domanda di mercato senza dover ricorrere ad una variazione della capacità installata;
- *Flessibilità d'espansione* - Sforzo richiesto, in termini economici e temporali, per l'incremento della capacità (volume e/o funzionalità richiesti al sistema), allorquando si renda necessario;
- *Flessibilità nel sistema di controllo* - Capacità dei sistemi di controllo di svolgere attività produttive senza necessariamente ricorrere alla supervisione dell'uomo;
- *Flessibilità di produzione* - Numero di parti/prodotti che è possibile realizzare senza per questo dover ricorrere ad ingenti investimenti in macchine o risorse aggiuntive in generale.

L'anello di congiunzione fra i concetti esposti potrebbe trovarsi nell'individuazione di alcune forme di *flessibilità di base* che, opportunamente caratterizzate e combinate, possano dar luogo a forme di *flessibilità complessa*, tipiche della singola applicazione (Terkaj, et al., 2007). La definizione delle forme di base è riconducibile all'analisi di alcune *dimensioni*, le "categorie" di Figura 2.2, ciascuna delle quali caratterizzabile tramite un insieme di *attributi comuni*¹⁵ (Upton, 1994).

Sebbene un sistema possa non essere provvisto di una specifica forma di flessibilità, potrebbe essere in grado di dotarsene rapidamente perché in possesso dei fattori abilitanti di cui si è detto in precedenza. Tale forma di predisposizione rende il sistema in oggetto dotato della caratteristica di riconfigurabilità nei confronti di quella forma di flessibilità (Figura 2.3) e giustifica l'introduzione del termine *flessibilità focalizzata* (Tolio, et al., 2006).

¹⁵ Più nello specifico: *estensione, risoluzione, mobilità, uniformità*.

Basic Flexibility Level	Definition
Level 1 (Flexibility)	The system has the ability
Level 2 (Reconfigurability)	The system can acquire the ability already having the enablers
Level 3 (Changeability)	The system can acquire the enablers

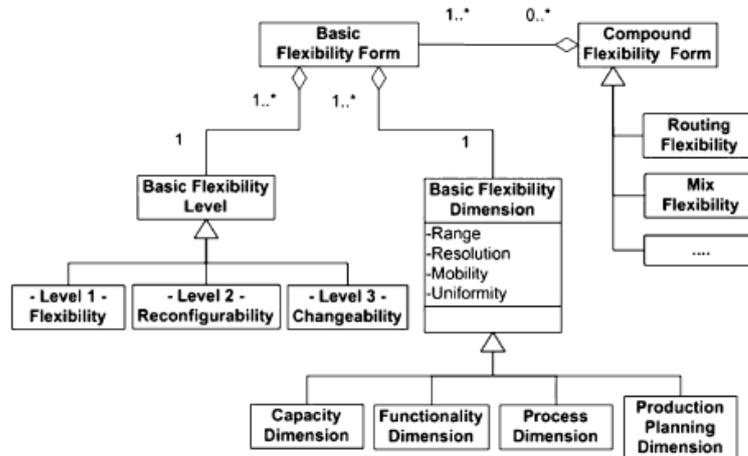


Figura 2.3 – *Strutturazione in livelli delle flessibilità di base* (Terkaj, et al., 2007)

2.2 Sistemi Riconfigurabili di Produzione

Il termine *Sistema Riconfigurabile di Produzione* viene adoperato per individuare un paradigma produttivo di recente concezione attraverso il quale puntare all’adattabilità funzionale e alla scalabilità della capacità, con costi e tempi contenuti.

Più nello specifico, fra le definizioni rintracciabili in letteratura, le seguenti appaiono particolarmente incisive:

“...un sistema di produzione, progettato fin dall’inizio, di modo che i componenti della specifica macchina, le macchine, le celle di produzione o i sistemi di movimentazione dei materiali possano essere aggiunti, rimossi, modificati o scambiati per rispondere rapidamente alle mutevoli esigenze del mercato...”
 (Koren, et al., 1999; Fujii, et al., 2000);

“...un sistema di produzione in grado di fornire, qualora fosse necessario, il giusto grado di flessibilità attraverso la scalabilità della capacità e l’adattamento funzionale, per soddisfare rapidamente le esigenze del mercato...”
 (Mehrabi, et al., 2000).

Pur focalizzandosi su obiettivi “classici”, quali produzione a basso costo e qualità, tali sistemi consentono il soddisfacimento dei requisiti di reattività di cui si è parlato nel Capitolo I. Inoltre, dalla prima definizione emergono chiare indicazioni circa la convenienza economica di convertire verso tale forma di produzione impianti già esistenti, nonché una delle caratteristiche chiave di cui un sistema deve essere dotato per poter essere considerato a tutti gli effetti un RMS: la *modularità*. La seconda definizione, invece, fornisce indicazioni sul grado di flessibilità di cui sono dotati i sistemi in questione, riallacciandosi alle tematiche di *focalizzazione della flessibilità* secondo quanto specificato nel paragrafo precedente.

L’interesse scientifico per lo sviluppo di sistemi riconfigurabili e per le tematiche ad essi collegate, è testimoniato dai risultati ottenuti da diverse indagini svolte da enti di ricerca statunitensi ed europei. Negli atti de “*The Delphi study - Visionary Manufacturing Challenges for 2020*”, svolto da membri appartenenti al National Research Council degli U.S.A., si constata l’assoluta esigenza, per garantire la competitività e la sostenibilità della produzione americana, di ricorrere a processi produttivi, macchine e sistemi di produzione che siano rapidamente adattabili alle esigenze imposte dal mercato. Un sistema di produzione riconfigurabile consente, nel perseguire tali scopi, consistenti economie in termini di investimento iniziale e costi di esercizio (National Research Council of the U.S.A., 2000). Caratteristiche analoghe vengono prospettate per le aziende europee in uno studio promosso dalla Commissione Europea: “*The Future of Manufacturing in Europe 2015-2020. The challenge for Sustainability*” (European Commission, 2003). Le tematiche sono inoltre oggetto di una commissione permanente presso la *Network of Excellence for Innovative Production Machines and Systems (I*PROMS)*, fondata nell’ambito del *Sesto Programma Quadro* per la ricerca e lo sviluppo tecnologico promosso dall’Unione Europea.

2.2.1 Caratteristiche chiave di un RMS

Dall'analisi della letteratura è possibile individuare alcune caratteristiche chiave di cui un sistema deve essere dotato per poter essere inserito a pieno titolo nella classe dei RMS¹⁶ (Koren, 2003):

- *Modularità* - Nei sistemi riconfigurabili tutti i componenti sono modulari (elementi strutturali, produttivi nonché organizzativi) e, all'occorrenza, tali componenti possono essere sostituiti o integrati per implementare nuove applicazioni. I moduli sono facilmente manutenibili e sostituibili ma è necessario effettuare un'attenta selezione per puntare a economie di scopo e massimizzare i coefficienti di integrazione;
- *Integrabilità* - Macchine e moduli di controllo sono progettati per ottenere l'integrazione dei vari componenti tramite opportune interfacce. Le performance del sistema integrato sono riconducibili alle performance dei suoi componenti e delle interfacce;
- *Customizzazione* - È la caratteristica che più distingue i sistemi riconfigurabili rispetto a quelli tradizionali. Implica la progettazione del sistema non intorno ad una specifica parte, bensì intorno ad una *famiglia di parti* definita come: "...un insieme di parti che hanno geometria simile, stesso livello di tolleranze, richiedono gli stessi processi e sono processabili a costi simili..." (Koren, 2003). Si particolarizza per due aspetti essenziali: *flessibilità customizzata* e *controllo customizzato*. Della flessibilità customizzata, o focalizzata, si è già detto in precedenza mentre il controllo customizzato è ottenuto attraverso l'integrazione di software ad architettura aperta¹⁷ che provvedono a realizzare funzioni di controllo specifiche, solo quando necessario.

¹⁶ Per una trattazione alternativa delle tematiche si consulti (Wiendahl, 2005a).

¹⁷ Il concetto di *architettura open source* consiste nello sviluppo di framework informatici di base che possano essere rapidamente adattati alle esigenze delle aziende che vi ricorrono. Questo permette di integrare nel software know-how specifico e di sviluppare soluzioni differenziate rispetto ai concorrenti mantenendo le caratteristiche di standardizzazione di base e garantendo la necessaria riservatezza dei dati e delle informazioni.

- *Convertibilità* - Si parla di convertibilità a diversi livelli del sistema. A livello macchina il concetto è relativo al passaggio dalla produzione di una parte ad un'altra o all'aggiunta di nuove funzionalità alle macchine; per quel che concerne la linea produttiva si fa riferimento ad un suo riadattamento o all'aggiunta di macchine per aumentarne le funzionalità; infine, in termini strutturali, si fa riferimento alle attività di plant-relayout del sistema.
- *Scalabilità* - È una caratteristica analoga alla convertibilità e può esplicarsi nell'aggiunta di mandrini alla macchina per aumentarne la produttività e nell'aggiunta di macchine per aumentare la capacità della linea.
- *Diagnosticabilità* - È riconducibile a due aspetti:
 - a) riconoscimento di guasti e/o anomalie nel funzionamento delle macchine o di parti del sistema;
 - b) identificazione delle cause di mancata qualità nella produzione.

A tal proposito esistono metodi di misura sistematici che, congiuntamente ad ispezioni delle parti on-line, aiutano ad individuare tempestivamente la causa del problema e ad eliminarla, favorendo una riduzione dei *tempi di ramp-up* (Matta, et al., 2007).

Le caratteristiche citate sono direttamente relazionabili agli obiettivi di reattività, incremento della produttività e riduzione dei costi sostenuti nell'intero ciclo di vita dell'impianto, così come evincibile dalla Figura 2.4 e dalla Tabella 2-1. Modularità, integrabilità, convertibilità e diagnosticabilità concorrono alla riduzione dei tempi e degli sforzi di riconfigurazione aumentando, quindi, la reattività del sistema; ad eccezione della modularità, le altre cinque caratteristiche contribuiscono a ridurre i costi di esercizio nel ciclo di vita.

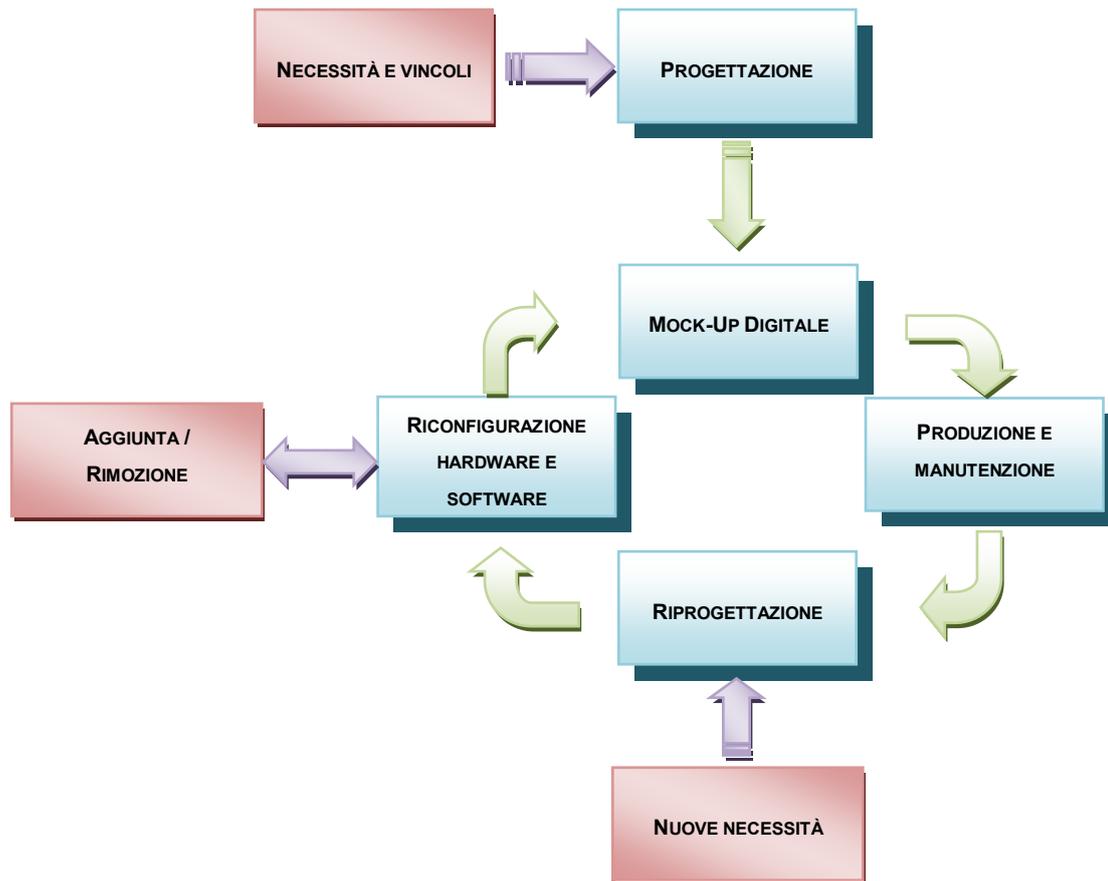


Figura 2.4 – Ciclo di vita di un moderno sistema produttivo¹⁸

Tabella 2-1 - Caratteristiche chiave ed influenze in un RMS (Koren, 2003)

	TEMPO DI RICONFIGURAZIONE	PRODUTTIVITÀ	COSTI SOSTENUTI NEL CICLO DI VITA DELL'IMPIANTO
MODULARITÀ	▲		
INTEGRABILITÀ	▲		▲
CUSTOMIZZAZIONE		▲	▲
SCALABILITÀ		▲	▲
CONVERTIBILITÀ	▲	▲	▲
DIAGNOSTICABILITÀ	▲	▲	▲

¹⁸ Liberamente adattato da (Kol, et al., 2005).

Nel complesso, le caratteristiche descritte favoriscono la *riadoperabilità* dell'intero sistema produttivo¹⁹, ampliandone il ciclo di vita e consentono, ad esempio, una valutazione analitica del *grado di riconfigurabilità* di una macchina o sistema produttivo (Urbani, et al., 2006).

Sempre con riferimento alle caratteristiche di cui sopra è possibile individuare due condizioni sufficienti affinché un sistema possa essere considerato un RMS (Koren, 2003):

- un sistema che possiede le caratteristiche di customizzazione e scalabilità è un RMS;
- un sistema che possiede le caratteristiche di customizzazione e convertibilità è un RMS.

La presenza di hardware e software riconfigurabili è invece condizione necessaria ma non sufficiente per classificare un sistema produttivo fra i RMS. Per quanto riguarda la modularità, differentemente da quanto si possa credere, non rappresenta né condizione necessaria né tantomeno condizione sufficiente ai fini della classificazione, giacché sebbene sia elevata la probabilità che strutture modulari possano consentire una variazione della capacità produttiva e delle funzionalità offerte, è impossibile assicurare tali risultati indipendentemente dalle condizioni operative.

La corretta progettazione di un RMS e, di conseguenza, la sua capacità di generare profitto presuppongono, dunque, il soddisfacimento dei seguenti principi:

- un RMS deve essere in grado di rispondere alle impellenti necessità del mercato. La capacità del sistema deve poter essere rapidamente aumentata/diminuita, con incrementi/decrementi sufficientemente piccoli e la funzionalità devono poter essere rapidamente adattabili alla produzione di nuovi prodotti;

¹⁹ Intesa come capacità di adattamento delle strutture esistenti alle nuove necessità generate dal susseguirsi delle generazioni di prodotto. Per un approfondimento su tali tematiche si consulti (Urbani, et al., 2006).

- un RMS è progettato attorno a famiglie di prodotti, il che assicura il conseguimento di specifiche forme di *flessibilità personalizzata*, al fine di minimizzare l'investimento iniziale e garantire tassi di utilizzo del sistema elevati (90-95%);
- per migliorare la reattività del sistema produttivo, le caratteristiche chiave di un RMS dovrebbero essere estese ai fabbricati e a tutti i componenti meccanici e di controllo adoperati. Questo, fra l'altro, consente di far fronte anche a improvvisi fermi delle apparecchiature adoperate;
- in generale, sistemi che presentano un numero sufficientemente elevato di alternative per la produzione di una singola parte, hanno un grado di riconfigurabilità maggiore ma, per contro, preludono a costi di investimento e di movimentazione dei materiali più elevati;

I primi tre punti caratterizzano un RMS, gli altri rappresentano principi secondari di evidente ausilio nella progettazione di un RMS efficace ed efficiente.

2.3 Fattori abilitanti

La progettazione, la gestione e il controllo di un RMS sono possibili grazie alla corretta implementazione di “fattori abilitanti” di tipo fisico e di tipo logico (Figura 2.5), in grado di influenzare la struttura aziendale a differenti livelli (Figura 2.6). I primi rendono tecnologicamente possibile la configurazione e la successiva riconfigurazione delle macchine utensili, dei sistemi di trasporto e dei robot adoperati a vario titolo nel sistema produttivo, nonché la loro redistribuzione all'interno dei reparti e il riposizionamento dei reparti stessi all'interno dei fabbricati. I fattori di tipo logico, invece, presiedono allo sviluppo dei modelli dinamici destinati al controllo dei processi di riconfigurazione, di pianificazione e controllo della produzione, della pianificazione della capacità necessaria e della circolazione delle informazioni all'interno del sistema.

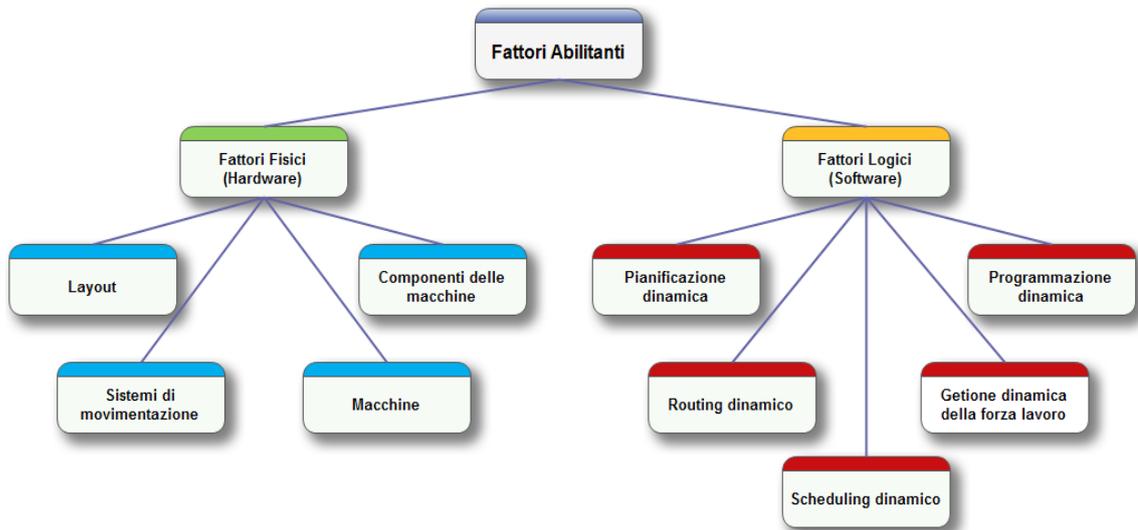


Figura 2.5 – Fattori in grado di abilitare i processi di riconfigurazione²⁰.

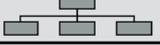
Classification Structuring Level	Means 	Organization 	Space 
Site (Location, Master Plan)	• Provision of Media & Energy - Centers	• Organizational Structure	• Real Estate • Building Development • Outside Facilities
Segment (Building)	• Provision of Media & Energy - Distribution • Information Technology	• Production Concept • Logistics Concept • Structure	• Factory Layout • Structural shape • Girder • Shell • Appearance
System / Cell (Working Area)	• Storage Means • Transportation Means	• Operational Structure	• Finishing
Station (Working Place)	• Production Technology • Production Equipment • Other Means	• Quality Assurance Concept	• Workplace Design

Figura 2.6 – Influenza dei fattori abilitanti per differenti livelli della struttura aziendale (Wiendahl, et al., 2005b)

2.3.1 Fattori fisici

Il ricorso a principi di modularità ha consentito, nel corso degli anni, lo sviluppo di macchine utensili e robot in grado di processare differenti varianti di una specifica parte/componente, senza dover per questo ricorrere a sistemi di

²⁰ Liberamente adattato da (ElMaraghy, et al., 2005b).

lavorazione e movimentazione più complessi. Progettare una macchina o un sistema produttivo con caratteristiche modulari, tuttavia, non è da solo sufficiente a garantire la rapida adattabilità del processo produttivo, soprattutto in termini di funzionalità richieste al sistema.

Una macchina riconfigurabile è sostanzialmente costituita da giunti motorizzati (*moduli attivi*) e moduli complementari con funzioni di supporto (*moduli passivi*), che possano essere aggiunti, rimossi o scambiati in tempi estremamente rapidi (nell'ordine delle decine di secondi) e sui quali sia possibile esercitare forme di controllo in remoto per scopi di inizializzazione, individuazione e caricamento del programma di lavoro, calibrazione in real-time dei mandrini²¹ (Figura 2.7).

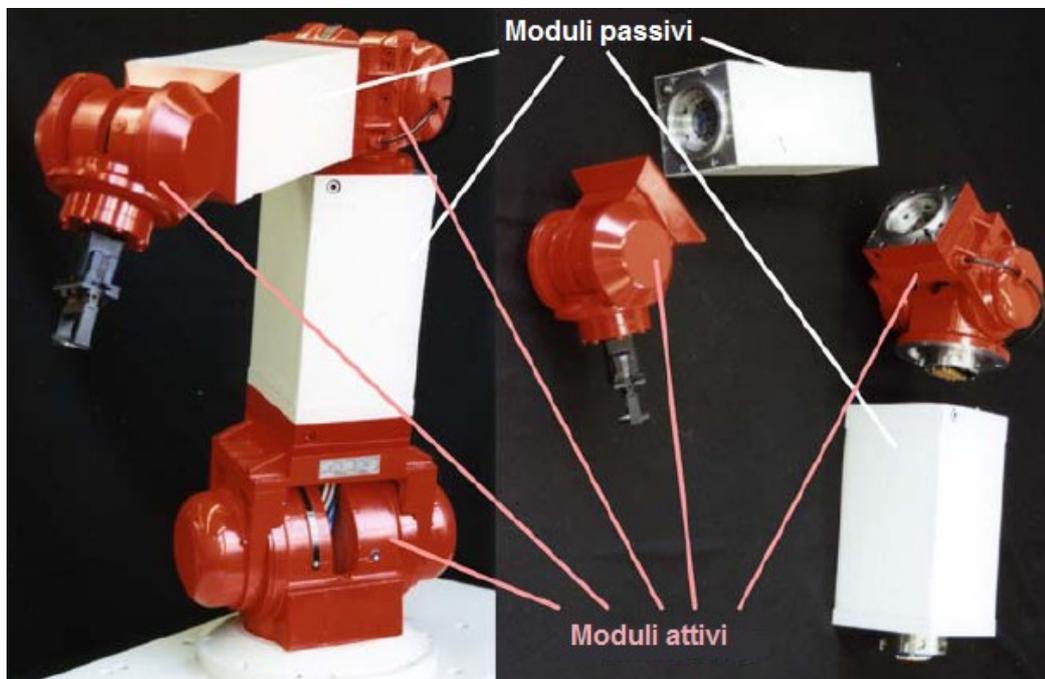


Figura 2.7 – Composizione modulare di un braccio adoperato per macchine utensili riconfigurabili. (Pritschow, et al., 2006)

La progettazione di interfacce meccaniche e di sistemi di presa standardizzate (Giusti, et al., 1991; Shen, et al., 2003), il ricorso a giunti flessibili in grado di variare la traiettoria percorsa e regolare le forze agenti sulla parte manipolata a

²¹ Per una trattazione analitica delle problematiche relative alla progettazione di macchine riconfigurabili si consulti (Moon, 2006).

seconda del condizioni in cui è necessario operare (Villani, et al., 1999; Featherstone, 2003), l'utilizzo di reti Ethernet flessibili per lo smistamento delle informazioni fra i vari componenti ed un sistema centrale di controllo, rende possibile:

- la rapida riconfigurazione della singola macchina (Figura 2.8);
- la riorganizzazione delle macchine in sistemi in grado di garantire differenti sequenze di lavorazione e ampi margini in termini di capacità disponibile (Figura 2.9).

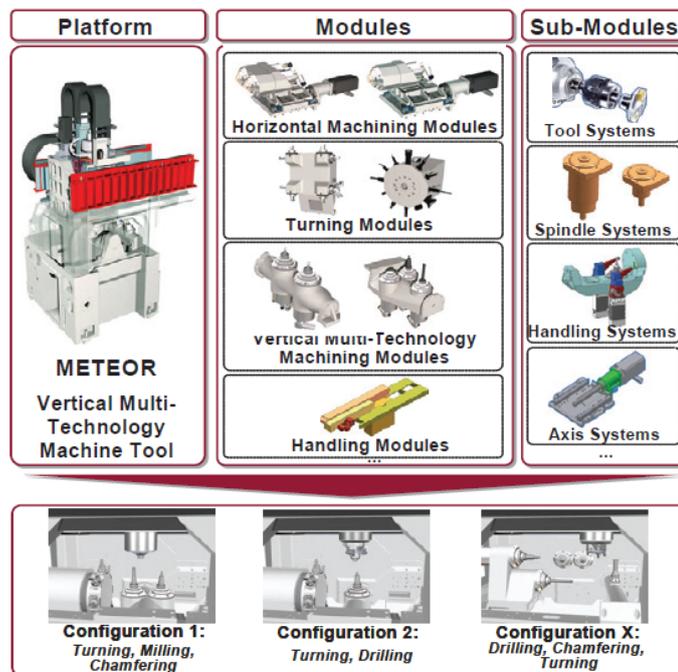


Figura 2.8 – METEOR, prototipo di macchina modulare riconfigurabile (Abele, et al., 2005)

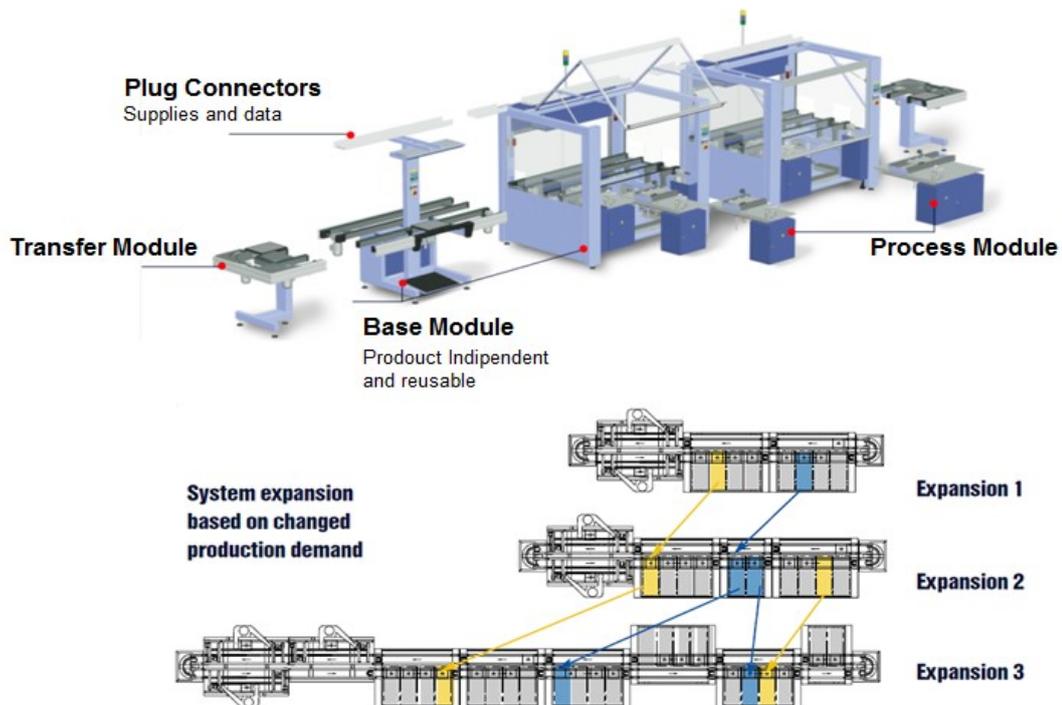


Figura 2.9 – Sistema produttivo modulare TEAMOS 2 e soluzioni per la scalabilità della capacità²²

L'integrazione delle caratteristiche di modularità in ambiente *CIM*²³, consente l'adozione di forme e tecnologie per la movimentazione dei materiali rapidamente adattabili (Figura 2.10):

- tanto nei sistemi specificatamente destinati all'assemblaggio, quanto in sistemi votati alla produzione vera e propria (Ho, et al., 1995; Ho, et al., 2000);
- sia in caso di riconfigurazioni del sistema pianificate, sia in caso si verificano condizioni eccezionali di funzionamento (malfunzionamenti, reindirizzamento dei flussi temporaneo/parziale, ecc...).

²² Disponibile all'indirizzo: <http://www.teamtechnik.com>

²³ *CIM - Computer Integrated Manufacturing.*

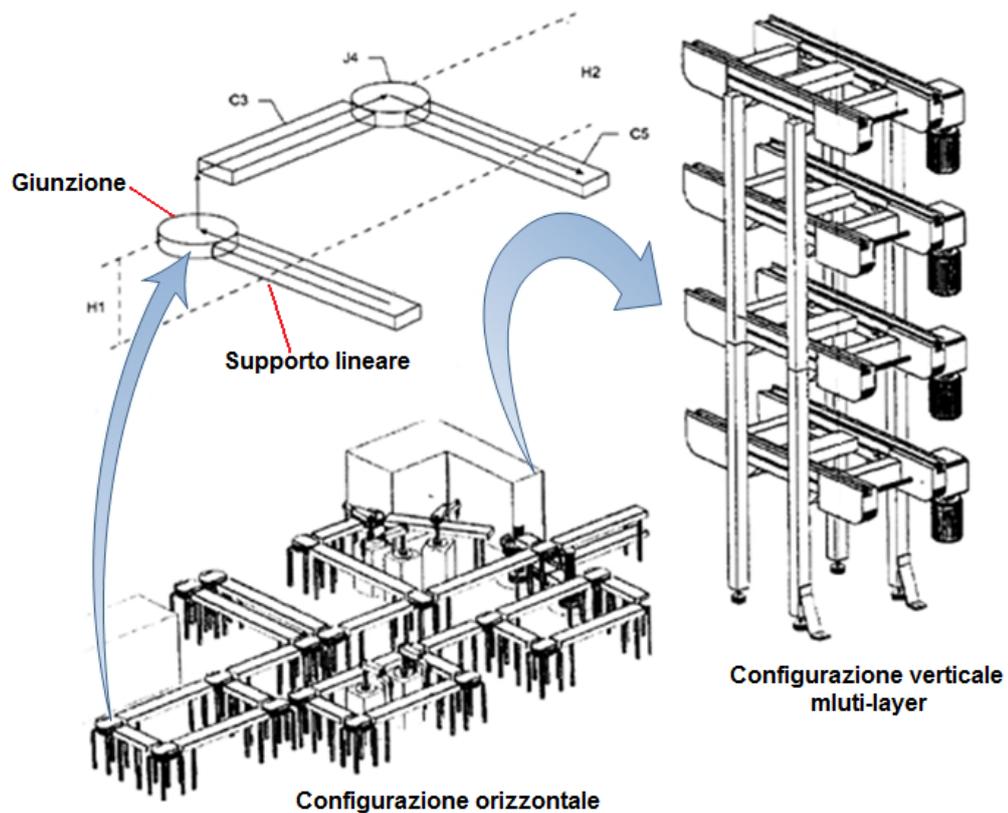


Figura 2.10 – *Trasportatore riconfigurabile* (Ho, et al., 1995)

Soluzioni centralizzate²⁴ che consentano il controllo della distribuzione dell'energia elettrica e dell'aria compressa²⁵, non si dimostrano adottabili per i sistemi idraulici. Qualora fossero previsti, la soluzione più efficace si rivela quella di integrarli a bordo macchina (Figura 2.11).

Il ricorso a strutture mobili per la delimitazione degli spazi simili a quelle adottate nella progettazione delle navi da crociera e l'applicazione dei principi di *pianificazione sinergica degli spazi* (Nyhuis, et al., 2005), favoriscono la ridistribuzione dei reparti in concomitanza di una riconfigurazione delle linee produttive e la disponibilità dei servizi generali d'impianto nel tempo (Figura 2.12). Se questo da una parte garantisce i requisiti di adattabilità del fabbricato industriale, dall'altra pone problematiche in termini di resistenza

²⁴ Rese possibili dalla rapida diffusione delle nanotecnologie nel campo della produzione delle macchine utensili.

²⁵ Alle quali sia relativamente semplice accedere indipendentemente dalla posizione della macchina nel sistema e del sistema nel fabbricato, o che siano rapidamente riposizionabili.

strutturale e incremento degli investimenti per la sua progettazione e realizzazione (Abele, et al., 2005).

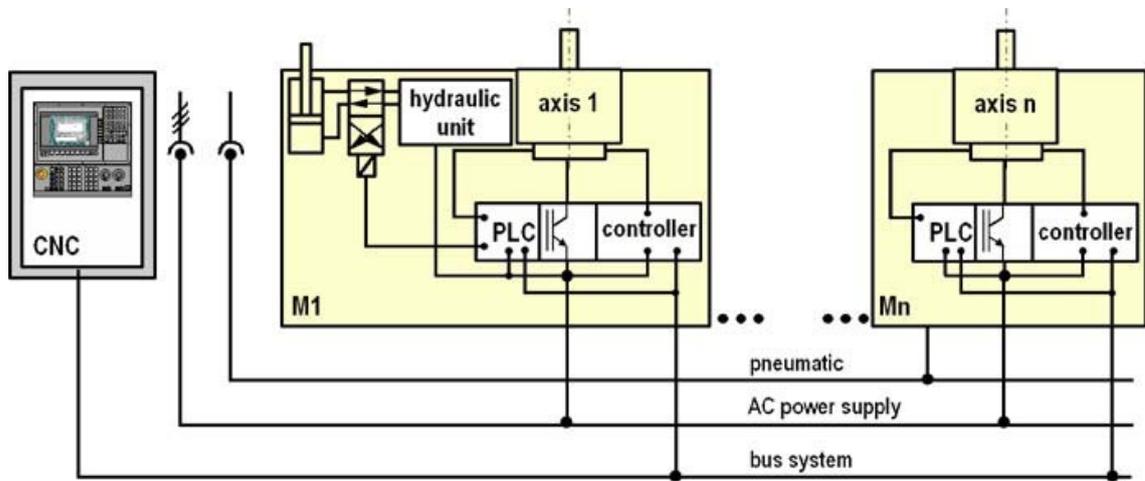


Figura 2.11 – *Schema di allacciamento di macchine riconfigurabili al sistema di distribuzione dell'energia elettrica, aria compressa e scambio dati (Pritschow, et al., 2006)*



Figura 2.12 – *Layout e struttura di uno stabilimento riconfigurabile (Modine Montage Ltd, Wackersdorf, Germania)*

Per quel che concerne quest'ultimo punto, anticipando quanto sarà detto nei capitoli successivi, è bene sottolineare che al variare del grado di riconfigurabilità del sistema variano:

- i costi totali sostenuti;
- l'entità delle singole aliquote di costo sostenute;

il che rende critiche le attività di pianificazione dell'espansioni future, pianificazione degli spazi nel processo di riconfigurazione e di analisi dei possibili profili di riconfigurabilità (Figura 2.14).

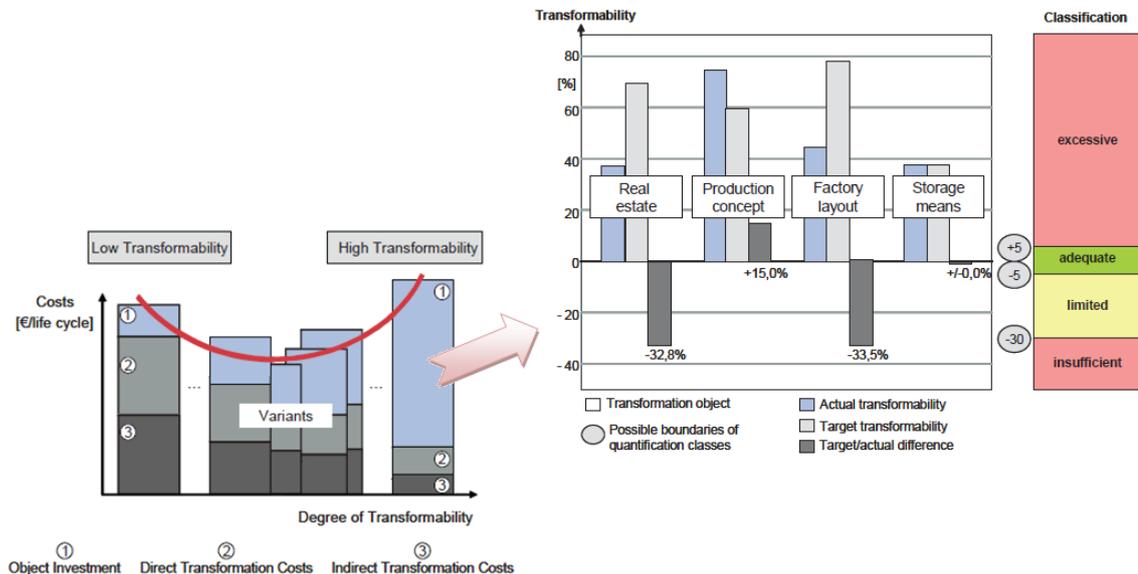


Figura 2.13 – Variazione delle aliquote di costo sostenute al crescere del grado di riconfigurabilità di un impianto e analisi dei profili di riconfigurabilità²⁶

Il ricorso alla componentistica modulare, tuttavia, pone anche di fronte a difficoltà concernenti la diminuzione del *tempo di ramp-up* del sistema, ossia del tempo necessario affinché la produzione si riallinei, in seguito ad un processo di riconfigurazione, agli standard qualitativi richiesti il più rapidamente possibile (Koren, et al., 1999). Le cause del deterioramento delle performance del sistema sono principalmente rintracciabili nelle operazioni di accoppiamento/disaccoppiamento dei moduli che costituiscono le macchine e, successivamente, in quelle accoppiamento/disaccoppiamento relative alle macchine stesse. Per quel che concerne le singole macchine, il processo di misura e compensazione presentato in Figura 2.14 presuppone la scelta e il posizionamento dei moduli sensori (Segall, et al., 2000), l'integrazione dei

²⁶ Liberamente adattata da (Nyhuis, et al., 2006) e (Nyhuis, et al., 2007).

sistemi di diagnostica a livello dei componenti (Barhak, et al., 2005), il ricorso ad un sistema centralizzato di elaborazione dei dati per la calibrazione iniziale della macchina e la compensazione continua in fase di lavorazione (Djurdjanovic, et al., 2003).

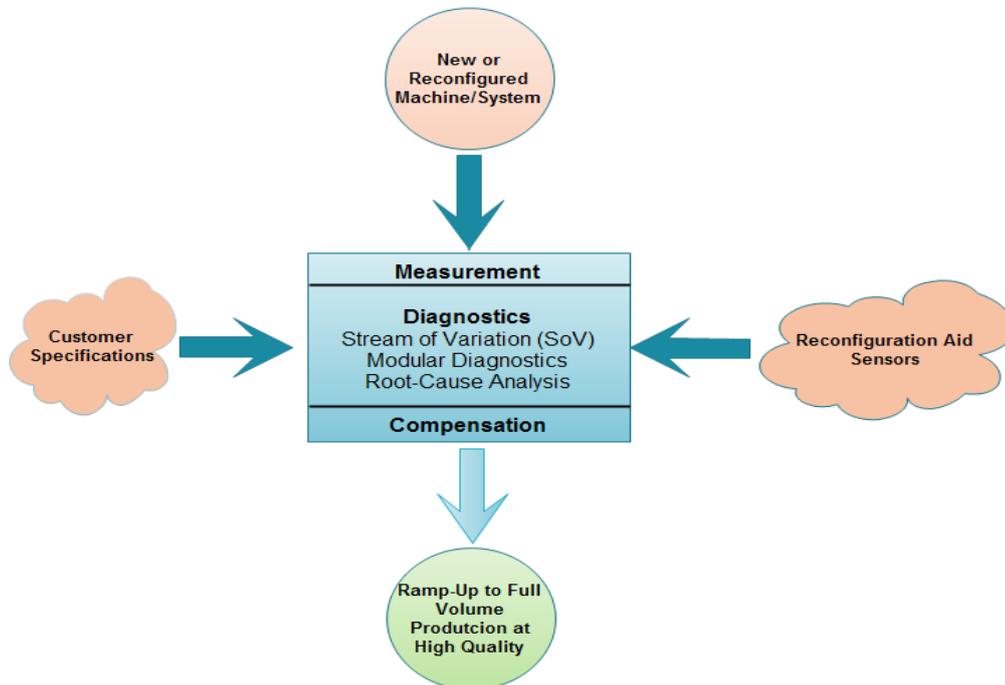


Figura 2.14 – Procedura di misura e compensazione per l'abbattimento dei tempi di ramp-up in un RMS (Koren, et al., 1999)

A causa dell'accresciuta complessità di una macchina riconfigurabile, non è possibile far ricorso a tecnologie di controllo tradizionali per la determinazione delle tolleranze (*interferometri al laser*). Si rende infatti necessaria l'integrazione di sistemi meccanici, ottici e ultrasonici che siano in grado di effettuare misurazioni nelle tre dimensioni e di favorire il controllo in tempo reale del sistema²⁷ (Spath, et al., 1999). Tali soluzioni tecnologiche, sono, fra l'altro, in grado di risolvere anche:

- gli inevitabili problemi di interferenza e compensazione nel caso di lavorazione multi-mandrino (Moon, 2006; Ahn, et al., 2006);

²⁷ Si consultino, a tal proposito, i dettagli del progetto HÜMNOS disponibili all'indirizzo http://www.osaca.org/related_projects/

- i problemi di adattamento delle forme di controllo esercitabili al variare del cinematismo del sistema (Landers, et al., 2001; Moon, et al., 2002).

Se la standardizzazione delle interfacce meccaniche consente l'accoppiamento di differenti moduli e le svariare forme di collegamento fra le macchine, il ricorso ad *architetture modulari aperte* assicura l'adattamento dei sistemi di controllo alla specifica configurazione della macchina o del sistema. In questo caso, il grado di adattabilità necessario è garantito (Pritschow, et al., 2003):

- dall'incapsulamento del software di controllo in componenti in grado di operare il più indipendentemente possibile;
- dalla focalizzazione sui parametri di controllo corrispondenti alla configurazione fisica assunta dalla macchina;
- dall'intercambiabilità dei moduli adoperati in funzione della configurazione fisica assunta della macchina;
- dalla possibilità di variare dinamicamente il numero e il tipo di applicazioni software in esecuzione.

Tali caratteristiche spingono verso sistemi del tipo “plug and produce”, in cui le forme di controllo adottate individuano le “periferiche” di volta in volta adoperate, le inizializzano²⁸ e attivano i corrispondenti moduli software che consentono di interagirvi.

Esempi di architetture di questo tipo sono l'OMAC²⁹ (*Open Modular Architecture Controls*) e quella OSACA (*Open System Architecture for Controls within Automation*)³⁰, in cui il sistema di controllo, facendo ricorso a paradigmi del tipo “object-oriented”, è inizializzato tramite un comune file di testo. L'introduzione di una piattaforma basata su API (*Application Programming*

²⁸ Il riconoscimento e l'inizializzazione della periferica avviene, in analogia a quanto si verifica nel caso dei personal computer, installando a bordo dei moduli meccatronici delle ROM (Read Only Memory) contenenti i “dati di targa” necessari allo scopo.

²⁹ Si consulti <http://www.omac.org> e (Iwata, et al., 2003).

³⁰ Si consulti: “*Specifications for the industrial implementation of OSACA*”, disponibile all'indirizzo <http://www.osaca.org/pdf/specifications/>

Interface) specificatamente progettate, non lede le caratteristiche di riadoperabilità e standardizzazione grazie alla presenza di un *middle-ware* universale in grado di garantire lo scambio dei dati fra specifici moduli applicativi (Figura 2.15). L'accoppiamento di tali piattaforme ad un sistema di controllo di tipo distribuito non avviene attraverso le classiche forme TCP/IP a causa dell'impossibilità, in diverse situazioni, di poter agire in *real-time* sul sistema ma, piuttosto, attraverso specifiche reti così come proposto nel progetto OCEAN (*Open Controller Enabled by an Advanced Real-Time Network*) in cui si ricorre al CORBA (*Common Object Request Broker Architecture*) per la definizione del linguaggio fra le interfacce di base (Pritschow, et al., 2004; Schmidt, et al., 2000).

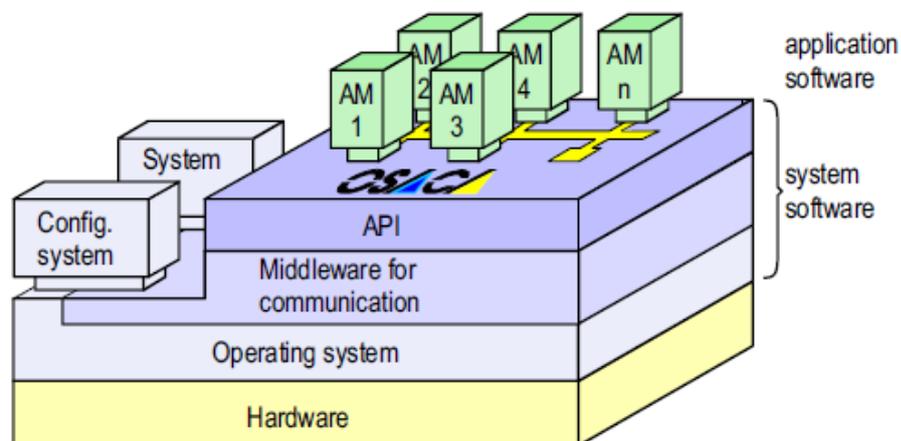


Figura 2.15 – Piattaforma OSACA per sistemi riconfigurabili di produzione (Pritschow, et al., 2006)

L'operatività del sistema di controllo³¹ è garantita dal ricorso a tool di configurazione (Landers, et al., 2001). Nella fase di progettazione della macchina, il tool di configurazione³² viene adoperato per riconfigurare il software del sistema di controllo, al variare della configurazione assunta dalla macchina (Figura 2.16). Quest'ultima viene generata da un ulteriore software in grado di gestire gli eventi discreti e dinamici che definiscono lo stato dei

³¹ Per un esempio di progettazione del sistema di controllo a valle dell'identificazione dei cinematismi della macchina riconfigurabile, si consulti (Djuric, et al., 2007).

³² Dotato, in genere, di un'interfaccia di tipo grafico.

componenti elettromeccanici del sistema e le caratteristiche del processo produttivo, così da consentire il debug del sistema di controllo senza dover intervenire fisicamente sulla macchina (Min, et al., 2002).

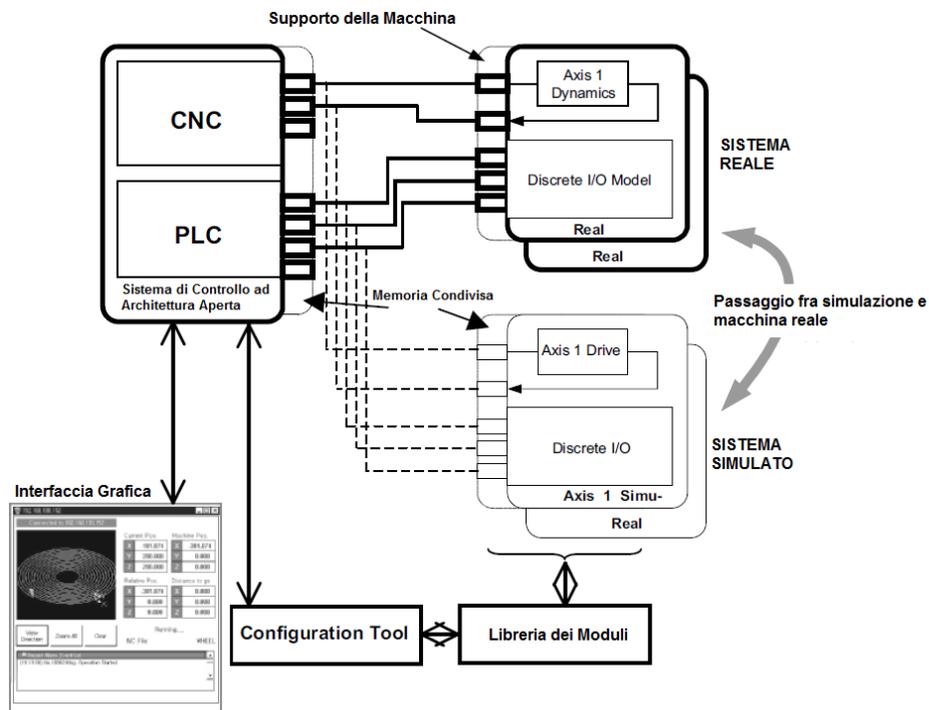


Figura 2.16 – Configurazione del sistema deputato al controllo di una macchina riconfigurabile (Landers, et al., 2001)

2.3.2 Fattori logici

Le caratteristiche di riconfigurabilità fisica presentate preludono, per evidenti motivi di carattere funzionale ed economico, ad un proporzionale incremento dell'adattabilità delle attività di pianificazione dei processi e, più in generale, di quelle deputate alla pianificazione e al controllo dell'intero sistema produttivo.

In sistemi come quelli considerati, progettati cioè intorno a specifiche famiglie di prodotti, sarà necessario adattare le attività di pianificazione dei processi alla dinamica dettata dall'evoluzione generazionale delle famiglie da realizzare. A tal proposito, le tecniche tradizionali, indipendentemente dal fatto che prevedano una *prepianificazione* dei processi o una loro *riplanificazione*, si

sono rivelate alquanto inefficienti³³, delineando la necessità di ricorrere a *Piani di Processo Riconfigurabili* (ElMaraghy, 2006).

In letteratura è possibile rintracciare diversi contributi tesi ad individuare modelli e/o algoritmi che, al variare della granularità del problema e del grado di automazione (Figura 2.17), forniscono risposte alle esigenze di cui si è detto e dall'analisi dei quali è possibile estrapolare alcune considerazioni di carattere generale (Xu, et al., 2004; Shabaka, et al., 2006; Azab, et al., 2007b; Song, et al., 2007; Tseng, et al., 2007):

- al crescere della frequenza alla quale si rendono necessarie successive riconfigurazioni del sistema, gli *approcci di tipo semi-generativo* si rivelano più efficienti tanto dal punto di vista economico, quanto da quello temporale;
- si rende necessaria la definizione di indici che consentano di discriminare fra i piani generati in modo automatizzato, al fine di minimizzare le variazioni da introdurre nei piani attualmente esistenti e poter così programmare la schedulazione delle attività future.

In effetti, in questo modo, è possibile intervenire in modo selettivo sui piani di processo attualmente adoperati, aggiungendo (rimuovendo) operazioni precedentemente non previste (previste).

Se l'eliminazione di alcune operazioni/fasi dai piani non comporta complicazioni di sorta, coerentemente con quanto verrà detto a proposito della generazione ed evoluzione delle famiglie di parti, l'introduzione di nuove operazioni/fasi può essere intesa come una "mutazione" del codice rappresentativo di ogni singolo piano di processo (Figura 2.18). L'aggiunta di

³³ Nel caso si faccia ricorso ad una ripianificazione delle attività di processo, verrà generata una serie di piani alternativi, ciascuno utile nel caso si verifichino certe condizioni piuttosto che altre. Questo comporta evidenti sforzi di tipo economico e temporale per generare piani che, potenzialmente, potrebbero non essere mai adoperati. Nel caso ci si riferisca alla ripianificazione dei processi, ogniqualvolta se ne dovesse presentare la necessità, verrebbe generato un nuovo piano di processo indipendentemente da quello attualmente adoperato, il che potrebbe comportare costi considerevoli in termini di riattrezzaggio delle macchine e loro ridisposizione nei reparti.

stringhe³⁴ identificative delle operazioni/fasi supplementari, riconduce ad una semplice ottimizzazione di tipo iterativo e ricorsivo.

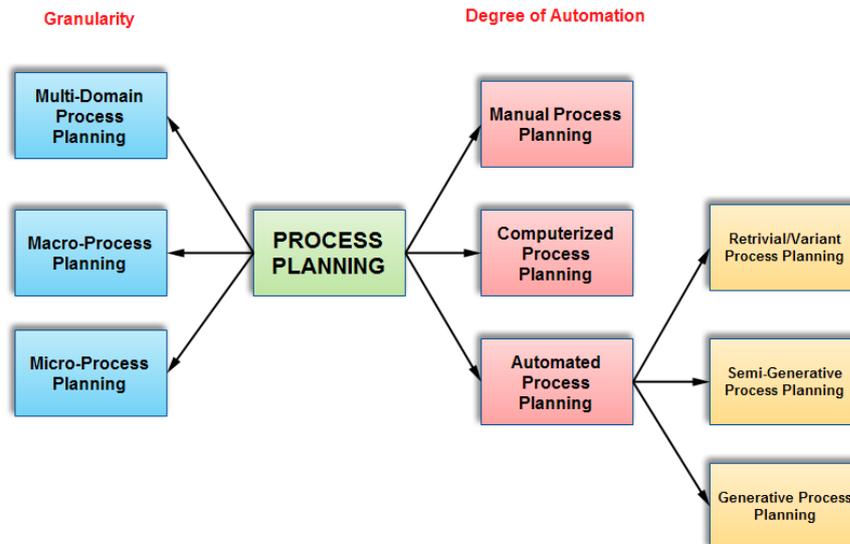


Figura 2.17 – Pianificazione dei processi produttivi: estensione delle aree di interesse e grado di automazione (ElMaraghy, 2006)

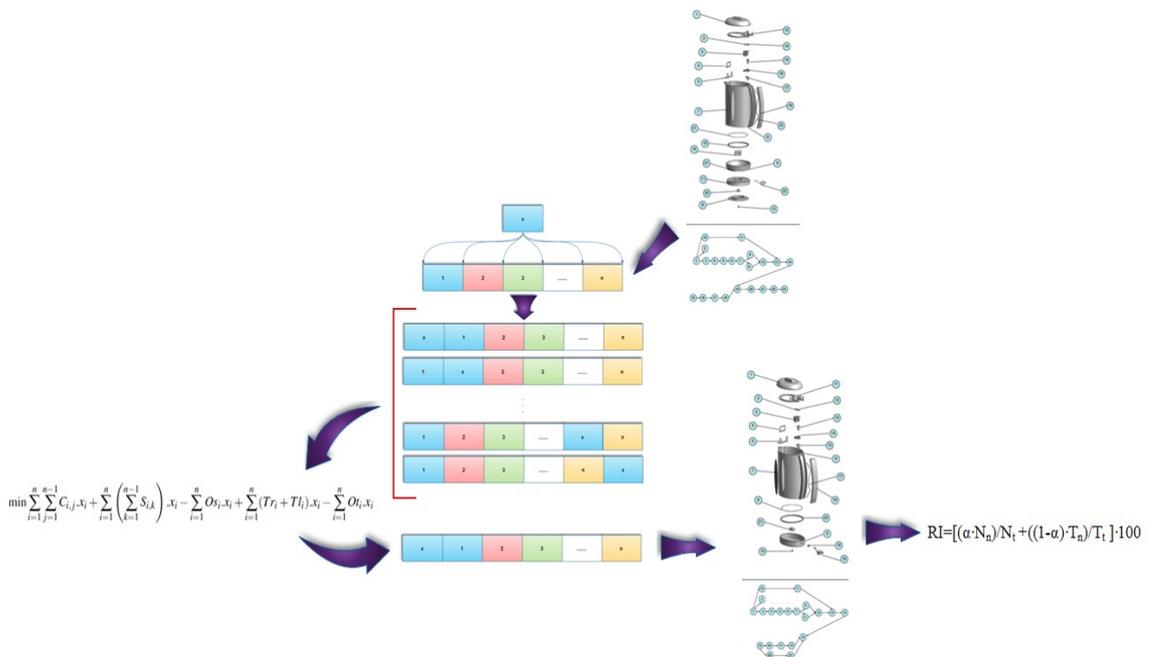


Figura 2.18 – Pianificazione dei processi produttivi: estensione delle aree di interesse e grado di automazione³⁵

³⁴ In generale si ricorre a codici binari.

³⁵ Liberamente adattata da (Azab, et al., 2007a).

La formulazione matematica del problema è rintracciabile, ad esempio, in (Azab, et al., 2007a) dove il confronto fra i diversi piani generati avviene, inizialmente, minimizzando una funzione di costo espressa in termini temporali. Grazie ad un indice rappresentativo dell'entità della riconfigurazione (*Plan Reconfiguration Index*) viene valutato, successivamente, lo sforzo necessario per l'implementazione del piano scelto³⁶.

In Figura 2.19 vengono riassunte le interazioni fra il sistema di pianificazione e controllo della produzione (PPC) e le funzioni aziendali coinvolte a diverso titolo nel processo produttivo.

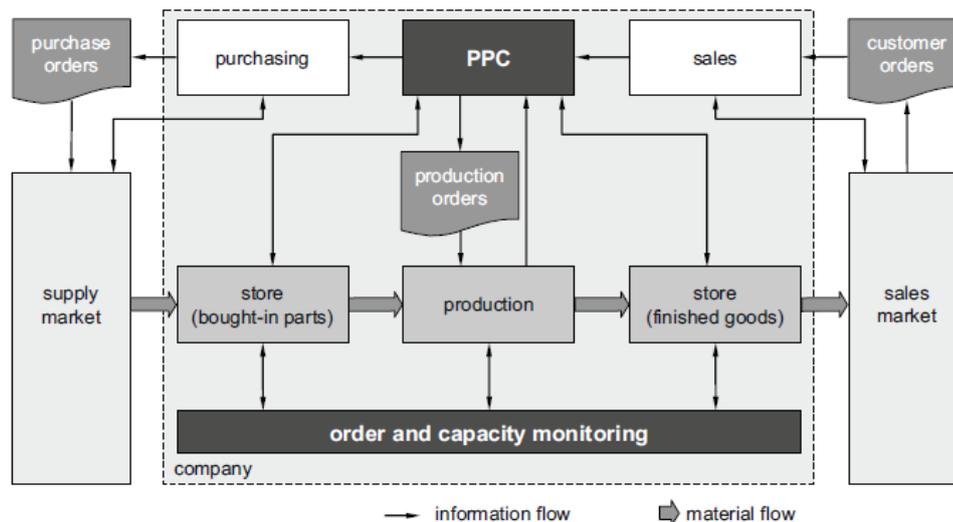


Figura 2.19 – Sistema di pianificazione e controllo della produzione industriale (Wiendahl, 1994)

³⁶ Tale valutazione si rende necessaria al fine di minimizzare l'impatto del nuovo piano generato a livello dei micro-processi che prevedono, sostanzialmente, fasi di fissaggio dei componenti e cambio utensile aggiunte o rimosse. L'espressione analitica dell'indice è del tipo $RI = \left(\frac{\alpha \cdot N_n}{N_t} + \frac{(1-\alpha) \cdot T_n}{T_t} \right) \cdot 100$ in cui:

- α è un coefficiente di proporzionalità che valuta la convenienza di ricorrere ad una variazione nel numero di riposizionamenti del componente da riposizionare rispetto al cambio utensile;
- N_n è il numero di riposizionamenti aggiunti e/o sottratti con l'introduzione del nuovo piano rispetto al piano precedente;
- N_t è il numero totale di volte in cui la parte in lavorazione viene riposizionata nel piano precedente;
- T_n è il numero di cambi utensile aggiunti e/o sottratti con l'introduzione del nuovo piano rispetto al piano precedente;
- T_t è il numero totale cambi utensile effettuati nel piano precedente.

Al crescere dell'indice, cresce proporzionalmente lo sforzo per introdurre nel sistema il nuovo piano di processo.

Il sistema presiede, come noto, alla verifica della corrispondenza fra produzione e richieste del mercato. Tale corrispondenza è, fra l'altro, fortemente influenzata dall'assetto logistico aziendale ed è per questo che la misura delle performance ottenute in tale settore risulta critica per la ricalibrazione del sistema (Wiendahl, et al., 2002). Quest'ultimo, per contro, è fortemente influenzato dalle dimensioni del mercato da servire e quindi delle modalità produttive (Figura 2.20).

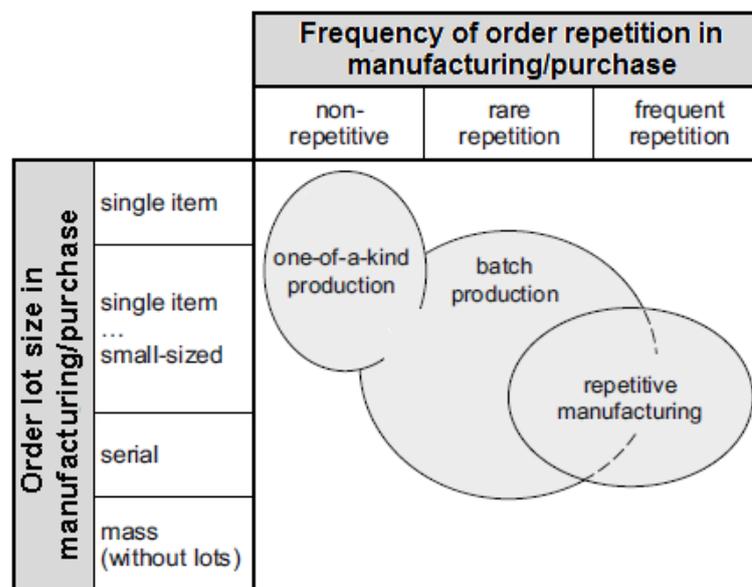


Figura 2.20 – Caratterizzazione della logistica aziendale al variare della frequenza e della dimensione degli ordini d'acquisto o di produzione (Schönsleben, 2007)

In presenza di condizioni di mercato poco stabili, è tuttavia improponibile intervenire a costi contenuti e in tempi rapidi sull'organizzazione aziendale; per tale motivo si rendono necessari strumenti che, se necessario, consentano modifiche del sistema PPC senza necessariamente sconvolgerne la struttura.

In particolare, osservando quanto rappresentato in Figura 2.20, la focalizzazione sulla sua logica di funzionamento consente di individuare diversi aspetti progettuali (Nyhuis, et al., 2008) sui quali agire per ottenere i cambiamenti desiderati a differenti livelli³⁷ (Wiendahl, 2005c):

³⁷ Interventi di ordine superiore, presuppongono interventi sui livelli direttamente sottostanti.

- *Strategico* - Relativo, ad esempio al cambio di strategia da *make to order* a *make to stock*. Questo genera, naturalmente, una variazione nelle politiche di previsione della domanda da adottare e la variazione di diversi parametri di performance cui far riferimento (affidabilità dello scheduling → controllo magazzini per evitare stock-out);
- *Configurazione di base* - Variazione della logica funzionale del sistema o del work flow. Si pensi, ad esempio ad una variazione nelle modalità di emissione degli ordini o nel metodo adottato per il dimensionamento del lotto di ordinazione/fabbricazione;
- *Parametri* - Comprendono variazioni delle sequenze di lavorazione, dei parametri adoperati nella progettazione dei prodotti, dei tempi di throughput per ordini e processi.

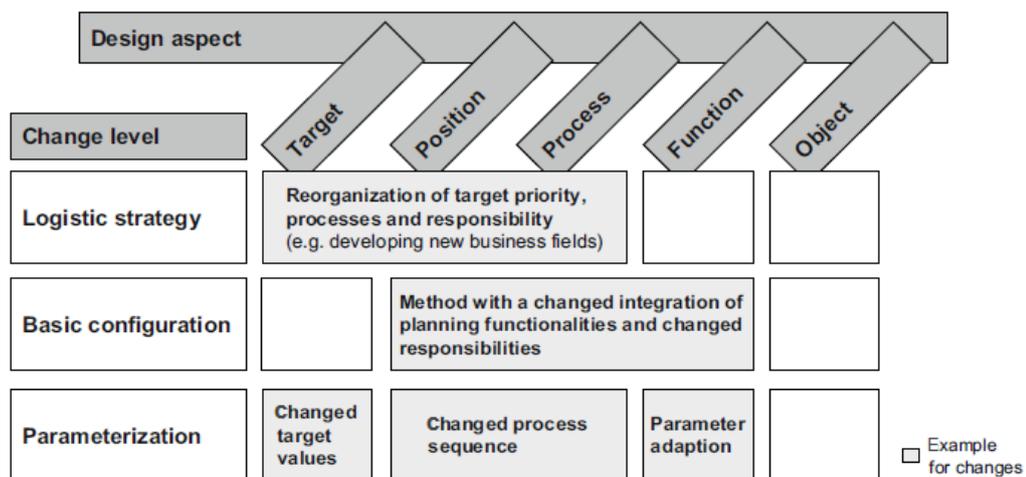


Figura 2.21 – Matrice di definizione degli aspetti progettuali in grado di influenzare l’adattabilità del sistema PPC (Wiendahl, 2005c)

In effetti, ciascuna delle principali funzionalità svolte dal sistema PPC è collegata ad obiettivi prefissati (i *target* di Figura 2.21) tramite *variabili manipolabili* e *variabili di controllo* (Lödding, 2005). Più nello specifico, è possibile distinguere fra (Figura 2.22):

- funzione di *generazione dell’ordine*, che determina gli input e gli output pianificati, nonché la sequenza pianificata degli ordini da processare;

- funzione di *rilascio dell'ordine*, che regola l'effettiva immissione dell'ordine all'interno del sistema produttivo;
- *controllo della capacità*, che determina la capacità disponibile nel sistema in termini temporali, la forza lavoro assegnata alle singole operazioni e influenza, quindi, il valore attuale dell'output generato;
- funzione di *sequencing*, che determina l'attuale sequenza di processamento degli ordini.

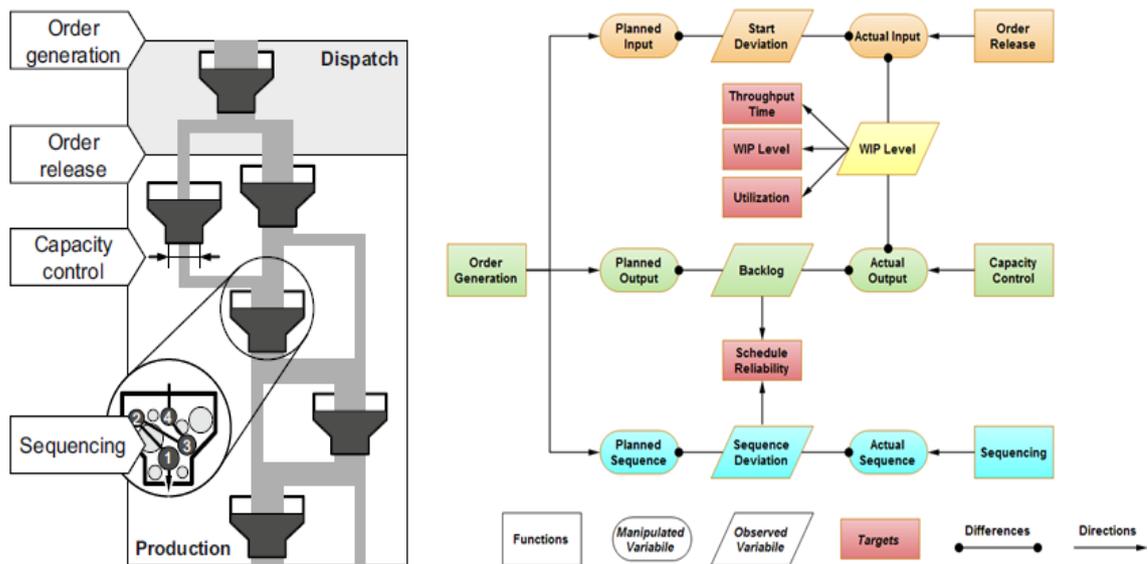


Figura 2.22 – Legami fra funzionalità del sistema PPC e variabili che consentono il controllo del sistema³⁸

Dalle discrepanze registrate nelle variabili di controllo, si potrà intervenire sulle variabili manipolabili per avvicinare i risultati conseguiti ai valori di target prefissati. Tenendo presente tale struttura ed estendendo al caso del sistema PPC le caratteristiche chiave di un RMS³⁹, si potrà:

³⁸ Liberamente adattata da (Lödding, 2005).

³⁹ In questo caso, ad esempio, la caratteristica *scalabilità* è intesa in termini di disponibilità di modelli funzionali e metodi applicabili a diversi livelli di dettaglio (pianificazione di massima – pianificazione operativa) mentre quella di *modularità* garantisce la possibilità di intervenire su uno specifico modello funzionale, o su una sua parte, senza per questo dover intervenire sugli altri modelli che, interagendo con quello considerato, definiscono il sistema PPC.

- intervenire sulla logica funzionale secondo la quale avviene il processamento degli ordini (metodi, modelli funzionali, metodologie per l'aggregazione dei dati);
- intervenire sul work-flow che caratterizza il processamento degli ordini (in termini strutturali e di organizzazione di processo);
- garantire l'interconnessione fra decisioni operative ed esecuzione delle attività, al fine di favorire il miglioramento continuo (Figura 2.23).

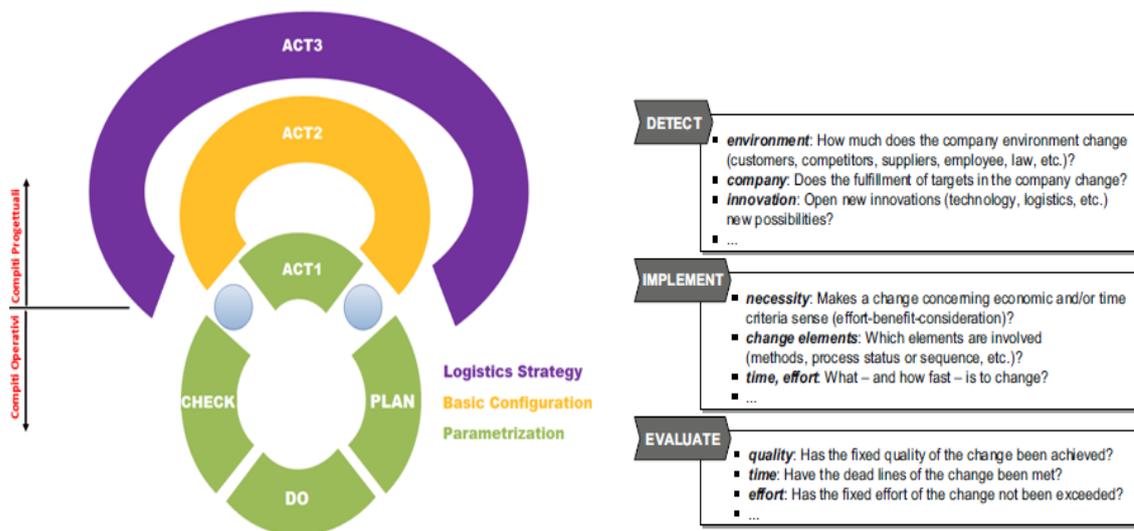


Figura 2.23 – Logica e fasi del processo di adattamento del sistema PPC (Wiendahl, 2006)

2.4 Bibliografia

- AA.VV., *The Future of Manufacturing in Europe 2015-2020. The challenge for Sustainability*. Rapporto della Commissione Europea, Cambridge, U.K., 2003.
- AA.VV., *The Delphi study - Visionary Manufacturing Challenges for 2020*. Rapporto del National Research Council of the U.S.A., National Academy Press, 2000.
- Abele E., Wörn A., Stroh C., *Multi Machining Technology Integration in RMS*. Proceedings of the 3rd CIRP International Conference on Reconfigurable Manufacturing, Ann Arbor, U.S.A., 2005.
- Ahn K.G., Min B.K., Pasek Z.J., *Modeling and compensation of geometric errors in simultaneous cutting using a multi-spindle machine tool*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 29 (9-10), 2006, pp. 929-939.

- Azab A. ElMaraghy H.A., *Mathematical Modeling for Reconfigurable Process Planning*. CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 5 (1), 2007a, pp. 467-472.
- Azab A. [et al.], *Semi-Generative Macro-Process Planning For Reconfigurable Manufacturing*. Digital Enterprise Technology, Vol. 3, 2007b, pp. 251-258.
- Barhak J., Djurdjanovic D., Spice P., *Integration of reconfigurable inspection with stream of variations methodology*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 45 (4-5), 2005, pp. 407-419.
- Chryssolouris G., *Manufacturing Systems: Theory and Practice*, 2nd Edition. Springer Verlag, Berlino, 2005.
- De Toni A., Tonchia S., *Manufacturing flexibility: a literature review*. International Journal of Production Research, Vol. 6 (36), 1998, pp. 1587-1617.
- Djurdjanovic D., Ni J., *Dimensional Errors of Fixtures, Locating and Measurement Datum Features in the Stream of Variation Modeling in Machining*. Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 125(4), 2003, pp. 716-730.
- Djuric A.M., ElMaraghy H.A., *A Unified Reconfigurable Robots Jacobian*. Proceeding of the 2nd International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production. Toronto, Canada, 2007.
- ElMaraghy H.A., *A Flexible and reconfigurable manufacturing systems paradigms*. International Journal of Flexible Manufacturing Systems, Vol. 17 (4), 2005a, pp. 261-276.
- ElMaraghy H.A., Kuzgunkaya O., Urbanic J., *Manufacturing system configurations complexity*. CIRP Annals, Vol. 54 (2), 2005b, pp. 445-450.
- ElMaraghy H.A., *A Reconfigurable Process Plans For Responsive Manufacturing Systems*. Proceedings of the 3rd International CIRP Conference on Digital Enterprise Technology. Setúbal, Portogallo, 2006.
- Eversheim W., Kettner P., Merz K.P., *Planning flexible system structures*. Assembly Automation, Vol. 6 (3), 1986, pp. 141-144.
- Featherstone R., *A dynamic model of contact between a robot and an environment with unknown dynamics*. In Jarvis R.A., *Robotics Research: The Tenth International Symposium*, Springer, Berlino, 2003.
- Fujii S., Morita H., Kakino Y., *Highly productive and reconfigurable manufacturing system*. Proceedings of the Pacific Conference on Manufacturing, Detroit, Michigan, U.S.A., 2000.
- Giusti F., Santochi M., Dini G., *Robotized assembly of modular fixtures*. Annals of the CIRP, Vol. 40 (1), 1991, pp. 17-20.
- Heisel U., Meitzner M., *Progress in Reconfigurable Manufacturing Systems*. In Dashchenko A.I., *Reconfigurable Manufacturing Systems and Transformable Factories*, Springer, Berlino, 2006, pp. 47-62

- Ho J.K., Ranky P.G., *An object-oriented and flexible material handling system*. Assembly Automation, Vol. 15 (3), 1995, pp. 15-20.
- Ho J.K., Ranky P.G., *A reconfigurable, flexible material handling system design based on an object oriented approach*. Proceedings of the 4th International Conference on Advanced Factory Automation - Factory 2000, York, U.K., 2000.
- Iwata T., Kurosawa K., *Stronger Security Bounds for OMAC, TMAC and XCBC*. Lecture Notes in Computer Science, Vol. 2904, 2003, pp. 133-158.
- Kol J., Hul J.S., Huang T., *Reusability Assessment for Manufacturing Systems*. CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 54 (1), 2005, pp. 113-116.
- Koren Y., Heisen U., Jovane F., *Reconfigurable Manufacturing Systems. A keynote paper*. Annals of the CIRP, Vol. 48 (2), 1999, pp. 527-540.
- Koren Y., *General RMS Characteristics. Comparison with Dedicated and Flexible Systems*. In Dashchenko A.I., *Reconfigurable Manufacturing Systems and Transformable Factories*. Springer, Berlino, 2006, pp. 28-45.
- Koste L.L., Malhotra M.K., *A Theoretical Framework for Analyzing the Dimensions of Manufacturing Flexibility*. Journal of Operations Management, Vol. 18 (1), 1999, pp. 75-93.
- Landers R., Min B.K., *Development of a Prototype Reconfigurable Machine Tool*. Proceedings of the 1st International Conference on Reconfigurable Manufacturing Systems. Ann Arbor, Michigan, U.S.A., 2001.
- Landers R., Min B.K., Koren Y., *Reconfigurable Machine Tools*. Annals of the CIRP, Vol. 50 (1), 2001, pp. 269-274.
- Lödging H., *Methods for production control*. Springer, Berlino, 2005.
- Matta A., Tomasella M., Valente A., *Impact of ramp-up on the optimal capacity-related reconfiguration policy*. International Journal of Flexible Manufacturing Systems, Vol. 19, 2007, pp. 173-194.
- Mehrabi M.G., Ulsoy A.G., Koren Y., *Reconfigurable manufacturing systems: key to future manufacturing*. Journal of Intelligent Manufacturing, Vol. 11 (4), 2000, pp. 403-419.
- Min B.K., Huang Z., Pasek Z., *Integration of Real-Time Control Simulation to a Virtual Manufacturing Environment*. International Journal of Agile Manufacturing. Vol. 1 (11), 2002, pp. 67-87.
- Moon Y., Kota S., *Generalized Kinematic Modeling Method for Reconfigurable Machine Tools*. ASME Journal of Mechanical Design, Vol. 124 (1), 2002, pp. 47-51.
- Moon Y., *Reconfigurable Machine Tool Design*. In Dashchenko A.I., *Reconfigurable Manufacturing Systems and Transformable Factories*. Springer, Berlino, 2006, pp. 112-139.

- Nyhuis P., Reichardt J., Elscher A., *Synergetic Factory Planning*. Proceedings of the 6th German Symposium Factory Planning, Factories for the Global Competition. Ludwigsburg, Germany, 2005.
- Nyhuis P., Kolakowski M., Heger C., *Evaluation of Factory Transformability - A Systematic Approach*. Annals of the German Academic Society for Production Engineering, Vol. 13 (1), 2006, pp. 147-152.
- Nyhuis P., Heger C., *Adequate and economic factory transformability and the effects on logistical performance*. International Journal of Flexible Manufacturing Systems, Vol. 19 (3), 2007, pp. 286-307.
- Nyhuis P., Wiendahl H.P., *Fundamentals of Production Logistics. Theory, Tools and Applications*. Springer, Berlino, 2008.
- Pritschow G., Bauer G., Kremer M., *Open Controller Enabled by an Advanced Real-Time Network*. Proceedings of the 2nd CIRP International Conference on Reconfigurable Manufacturing, Ann Arbor, Michigan, U.S.A., 2003.
- Pritschow G., Bauer G., Kremer M., *Open Controller Enabled by an Advanced Real-Time Network*. Production Engineering, Vol. 11 (1), 2004, pp. 171–174.
- Pritschow G., Wurst K.H., Kircher C., *Control Systems of Reconfigurable Machine Tools*. In Dashchenko A.I., *Reconfigurable Manufacturing Systems and Transformable Factories*. Springer, Berlino, 2006, pp. 195-211.
- Schmidt D.C., Kuhns F., *An Overview of the Real-Time CORBA Specification*, Computer, Vol. 33 (6), 2000, pp. 56-63.
- Schönsleben P., *Integral Logistics Management*, 3rd Edition. Auerbach Publications, Boca Raton, Florida, U.S.A., 2007.
- Segall S., Upatnieks J., *Integration of Optical Sensors into a Reconfigurable Machining Module*. Proceedings of the Japan-USA Symposium On Flexible Automation, Ann Arbor, Michigan, U.S.A., 2000.
- Sethi A.K., Sethi S.P., *Flexibility in Manufacturing: A Survey*. International Journal of Flexible Manufacturing Systems, Vol. 2 (4), 1990, pp. 289-328.
- Shabaka A.I., ElMaraghy H.A., *A Ga-Based Constraint Satisfaction Model for Generating Optimal Process Plans*. Proceedings of the 3rd International CIRP on Digital Enterprise Technology. Setúbal, Portogallo, 2006.
- Shen C.H., *An innovative reconfigurable and totally automated fixture system for agile machining applications*, Transactions of NAMRI/SME, Vol. 31, 2003, pp. 395–402.
- Song S., Li A., Xu L., *Study of CAPP System Suited for Reconfigurable Manufacturing System*. Proceeding of the International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, WiCom 2007. Shanghai, Cina 2007.

- Spath D., Mussa S., *ACCOMAT - Die genauigkeitsgeregelte Maschine*. Wt-Werkstattstechnik, Vol. 89 (5), 1999, pp. 235-238.
- Terkaj W., Tolio T., Valente A., *Focused Flexibility and Production System Evolution* Proceedings of the 2nd International Conference on Changabel, Agile, Reconfigurable and Virtual Production. Toronto, Canada, 2007.
- Tolio T., Valente A., *An Approach to Design the Flexibility Degree in Flexible Manufacturing Systems*. Proceedings of FAIM-Flexible Automation & Intelligent Manufacturing. Limerick, Irlanda, 2006.
- Tseng Y.J., Jhang J.F., Huang F.Y., *Multi-Plant Assembly Planning Models for a Collaborative Manufacturing Environment*. International Journal of Production Research Vol. 45 (15), 2007, pp. 3333-3349.
- Upton D.M., *The Management of Manufacturing Flexibility*. California Management Review Vol. 36 (2), 1994, pp. 72-89.
- Urbani A., Negri S.P., *Production System Modelling for the Evaluation of the Degree of Reconfigurability*. In Dashchenko A.I., *Reconfigurable Manufacturing Systems and Transformable Factories*. Springer, Berlino, 2006, pp. 239-257.
- Villani L., de Wit C.C., Brogliato B., *An exponentially stable adaptive control for force and position tracking of robot manipulators*. IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 44 (4), 1999, pp. 798-802.
- Wiendahl H.H., Roth N., Westkämper E., *Logistical Positioning in a Turbulent Environment*. CIRP Annals - Manufacturing Technology Vol. 51, (1), 2002, pp. 383-386 .
- Wiendahl H.H., *Changeability in production planning and control - A framework for designing a changeable software tool*. Proceedings of the Working Conference Advances in Production Management Systems (APMS 2005). Rockville, Maryland, U.S.A., 2005c.
- Wiendahl H.H., *Systematic Analysis of PPC System Deficiencies. Analytical Approach and Consequences for PPC Design*. Annals of the CIRP - Manufacturing Technologies Vol. 55 (1), 2006, pp. 479-482.
- Wiendahl H.P., *Load-oriented Manufacturing Control*. Springer, Berlino, 1994.
- Xu H., Tang R.Z., Cheng Y.D., *Study of Process Planning Techniques for Reconfigurable Machine Tool Design*. Journal of Zhejiang University, Vol. 38, 2004, pp. 1496-1501.
- Wiendahl H.P., *Some remarks on changeability, reconfigurability and flexibility of manufacturing systems*. Proceedings of the 3rd Conference on Reconfigurable Manufacturing. Ann Arbor, Michigan, USA, 2005a.
- Wiendahl H.P., Breitenbach F., *Planung modularer Fabriken*. Gebundene Ausgabe, Monaco, Germania, 2005b.

Capitolo III

SISTEMI DI PRODUZIONE TRADIZIONALI E RICONFIGURABILI

Le caratteristiche di cui è dotato un RMS lo rendono profondamente differente dai sistemi di produzione di tipo tradizionale. In effetti, per quanto i sistemi oggetto di studio possano essere concepiti come evoluzione dei più comuni sistemi flessibili di produzione, mutuandone diverse caratteristiche progettuali e modalità operative, è opportuno ricordare che gli attributi di flessibilità focalizzata e modularità li pongono su livelli di efficienza completamente differenti. È evidente, tuttavia, che la scelta fra sistemi produttivi sia in ogni caso dettata dal contesto e dalle caratteristiche di mercato, oltre che da molteplici esigenze di carattere operativo.

In questo capitolo verranno presi in considerazione i principali attributi di una Linea di Produzione Dedicata (DML) e di un Sistema Flessibile di Produzione (FMS). Da un più diretto confronto con le caratteristiche di un RMS sarà, infatti, possibile prefigurare i possibili ambiti d'applicazione. Le indagini verranno successivamente formalizzate tramite la definizione di modelli matematici rappresentativi in grado, attraverso specifiche funzioni di costo, di fornire indicazioni in merito alla convenienza economica di investimenti in ciascuna delle forme produttive prese in considerazione, al variare degli scenari di mercato.

3.1 Paradigmi produttivi a confronto

In letteratura, il termine “sistemi di produzione di tipo tradizionale” è comunemente adoperato per indicare sistemi costituiti da linee di produzione dedicate o sistemi di produzione di tipo flessibile (Koren, 2005; Molina, et al., 2005).

I *Sistemi di Produzione dotati di Linee Dedicate (DML - Dedicated Manufacturing Lines)*, più comunemente noti come *linee a trasferimento*, sono caratterizzati da grado di automazione stabilito in sede di progetto dell’impianto. Ogni linea di produzione che lo costituisce è in grado di realizzare un unico prodotto, con elevato tasso di produttività, in modo da minimizzarne il costo unitario. Le attività di ispezione, assemblaggio e controllo finale sono spesso integrate sulla linea. Generalmente, risultano relativamente semplici dal punto di vista costruttivo e del controllo, a causa delle invariate caratteristiche del prodotto realizzato, oltre che facilmente manutenibili. Tali forme produttive si dimostrano efficienti al verificarsi del matching fra domanda ed offerta.

I *Sistemi di Produzione Flessibili (FMS - Flexible Manufacturing Systems)* sono costituiti dall’insieme di macchine a controllo numerico ed altri sistemi automatici programmabili, al fine di favorire la produzione di una consistente varietà di prodotti (Koren, 1983). La progettazione estremamente complessa delle singole macchine e loro successiva organizzazione in celle di lavorazione, influenzano l’entità dell’investimento iniziale, nonché la complessità della gestione del sistema e la sua manutenibilità. I margini estremamente contenuti entro il quale è possibile far variare il tasso di produzione li rendono, inoltre, difficilmente adattabili a nuove condizioni di mercato in cui si determini una variazione dei volumi di prodotto richiesti. L’eccesso di flessibilità rispetto a quella necessaria per far fronte alla variazione delle richieste del cliente, una volta individuato lo specifico settore produttivo, potrebbe, in fine, comportare il sostenimento di elevati costi di mancato utilizzo.

Alla luce di quanto esposto, e ricordando quanto detto nel Capitolo II a proposito delle caratteristiche di cui è dotato un RMS, è possibile riassumere le

principali differenze esistenti fra i paradigmi produttivi oggetto di confronto (Tabella 3-1), oltre che proporre il posizionamento illustrato in Figura 3.1.

Tabella 3-1 - Confronto fra le principali caratteristiche dei differenti paradigmi produttivi (Koren, et al., 1999)

	DML	RMS	FMS
Struttura del sistema	Fissa	Regolabile	Regolabile
Struttura delle macchine	Fissa	Regolabile	Fissa
Riferimento nella progettazione del sistema	Pezzo	Famiglia di pezzi	Macchine
Scalabilità	No	Si	Si
Flessibilità	No	Focalizzata	Generale
Lavorazioni multi-utensile	Si	Si	No
Produttività	Alta, in generale	Alta, nella singola, specifica configurazione	Bassa
Investimento iniziale	Contenuto	Medio	Alto
Costo unitario di prodotto	Basso, a patto di utilizzare appieno la capacità installata	Medi, per volumi di produzione complessivi variabili in uno specifico range di riferimento	Medi, a patto che siano rispettate diverse condizioni sulla produzione simultanea di varie tipologie di prodotto.

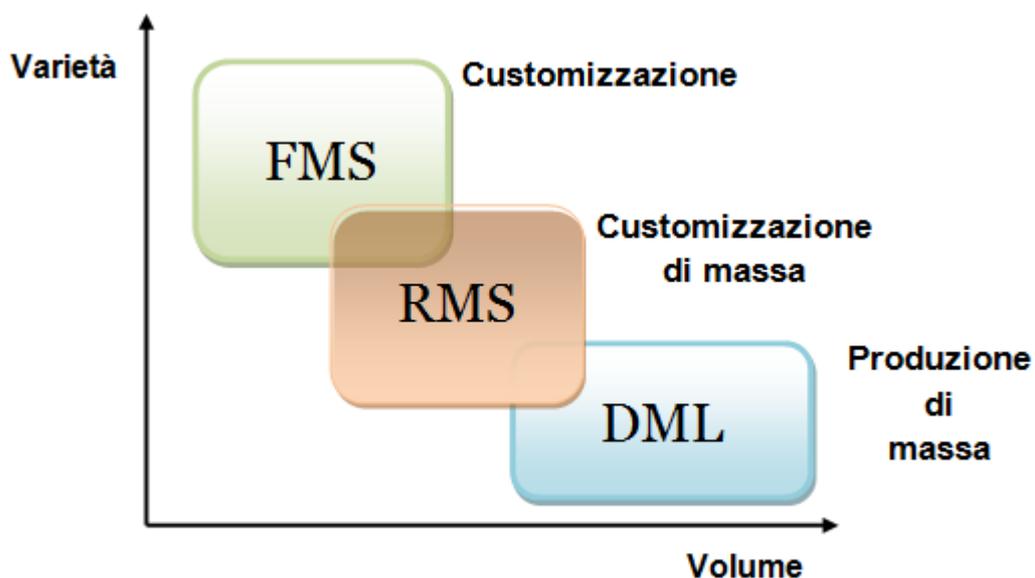


Figura 3.1 – Posizionamento delle forme produttive oggetto di confronto in funzione del volume e della varietà di prodotti potenzialmente conseguibile (Hu, 2005)

Più nello specifico, il termine “customizzazione di massa” intende esaltare le capacità conferite dalla progettazione modulare ad un RMS nel fornire, al momento più opportuno, i prodotti effettivamente richiesti dal mercato, nelle quantità desiderate (Koren, 2005). La possibilità di incrementare la capacità del sistema produttivo in tempi rapidi (condizione non verificata per una DML) e di aliquote non necessariamente prestabilite (condizione non verificata per un sistema di produzione di tipo tradizionale), rende, potenzialmente, un RMS un’alternativa economicamente conveniente in svariati scenari di mercato (Figura 3.2).

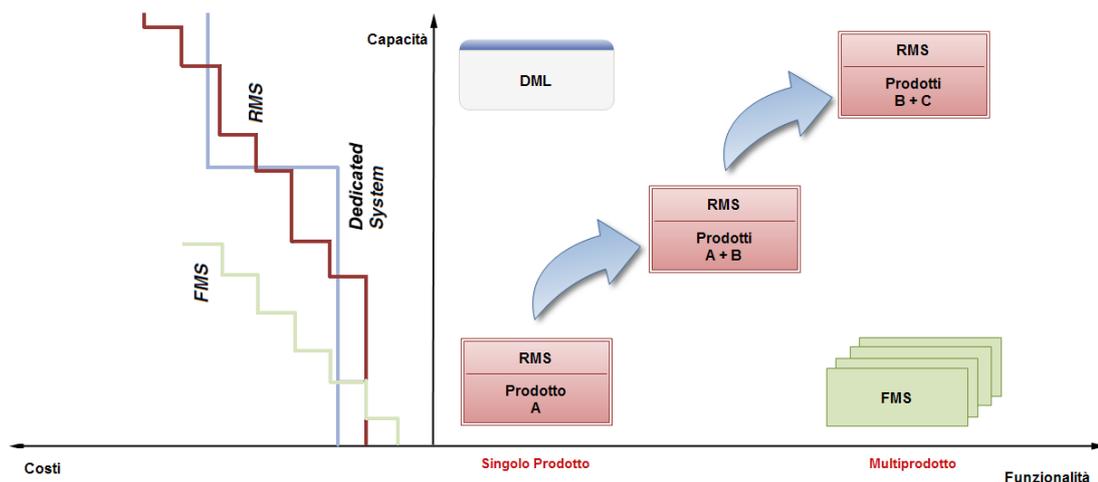


Figura 3.2 – Customizzazione di massa e costi sostenuti per l’incremento della capacità di un sistema produttivo⁴⁰

D’altra parte, è pur vero che in quest’ultimo caso, la possibilità di sfruttare le opportunità offerte da brevi parentesi di mercato diventa funzione dell’abbattimento dei tempi di *ramp-up* e di quelli di riconfigurazione (Figura 3.3).

Si pone, in definitiva, la necessità di individuare dei modelli che consentano, al variare dei parametri di mercato e delle esigenze operative dettate dallo specifico contesto produttivo, di valutare in quale forma produttiva sia più opportuno investire.

⁴⁰ Liberamente adattata da (Koren, 2005).

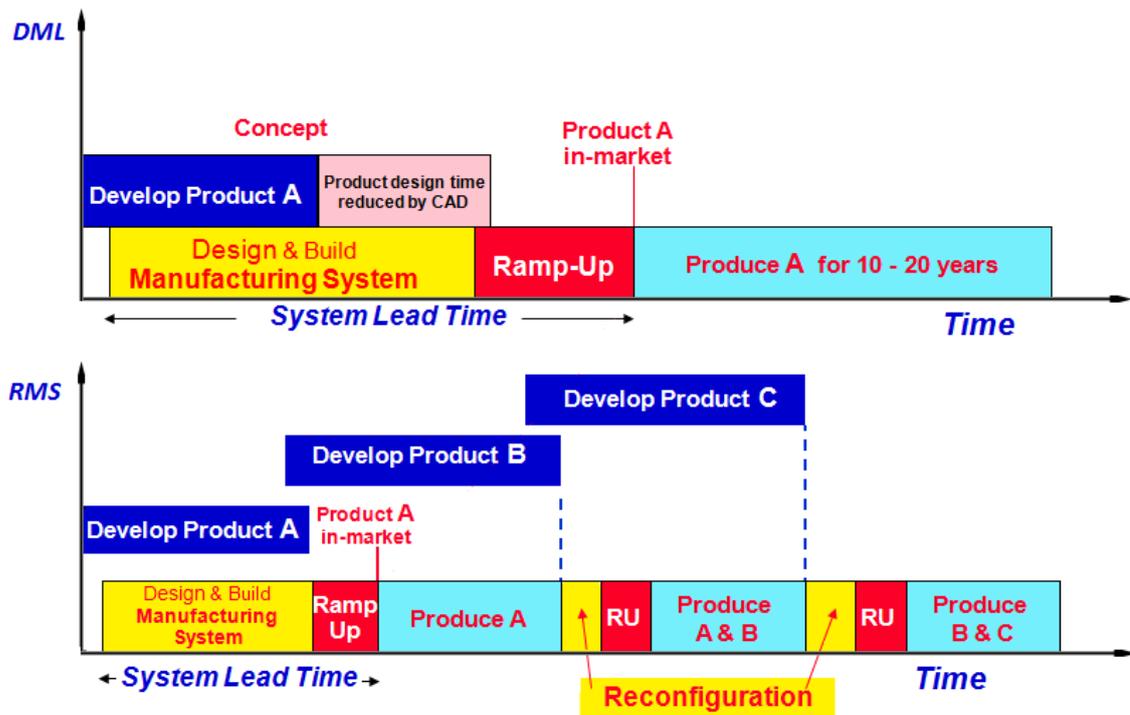


Figura 3.3 – *Impatto dell'aggiornamento della gamma produttiva sul lead-time di sistema*
 (Asl, et al., 2000)

3.2 Modelli per il confronto fra alternative di investimento

Il ricorso a forme produttive di tipo tradizionale o riconfigurabile, prefigura la necessità di individuare dei modelli analitici che consentano un confronto fra le alternative a disposizione per ottimizzare gli investimenti che sarà necessario compiere (Son, et al., 2000).

Investimenti in sistemi produttivi flessibili sono generalmente percepiti a più alto rischio soprattutto in ambienti incerti, complessi e nel caso in cui si considerino piccole o medie imprese (Amico, et al., 2001). Tale percezione è dovuta al fatto che un sistema di produzione flessibile richiede investimenti più consistenti, soprattutto nella fase iniziale, se paragonati a quelli necessari nel caso si ricorra ad altre forme di produzione (Heisel, et al., 2002). Il ricorso a forme flessibili di produzione, inoltre, moltiplica gli scenari d'investimento, rendendo ancor più critica la valutazione dell'evoluzione del contesto competitivo.

In quest’ottica, è parso opportuno valutare la convenienza nell’effettuare un investimento in uno dei tre paradigmi produttivi fin qui presi in considerazione, ricorrendo a tecniche di analisi di uso consolidato in letteratura e facendo riferimento, oltre che alle classiche voci di costo:

- alle caratteristiche del mercato che si intende servire;
- alle potenziali variazioni della domanda oltre il periodo di ritorno dell’investimento;
- alle differenti composizioni del mix produttivo.

A tal proposito occorrerà, innanzitutto, definire dei modelli rappresentativi da cui siano evincibili le performance offerte da ciascuno dei sistemi o definire specifiche funzioni di costo per analizzarne successivamente le variazioni in funzione dei parametri di mercato. Questo potrebbe consentire l’individuazione di condizioni di equivalenza in differenti scenari di mercato, sulla base delle quali effettuare la scelta prospettata.

3.2.1 Un approccio parametrico all’analisi dell’investimento

Un’analisi comparativa fra investimenti effettuati in sistemi produttivi di tipo differente, potrebbe essere condotta modellando i costi sostenuti per realizzare uno specifico insieme di prodotti tramite DML, per poi formalizzare i modelli relativi ad un FMS e ad un RMS attraverso opportune relazioni parametriche (Bruccoleri, et al., 2006). A tal proposito, è possibile adoperare due fattori caratterizzanti:

- α^S , detto *fattore tecnologico*, relaziona un RMS/FMS ad una DML in termini di tempi di processamento caratteristici. Questo fattore tiene conto del fatto che macchine flessibili richiedono tempi di esecuzione delle operazioni più consistenti ma consentono un proporzionale decremento dei tempi relativi ad attività accessorie (ad esempio tempi di set-up). In ogni caso, in generale, la capacità produttiva di un sistema flessibile risulta più contenuta rispetto a quella di una corrispettiva linea dedicata;

- β^S , detto *fattore di costo*, relaziona un RMS/FMS ad una DML in termini di costi d'investimento. Il fattore consente di tener conto della consistenza dell'investimento iniziale e delle eventuali economie di scopo conseguibili.

Le notazioni adoperate nei paragrafi successivi per i modelli analitici elaborati è di seguito ricapitolata:

- S , indice rappresentativo del paradigma produttivo preso in considerazione;
- i , indice rappresentativo del prodotto preso in considerazione, variabile nell'intervallo $[1, 2, \dots, I-1, I]$;
- j , indice rappresentativo del periodo di produzione preso in considerazione, variabile nell'intervallo $[1, 2, \dots, J-1, J]$;
- r , tasso d'interesse del capitale per ogni periodo;
- A , numero di unità di produzione disponibili in ogni periodo j ;
- D_{ij} , domanda del prodotto i nel periodo j ;
- m_{ij} , margine di contribuzione del prodotto i nel periodo j ;
- V_{ij}^S , volume di produzione del prodotto i nel periodo j , per il paradigma produttivo preso in considerazione.

3.2.1.a Modello per un DML

Come noto, questo sistema di produzione richiede una linea dedicata per ogni tipologia di prodotto i realizzato. Se si indica con:

- DML_i , la linea specificatamente dedicata al prodotto i ;
- O_i , il numero di operazioni necessarie per realizzare il prodotto i adoperando la linea DML_i ;
- o_i , l'indice che individua la specifica operazione da compiere sul prodotto i , variabile nell'intervallo $[1, 2, \dots, O_i-1, O_i]$;
- t_{oi} , il tempo macchina per portare a termine l'operazione o_i ;
- $BT_i = \max_{o_i} \{t_{oi}\}$, il tempo macchina alla stazione collo di bottiglia;

- $Cp_i^{DML} = \text{Int} \left(\frac{A}{BT_i} \right)$, il numero massimo di prodotti che la linea dedicata al prodotto i può produrre nel periodo j (capacità produttiva della linea);
- C_i^{DML} , il costo da sostenere per dotarsi della linea dedicata al prodotto i ;
- L_{ij}^{DML} , il numero di linee dedicate al prodotto i acquistate nel periodo j ;
- $\bar{L}_{ij}^{DML} = \sum_{k=1}^j L_{ik}^{DML}$, la funzione cumulativa di L_{ij}^{DML} ;

al fine di pianificare l'investimento nei J periodi presi in considerazione, è possibile massimizzare il suo NPV (*Net Present Value*), espresso come:

$$NPV^{DML} = \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I \frac{-L_{ij}^{DML} \cdot C_i^{DML} + V_{ij}^{DML} \cdot m_{ij}}{(1+r)^{j-1}} \quad (3.1)$$

La massimizzazione deve, tuttavia, essere effettuata secondo i seguenti vincoli di mercato e capacità:

$$\begin{cases} (\forall i, j) & V_{ij}^{DML} \geq D_{ij} \\ (\forall i, j) & V_{ij}^{DML} \leq \bar{L}_{ij}^{DML} \cdot Cp_i^{DML} \end{cases} \quad (3.2)$$

Le variabili decisionali sulle quali agire sono esclusivamente le L_{ij}^{DML} giacché i volumi ottimi sono direttamente ricavabili dalla seguente:

$$(\forall i, j) V_{ij}^{DML} = \min \{ D_{ij} ; \bar{L}_{ij}^{DML} \cdot Cp_i^{DML} \} \quad (3.3)$$

3.2.1.b Modello per un FMS

Il modello matematico si riferisce, in questo caso, ad un insieme di macchine multipurpose, disposte opportunamente per dar vita ad una specifica configurazione produttiva. In particolare, ogni macchina dovrà essere in grado di eseguire una qualsiasi delle operazioni tecnologicamente necessarie per la realizzazione dell'insieme di prodotti considerato.

Se:

- $FT_i = \sum_{o_i=1}^{O_i} t_{o_i}$ è il tempo totale per realizzare il prodotto i sulla DML_i ;
- $WL_j^{FMS} = \sum_{i=1}^I \alpha^{FMS} \cdot FT_i \cdot V_{ij}^{FMS}$ è il carico di lavoro sul FMS per produrre l'insieme di prodotti i nel periodo j ;

- $C^{FMS} = \beta^{FMS} \cdot \sum_{i=1}^I C_i^{DML}$ è il costo d'acquisizione della singola risorsa fisica costituente l'FMS;
- L_j^{FMS} è il numero di risorse fisiche acquistate nel periodo j ,
- $\bar{L}_j^{FMS} = \sum_{k=1}^j L_k^{FMS}$ è il numero totale di risorse fisiche acquistate;

al fine di pianificare l'investimento nei J periodi presi in considerazione, è possibile, analogamente a quanto fatto in precedenza, massimizzare il suo NPV, espresso come:

$$NPV^{FMS} = \sum_{j=1}^J \frac{-L_j^{FMS} \cdot C^{FMS} + \sum_{i=1}^I V_{ij}^{FMS} \cdot m_{ij}}{(1+r)^{j-1}} \quad (3.4)$$

La massimizzazione deve, tuttavia, essere effettuata secondo i seguenti vincoli di mercato e capacità:

$$\begin{cases} (\forall i, j) & V_{ij}^{FMS} \leq D_{ij} \\ (\forall j) & WL_j^{FMS} \leq \bar{L}_j^{FMS} \cdot A \end{cases} \quad (3.5)$$

In questo caso sono le uniche variabili decisionali sono le V_{ij}^{FMS} , infatti i valori ottimi di \bar{L}_j^{FMS} sono ricavabili dalla seguente:

$$(\forall j) \bar{L}_j^{FMS} = \begin{cases} L_j^{FMS} & \text{se } j = 1 \\ \max\{\bar{L}_{j-1}^{FMS}; L_j^{FMS}\} & \text{se } j > 1 \end{cases} \quad (3.6)$$

in cui, indipendentemente dal periodo j considerato, $L_j^{FMS} = \text{Int}\left(\frac{WL_j^{FMS}}{A}\right) + 1$ è il numero di macchine flessibili richieste per produrre $\sum_{i=1}^I V_{ij}^{FMS}$ prodotti, nel periodo j .

3.2.1.c Modello per un RMS

Per la strutturazione del modello matematico, si riterrà il RMS costituito da strutture di supporto attrezzabili con differenti moduli produttivi, ciascuno dei quali in grado di realizzare un singolo prodotto. Le strutture di supporto, inoltre, potranno essere dotate di un solo modulo in ogni periodo j .

Se:

- L_j^{sh} è il numero delle strutture di supporto acquistate nel periodo j ;
- \bar{L}_j^{sh} è il numero totale delle strutture di supporto acquistate;
- RL_j^{sh} è il numero di strutture di supporto necessarie per realizzare $\sum_{i=1}^I V_{ij}^{RMS}$ prodotti nel periodo j ;
- L_{ij}^{mod} è il numero di moduli acquistati nel periodo j per produrre il prodotto i ;
- \bar{L}_{ij}^{mod} è il numero totale di moduli acquistati nel periodo j per produrre il prodotto i ;
- RL_{ij}^{mod} è il numero di moduli necessari per produrre V_{ij}^{RMS} prodotti i nel periodo j ;

il carico di lavoro sul singolo workcenter⁴¹ per produrre il prodotto i nel periodo j è:

$$WL_{ij}^{RMS} = \alpha^{RMS} \cdot FT_i \cdot V_{ij}^{RMS} \quad (3.7)$$

mentre, i costi per l'acquisto di uno scheletro e un modulo, per il prodotto i , sono:

$$C^{sh} = \beta^{RMS} \cdot \sum_{i=1}^I C_i^{DML} \quad (3.8)$$

$$C_i^{mod} = \gamma \cdot \beta^{RMS} \cdot C_i^{DML} \quad (3.9)$$

dove γ è un fattore di proporzionalità che permette di esprimere il costo del modulo in funzione del fattore di relazione β^{RMS} .

Al fine di pianificare l'investimento nei J periodi presi in considerazione, è possibile massimizzare il suo NPV, espresso come:

$$NPV^{RMS} = \sum_{j=1}^J \frac{-L_j^{sh} \cdot C^{sh} + \sum_{i=1}^I (-L_{ij}^{mod} \cdot C_i^{mod} + V_{ij}^{RMS} \cdot m_{ij})}{(1+r)^{j-1}} \quad (3.10)$$

La massimizzazione deve, tuttavia, essere effettuata secondo i seguenti vincoli di mercato e capacità:

⁴¹ Costituito da una struttura di supporto equipaggiata con uno specifico modulo.

$$\begin{cases} (\forall i, j) & V_{ij}^{RMS} \leq D_{ij} \\ (\forall i, j) & WL_{ij}^{RMS} \leq \bar{L}_{ij}^{mod} \cdot A \end{cases} \quad (3.11)$$

e secondo il vincolo aggiuntivo:

$$(\forall j) RL_j^{sh} \geq \sum_{i=1}^I RL_{ij}^{mod} \quad (3.12)$$

che limita il numero di scheletri richiesti in modo che al massimo eguolino, in ogni periodo, il numero di moduli totali richiesti.

Le variabili decisionali, in questo caso, risultano L_j^{sh} , L_{ij}^{mod} e V_{ij}^{RMS} . Il numero di moduli di cui dotarsi è ricavabile dalla:

$$(\forall i, j) \bar{L}_{ij}^{mod} = \begin{cases} L_{ij}^{mod} & se\ j = 1 \\ \max\{\bar{L}_{i,j-1}^{mod}; L_{ij}^{mod}\} & se\ j > 1 \end{cases} \quad (3.13)$$

dove $L_{ij}^{mod} = \text{Int} \left(\frac{WL_{ij}^{RMS}}{A} \right) + 1$ indipendentemente dal prodotto o periodo considerato.

Il numero di scheletri di cui dotarsi è ricavabile dalla:

$$\begin{cases} \forall j & L_j^{sh} = \sum_{i=1}^I L_{ij}^{mod} \\ \forall j & \bar{L}_j^{sh} = \begin{cases} L_j^{sh} & se\ j = 1 \\ \max\{\bar{L}_{j-1}^{sh}; L_j^{sh}\} & se\ j > 1 \end{cases} \end{cases} \quad (3.14)$$

3.2.1.d Considerazioni aggiuntive sui parametri α^S e β^S

L'approccio parametrico ai modelli FMS e RMS prevede una serie di vincoli aggiuntivi.

Per quel che riguarda il *fattore tecnologico* α^S , c'è da considerare che al crescere della flessibilità del sistema produttivo, crescono i tempi macchina. Matematicamente il vincolo può essere posto nella seguente forma:

$$BT_i \leq \alpha^S * FT_i \leq FT_i \Leftrightarrow \frac{BT_i}{FT_i} \leq \alpha^S \leq 1 \quad (3.15)$$

Relativamente al fattore di costo β^S e al fattore di proporzionalità γ , è necessario tener presente le possibili economie di scopo conseguibili tramite il raggruppamento di prodotti in famiglie. Sebbene, dunque, l'investimento iniziale

in un sistema FMS/RMS possa essere più consistente di quello nel corrispondente DML, è possibile recuperarlo rapidamente al crescere del numero di prodotti realizzati. Matematicamente i vincoli in questione possono essere espressi nella seguente forma (Naik, et al., 1992):

$$\begin{cases} \max_i \{C_i^{DML}\} \leq C^{FMS} \leq \sum_{i=1}^I C_i^{DML} \\ (\forall i) C_i^{DML} \leq C^{sh} + C_i^{mod} \\ C^{sh} + \sum_{i=1}^I C_i^{mod} \leq \sum_{i=1}^I C_i^{DML} \end{cases} \quad (3.16)$$

Nel caso di un RMS, inoltre, è verificata la (14):

$$(\forall i) C_i^{mod} \leq C^{sh} \leq \sum_{i=1}^I C_i^{mod} \quad (3.17)$$

Dalle relazioni di cui sopra è possibile ricavare il range entro i quali variare i parametri β^S e γ . Infatti, posto $K = \frac{\sum_{i=1}^I C_i^{DML}}{\max_i \{C_i^{DML}\}}$ si ha:

$$\begin{cases} \frac{1}{K} \leq \beta^{FMS} \leq 1 \\ \frac{1}{K+\gamma} \leq \beta^{RMS} \leq \frac{1}{1+\gamma} \\ 1 \leq \gamma \leq K \end{cases} \quad (3.18)$$

Diversi analisi di scenari di mercato, nei quali viene realizzato un confronto fra investimenti in sistemi produttivi alternativi ricorrendo a tecniche parametriche, sono rintracciabili in (Amico, et al., 2003; Bruccoleri, et al., 2006).

3.2.2 Confronto tramite Analisi di Riconfigurabilità e calcolo del Costo del Ciclo di Vita⁴²

La scelta fra sistemi produttivi di tipo alternativo potrebbe essere effettuata confrontando impianti dotati di differente grado di flessibilità al variare dello specifico mix di prodotti da realizzare e dei volumi che lo caratterizzano. Tale approccio, sebbene molto più complesso, risulta senz'altro meno miope del precedente.

Scegliere una specifica forma produttiva piuttosto che un'altra, infatti, potrebbe comportare il sostenimento di costi iniziali più consistenti ma anche

⁴² Una trattazione alternativa, basata su ottimizzazione multi-obiettivo è rintracciabile in (Kuzgunkaya, et al., 2007).

l'abbattimento di quelli legati ad una insoddisfacente utilizzazione della capacità installata o dei costi d'opportunità collegati al mancato soddisfacimento delle richieste del mercato.

L'introduzione nel tempo di nuove tecnologie, l'evoluzione dei processi di business e del mercato, costituiscono variabili in grado di influenzare ulteriormente il successo dell'investimento in una specifica forma di produzione. Prendere in considerazione i su citati fattori, consente una più adeguata valutazione delle alternative di investimento, potendosi effettuare una vera e propria analisi dei costi legati al ciclo di vita del sistema (*Life Cycle Cost Analysis - LCCA*) (Fabrycky, et al., 1991; Daimon, et al., 2003). Preme sottolineare che è in tale ambito che si rivela determinante il contributo offerto dall'*Analisi di Riconfigurabilità* di un sistema produttivo⁴³ (Son, et al., 2000).

In definitiva, un approccio sistematico all'analisi del ciclo di vita di un sistema produttivo prevede (Urbani, 2006):

- la definizione del profilo e del posizionamento strategico dell'azienda per esaminarne il comportamento durante l'evoluzione degli scenari di mercato, definiti come combinazione di possibili eventi futuri. In quest'ambito viene effettuata una previsione del mix produttivo e dei volumi in specifici orizzonti temporali;
- la creazione di configurazioni alternative del sistema produttivo, caratterizzate da diversi gradi di flessibilità e riconfigurabilità;
- la valutazione, nell'intero ciclo di vita, delle alternative di produzione generate alla luce dell'evoluzione prospettata dei mercati e delle tecnologie.

Per quel che concerne il secondo punto, è necessario stabilire il grado di riconfigurabilità di ciascuna alternativa, vale a dire definire le possibili modifiche che è possibile apportare al sistema produttivo, accompagnate dal

⁴³ A tal proposito, per un ulteriore approfondimento, è possibile consultare l'indirizzo: <http://www.licopro.rwth-aachen.de/en/default.html>, in cui è descritto in dettaglio il progetto *LicroPro (Life Cycle Design of Global Collaborative Production)*, IST-2001-37603, del 30 Aprile 2002.

relativo impatto economico e dagli effetti sul mix produttivo. Per ciascuna operazione, in ciascuna soluzione alternativa, verrà generato un vettore $n_i = \{n_{i,1}, \dots, n_{i,X_n}\}$, rappresentativo delle insieme delle riconfigurazioni possibili⁴⁴, o meglio delle X_n tipologie di riconfigurazioni che possono riguardare l'operazione n , nell'ambito della soluzione i , essendo $n_{i,x}$ il numero di volte che la riconfigurazione x può essere eseguita. Al vettore n_i , si accompagnano un vettore dei costi sostenuti ($C_{i,n}^{Rec}$) e un vettore rappresentativo dell'impatto che le riconfigurazioni hanno in termini di variazione del volume di prodotto p realizzabili ($\Delta V_{i,p,n}^{Rec}$), così definiti:

$$C_{i,n}^{Rec} = \{C_{i,n,1}^{Rec}, \dots, C_{i,n,X_n}^{Rec}\} \quad (3.19)$$

$$\Delta V_{i,p,n}^{Rec} = \{\Delta V_{i,p,n,1}^{Rec}, \dots, \Delta V_{i,p,n,X_n}^{Rec}\} \quad (3.20)$$

Nell'analizzare le alternative generate, sarà necessario considerare:

- la capacità potenziale installata, $PC_{i,t,p,n}$, in ogni periodo t , che rappresenta il numero massimo di parti parte p processabili nell'ambito dell'operazione n ;
- la domanda, $D_{t,j,p}$, che rappresenta il numero di parti p , richieste nello scenario j -simo, prefigurato nel periodo t . Ogni scenario j è, infatti, parte di una insieme di Sc_t scenari attesi nel periodo t , ogn'uno con una probabilità di verificarsi pari a p_j .

La capacità installata necessaria per far fronte all'eventualità che si verifichi lo scenario j nel periodo t , è:

$$PC_{i,t,j,p,n} = PC_{i,p,n}(0) + \sum_{k=1}^t \Delta PC_{i,j,p,n}(k) \quad (3.21)$$

dove $\Delta PC_{i,j,p,n}(k)$ è la variazione della capacità potenzialmente disponibile per la parte p , relativamente all'operazione n , realizzata nel periodo k ($k \leq t$) nel caso si ricorra alla soluzione i .

⁴⁴ A partire dalla sostituzione di un modulo, fino ad arrivare alla duplicazione della risorsa considerata.

Il mix di produzione richiesto nel periodo t , può essere espresso come la porzione di tempo disponibile per la produzione, durante il periodo t , di ciascuna delle parti che lo costituiscono ($T_{i,t}$). In questo modo, la quantità $m_{i,t,j,p} \in [0, 1]$ rappresenterà la porzione di tempo destinato, all'inizio del periodo t alla produzione della tipologia di prodotti p , se si adotta la soluzione i .

Poiché il tempo disponibile per la produzione all'inizio del periodo t , indipendentemente dalla parte prodotta, è esprimibile come:

$$T_{i,t,j} = hy_{i,t,j} \cdot A_{i,t} \quad (3.22)$$

in cui:

- $hy_{i,t,j}$ è il numero di ore disponibili all'inizio del periodo t se si adotta la soluzione i ;
- $A_{i,t}$ è la disponibilità del sistema al tempo t ;

la capacità potenziale nel primo periodo (*periodo 0*) può essere calcolata come:

$$PC_{i,p,n}(0) = * 3600 \cdot \frac{m_{i,0,p}}{c_{i,p,n}} \cdot T_{i,0} \quad (3.23)$$

dove $c_{i,p,n}$ è il tempo ciclo della parte p all'operazione n [sec/pz].

Sulla base di quanto detto, è possibile eseguire l'analisi del ciclo di vita di ogni soluzione i , facendo corrispondere, in ogni periodo e in ogni scenario, la domanda della parte p ($D_{t,j,p}$) alla capacità potenziale disponibile per ogni parte e per ogni operazione richiesta nel ciclo tecnologico della parte t .

Qualora dovessero verificarsi dei colli di bottiglia, è possibile intervenire:

- sul mix produttivo, sfruttando il grado di flessibilità del sistema. Il mix viene alterato per compensare l'incremento nel tempo necessario alla produzione delle parti critiche. Qualora l'impianto non fosse dotato di un grado di flessibilità sufficiente, sarà necessario ridurre proporzionalmente il tempo assegnato alla produzione di parti non critiche all'interno del mix;

- sulla disponibilità del sistema, prevedendo lavoro straordinario, incrementando il numero di turni al giorno o aumentando il numero di giorni all'anno in cui l'impianto rimane aperto. Limitazioni in questo caso possono derivare dal contesto considerato e dai costi associati ai tipi di intervento prefigurati;
- riconfigurando il sistema, secondo quanto specificato dall'analisi di riconfigurabilità preliminare, o abbandonando la produzione di alcuni dei prodotti. Naturalmente, nel caso si dovesse optare per la riconfigurazione del sistema, le stesse necessità potrebbero essere soddisfatte da differenti configurazioni, fermo restando che a ciascuna di queste resterà associato uno specifico profilo di costo, così come definito nella (3.19).

In particolare, la variazione della capacità potenzialmente disponibile per la produzione del prodotto p presso il centro di lavoro n , scelta la soluzione produttiva i , sarà, nello scenario j , prefigurato all'anno k :

$$\Delta PC_{i,j,p,n}(k) = a_{i,k} \cdot \Delta PC_{i,j,p,n}^{Mix}(k) + \Delta PC_{i,j,p,n}^{Tp} + \Delta PC_{i,j,p,n}^{Rec}(k) \quad (3.24)$$

3.2.2.a Cambio del mix di produzione

Nel caso di variazione del mix produttivo, la corrispondente variazione della capacità potenziale, durante il periodo k ($k \leq t$), relativa ad una variazione impattante sulla parte p , in termini di una percentuale $m_{i,k,j,p}$, è:

$$\Delta PC_{i,j,p,n}^{Mix}(k) = 3600 \cdot \frac{\Delta m_{i,k,j,p}}{c_{i,p,n}} \cdot T_{i,k,j} \quad (3.25)$$

dove $\Delta m_{i,k,j,p} = m_{i,k,j,p} - m_{i,k-1,j,p}$.

Per ogni parte p nel periodo t , la variazione minima nel mix di produzione è:

$$\Delta m_{i,t,j,p}^{need} = \max \left\{ 0, \min_n \left\{ \frac{(D_{t,j,p} - PC_{i,t,j,p,n}) \cdot c_{i,p,n}}{3600 \cdot T_{i,t,j}} \right\} \right\} \quad (3.26)$$

mentre quella disponibile è:

$$\Delta m_{i,t,j,p}^{avail} = \max \left\{ 0, \min_n \left\{ \frac{(PC_{i,t,j,p,n} - D_{t,j,p}) \cdot c_{i,p,n}}{3600 \cdot T_{i,t,j}} \right\} \right\} \quad (3.27)$$

L'alternativa è, dunque, percorribile nel periodo t , se:

$$\sum_{p=1}^P \Delta m_{i,t,j,p}^{avail} > \sum_{p=1}^P \Delta m_{i,t,j,p}^{need} \quad (3.28)$$

formalizzabile, introducendo il coefficiente $a_{i,k,j}$, secondo la:

$$a_{i,k,j} = \begin{cases} 1 & \text{se } \sum_{p=1}^P \Delta m_{i,t,j,p}^{avail} > \sum_{p=1}^P \Delta m_{i,t,j,p}^{need} \\ 0 & \text{se } \sum_{p=1}^P \Delta m_{i,t,j,p}^{avail} < \sum_{p=1}^P \Delta m_{i,t,j,p}^{need} \end{cases} \quad (3.29)$$

Dunque, per ogni parte p , la variazione, durante il periodo k , associata al cambio di mix produttivo, è data da:

$$\Delta m_{i,k,j,p} = \max_n \left\{ \frac{(D_{k,j,p} - PC_{i,k,j,p,n}) * c_{i,pn}}{3600 * T_{i,k,j}} \right\} \quad (3.30)$$

indipendente dall'operazione considerata.

3.2.2.b Cambio nel tempo di produzione disponibile

Nel caso di variazione nel tempo disponibile per la produzione, la corrispondente variazione della capacità potenziale, durante il periodo k ($k \leq t$), relativa alla parte p , alla soluzione i , nello scenario j è:

$$\Delta PC_{i,j,p,n}^{Tp}(k) = 3600 \cdot \frac{m_{i,k,j,p}}{c_{i,p,n}} \cdot \Delta T_{i,k,j} \quad (3.31)$$

dove $\Delta T_{i,k,j} = (hy_{i,k,j} - hy_{i,0})$ e $hy_{i,0}$ è il tempo di produzione previsto nel periodo iniziale se si adotta la soluzione i .

La possibilità di aggiungere del tempo alla fase di produzione è limitata dal vincolo:

$$hy_{i,t,j} < HY \quad \text{con} \quad HY = hs \cdot sd \cdot dy \leq 8760 \text{ [h/anno]} \quad (3.32)$$

in cui hs è il numero massimo di ore per turno, sd è il numero massimo di turni per giorno, dy è il numero massimo di giorni lavorativi annui.

Se è possibile supporre che in caso di cambiamenti nel mix produttivo non si incorra in costi aggiuntivi, tale ipotesi non risulta adottabile nel caso si intervenga sul tempo di produzione, registrandosi un incremento dei costi

operativi variabili del sistema. Più nello specifico, sarà necessario prendere in considerazione i costi riportati in Tabella 3-2.

Tabella 3-2 - Costi operativi variabili annuali tipicamente sostenuti da un'azienda

Costi operativi variabili annuali		
Costi di manutenzione		€/h
Pianificati	Lavoro	PMl
	Materiali	PMm
Non pianificati	Lavoro	UMl
	Materiali	UMm
	Perdite di produzione	LP
Costi operativi		€/h
Costi variabili	Costi per straordinario (per persona)	o
	Servizi	U
	Materiale di consumo	C
	Pari di ricambio	S

A seguito di una variazione della produzione, si registrerà una variazione dei costi di manutenzione pianificati funzione del vettore:

$$\Delta PMh_{i,n} = \{\Delta PMh_{i,n,1}, \dots, \Delta PMh_{i,n,X_n}\} \quad (3.33)$$

rappresentativo dell'incremento/diminuzione del numero di ore annue, relativamente alla soluzione produttiva i , destinate alla manutenzione del posto di lavoro/macchina che consente l'esecuzione dell'operazione n .

Tale costo, per il periodo t , nello scenario j , può essere calcolato come:

$$PM_{i,t,j} = (PMl + PMm) \cdot PMh_{i,t,j} \quad (3.34)$$

dove

$$PMh_{i,t,j} = PMh_{i,t-1} + \sum_{n=1}^N \sum_{x=1}^{X_n} \Delta PMh_{i,t,j,n,x} \quad (3.35)$$

Il costo di manutenzione non pianificata, valutato in termini di tempi di fermo impianto, può essere calcolato come:

$$UM_{i,t,j} = (UMl + UMm + LP) \cdot (1 - A_{i,t}) \cdot hy_{i,t,j} \quad (3.36)$$

Nel valutare i costi operativi, bisognerà tener presente dell'influenza del grado di automazione sul costo del lavoro diretto, facendo quest'ultimo riferimento al numero di operatori per macchina, comprese le stazioni di carico e scarico delle parti lavorate. Tal voce di costo è esprimibile come:

$$L_{i,t,j} = \begin{cases} (l \cdot Op_{i,t,j}) \cdot hy_{i,0} + (o \cdot Op_{i,t,j}) \cdot (hy_{i,t,j} - hy_{i,0}) & \text{se } hy_{i,t,j} > hy_{i,0} \\ (l \cdot Op_{i,t,j}) \cdot hy_{i,0} & \text{altrimenti} \end{cases} \quad (3.37)$$

in cui l rappresenta il costo del lavoro in orario contrattuale.

Il numero di operatori, $Op_{i,t,j}$, presenti nella soluzione i , durante il periodo t , per lo scenario j ipotizzato, è funzione della flessibilità del sistema e deve, pertanto, essere definito in base a considerazioni svolte nella fase dell'analisi di riconfigurabilità del sistema. Una volta determinato il vettore $\Delta Op_{i,n} = \{\Delta Op_{i,n,1}, \dots, \Delta Op_{i,n,X_n}\}$, sarà possibile calcolare:

$$Op_{i,t,j} = Op_{i,t-1} + \sum_{n=1}^N \sum_{x=1}^{X_n} \Delta Op_{i,t,j,n,x} \quad (3.38)$$

da cui, i costi operativi:

$$OP_{i,t,j} = L_{i,t,j} + (U + C + S) \cdot hy_{i,t,j} \quad (3.39)$$

cui è necessario aggiungere la componente variabile per ottenere i costi operativi totali:

$$C_{i,t,j}^{Run} = PM_{i,t,j} + UM_{i,t,j} + OP_{i,t,j} \quad (3.40)$$

La struttura di costo adoperata, potrebbe, naturalmente, essere ulteriormente dettagliata in accordo con le specifiche necessità dell'ambiente produttivo considerato.

3.2.2.c Riconfigurazioni

Nel caso di riconfigurazione del sistema produttivo, la corrispondente variazione della capacità potenziale, durante il periodo k ($k \leq t$), relativa alla parte p , alla soluzione i , nello scenario j , per l'operazione n è:

$$\Delta PC_{i,j,p,n}^{Rec}(k) = \sum_{x=1}^{X_n} \Delta PC_{i,p,n,x}^{Rec} \cdot rs_{i,k,j,n,x} \quad (3.41)$$

dove l'insieme delle riconfigurazioni $rs_{i,k,j,n} = \{rs_{i,k,j,n,1}, \dots, rs_{i,k,j,n,X_n}\}$, è un insieme di variabili decisionali binarie, poste pari a 1 se, durante il periodo k , avendo scelto la soluzione produttiva i , si esegue la riconfigurazione x tra le X_n disponibili per l'operazione n , per far fronte alla variazione di domanda nello scenario j .

Questo significa che nella (3.35) e nella (3.38) sarà, rispettivamente:

$$\Delta PMh_{i,t,j,n,x} = \Delta PMh_{i,n,x} \cdot rs_{i,t,j,n,x} \quad (3.42)$$

$$\Delta Op_{i,t,j,n,x} = \Delta Op_{i,n,x} \cdot rs_{i,t,j,n,x} \quad (3.43)$$

I costi associati a ciascuna delle potenziali riconfigurazioni del sistema sono ricavabili dalla (3.19). Più nello specifico, relativamente all'operazione n , per far fronte alla variazione di domanda nel periodo t dello scenario j , si sosterrà un costo di riconfigurazione pari a:

$$C_{i,t,j,n}^{Rec} = \sum_{x=1}^X C_{i,n,x}^{Rec} \cdot rs_{i,t,j,n,x} \quad (3.44)$$

e quindi, considerando tutte le stazioni di lavoro interessate da riconfigurazione:

$$C_{i,t,j}^{Rec} = \sum_{n=1}^N C_{i,t,j,n}^{Rec} \quad (3.45)$$

3.2.2.d Analisi dei costi sostenuti nel ciclo di vita del sistema

Il modello, così come descritto, fornisce tutti gli elementi necessari per eseguire un'analisi dei costi sostenuti nel ciclo di vita di ciascuna delle soluzioni produttive considerate (Figura 3.4).

Le differenti decisioni che è possibile prendere per far fronte alle condizioni determinatesi nello scenario j , specificheranno diversi profili di costo nel periodo t :

$$C_{i,s,t,j} = C_{i,s,t,j}^{Run} + C_{i,s,t,j}^{Rec} + C_{i,s,t,j}^{NP} \quad (3.46)$$

in cui $C_{i,s,t,j}^{NP}$ rappresenta il costo sostenuto per non essere riusciti a soddisfare tutta la domanda di mercato, nel periodo considerato, in seguito alle decisioni prese⁴⁵.

Production Alternatives	Preliminary analysis Reconfigurability analysis	Decision	DEMAND (period t) Scenario			Expected NPC _{it}	LCC
			p ₁	p ₂	p ₃		
1 DML	Cost for reconfiguration	1	C ₁₁₁	C ₁₁₂	C ₁₁₃		
		2	C ₁₂₁	C ₁₂₂	C ₁₂₃		
		3	C ₁₃₁	C ₁₃₂	C ₁₃₃		
		Min. cost	C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃		
2 FMS	Cost for reconfiguration	1	C ₂₁₁	C ₂₁₂	C ₂₁₃		
		2	C ₂₂₁	C ₂₂₂	C ₂₂₃		
		3	C ₂₃₁	C ₂₃₂	C ₂₃₃		
		Min. cost	C ₂₁	C ₂₂	C ₂₃		
3 RMS	Cost for reconfiguration	1	C ₃₁₁	C ₃₁₂	C ₃₁₃		
		2	C ₃₂₁	C ₃₂₂	C ₃₂₃		
		3	C ₃₃₁	C ₃₃₂	C ₃₃₃		
		Min. cost	C ₃₁	C ₃₂	C ₃₃		

Figura 3.4 - Analisi LCC per soluzioni produttive alternative

L'LCC relativo alla soluzione i , può essere dunque calcolato come somma, nell'orizzonte temporale di riferimento $[1, T-1]$, dei costi attesi in ogni periodo, assumendo che sia stata intrapresa una strategia di adattamento del sistema ottima relativamente ad ogni scenario j e considerando il coefficiente di attualizzazione ρ :

$$LCC_i = C_{i,0} + \sum_{t=1}^{T-1} \left(\frac{\sum_{j=1}^{Sc} p_j * \min_s \{C_{i,s,t,j}\}}{(1+\rho)^t} \right) \quad (3.47)$$

in cui $C_{i,0}$ è il costo associato alla configurazione iniziale espresso come:

⁴⁵ Tale aliquota di costo potrebbe essere costituita da costi di terziarizzazione, costi di mancata vendita veri e propri ed, eventualmente, costi relativi alla perdita di immagine.

$$C_{i,o} = I_{i,o} + C_{i,o}^{Run} \quad (3.48)$$

dove $I_{i,o}$ è l'investimento iniziale e $C_{i,o}^{Run}$ sono i costi operativi per il periodo in cui la configurazione rimane adoperata⁴⁶.

3.2.3 Valutazione dell'investimento tramite Real Options

Nel Paragrafo 3.2.1, è stato proposto un metodo di valutazione comparativa degli investimenti in differenti forme produttive basato sul calcolo del *NPV*, in cui la scelta veniva effettuata, una volta definite le condizioni a contorno, in base al valore assunto dal parametro. Le tecniche basate sull'analisi dei flussi di cassa scontati (*DCF – Discounted Cash Flow*), tuttavia, si rivelano spesso incapaci di cogliere l'impatto strategico di tali tipo di progetto, trascurando la flessibilità operativa che consente al management di decidere, nel tempo, sulla base della variazione di fattori economici esogeni al modello inizialmente adoperato per la valutazione delle alternative (Miller, et al., 2002).

Tecniche derivate dall'analisi dei mercati finanziari, come ad esempio la *Real Option Analysis*⁴⁷, potrebbero costituire un supporto aggiuntivo in caso di mercati altamente volatili o in cui la domanda è fortemente influenzata dall'innovazione tecnologica (Amico, et al., 2003; Amico, et al., 2001), consentendo un'estensione dei risultati ottenuti tramite tecniche tradizionali (*ENPV - Extended Net Present Value*) (Miller, et al., 2002).

In questo caso, il progetto verrebbe modellato in termini di:

- incertezza, legata alla volatilità nella variazione del valore del progetto nel tempo;
- valore, legato al valore inizialmente fissato dal management (*spot price*);

mentre le possibili decisioni del management potrebbero essere relative a:

⁴⁶ Sebbene ciò equivalga ad assumere che l'intero investimento sia effettuato nell'anno iniziale, è immediata la riformulazione della **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** per tener conto di una sua distribuzione nel tempo.

⁴⁷ Nella terminologia finanziaria un'*opzione* è l'acquisto di un diritto ad esercitare un prelazione su di un bene in un periodo futuro, qualora si fossero registrate certe specifiche condizioni.

- contrazione o abbandono del progetto (*American styled Put Option*);
- espansione o estensione nel tempo del progetto (*American styled Call Option*);
- *switching*, in cui all'esercizio del diritto di opzione si innescano opzioni accessorie collegate alla principale.

Adoperando tale tipo d'approccio, le *Real Option* legate alle caratteristiche di convertibilità e scalabilità di un RMS, potrebbero favorire investimenti in tale forma produttiva in scenari di mercato dove inizialmente erano ritenuti non convenienti.

Sebbene la corrispondenza fra fattori proposta in Tabella 3-3 consenta, ai fini della valutazione analitica dell'opzione, l'utilizzo del *modello di Black-Scholes* (Black, et al., 1973), è anche necessario sottolineare che non tiene conto di una serie di fattori critici (Amico, et al., 2003):

- nel caso della scelta fra forme produttive di tipo differente, il primo fattore di incertezza sono la variazione della domanda e del mix produttivo piuttosto che il valore assunto dai flussi di cassa;
- il *pay-off* dell'opzione non può essere valutato solo considerandone il valore alla data di esercizio perché questo dipende anche dall'entità dei flussi di cassa che questa sarà in grado di generare nei periodi successivi;
- il costo di esercizio dell'opzione è fissato a priori e l'espansione è considerata un'aliquota del valore dell'*asset* alla data di esercizio dell'opzione, senza dunque che ci siano connessioni fra variazione della domanda e entità dell'espansione;
- esiste un discrasia temporale fra l'istante al quale viene esercitata l'opzione, l'istante al quale la capacità del sistema viene resa effettivamente disponibile e l'istante al quale il sistema raggiunge i valori di *throughput* attesi.

Tabella 3-3 – Opzioni finanziarie e opzioni reali (Trigeorgis, 1991)

Contesto finanziario		Contesto produttivo	
Prezzo dell'azione	S	<i>Cash-flow</i> del progetto privo dell'investimento iniziale I_0	S
Volatilità dell'azione	σ	Volatilità del <i>cash-flow</i>	σ
Istante di esercizio	T	Istante di espansione	T
Costo di esercizio	X	Esborso collegato all'incremento della capacità al valore I_1 all'istante T	X
Tasso di sconto al rischio	r	Tasso di sconto al rischio	r
Funzione di pay-off	$\text{Max} \{S(T) - X, 0\}$	Funzione di pay-off	$\text{Max} \{E(CF(T)) - I_1, 0\}$

Piuttosto, prendendo in considerazione un sistema produttivo nel quale si produce un unico prodotto, dotato di una capacità iniziale C_0 a fronte di un investimento iniziale I_0 e se:

- cm è il margine di contribuzione per unità prodotta;
- fc sono i costi fissi sostenuti in un anno;
- $D(t)$ è il valore della domanda annua per il prodotto considerato;

il ricavo netto derivante dalla vendita dei prodotti è:

$$NI(D) = cm \cdot \min(D, C_0) - fc \quad (3.49)$$

Se si suppone, inoltre, che la domanda sia una variabile stocastica con distribuzione assimilabile a quella di un moto geometrico browniano (Ross, 2007):

$$dD(t) = \mu \cdot D(t) \cdot dt + \sigma \cdot D(t) \cdot dW(t) \quad (3.50)$$

dove:

- $W(t)$ è un processo di Wiener;
- μ è il tasso atteso di crescita della domanda;
- σ la volatilità della domanda;

la funzione che fornisce il prezzo f di uno strumento derivato dipendente esclusivamente dalla domanda e dal tempo è:

$$f(t, D) = e^{-r \cdot (T-t)} \cdot E_{t,D}^Q[\Phi(D(t))] \quad (3.51)$$

dove la funzione $\Phi(D(t))$ dipende dal tipo di strumento derivato considerato (Bjork, 2009).

La (3.51), più nello specifico, rappresenta il prezzo di uno strumento derivato che sconta, alla maturazione, al tasso r , il pay-off dell'opzione, avendo assunto un comportamento al rischio neutrale⁴⁸. Tale comportamento si riflette sulla presenza nella (3.51) della misura di probabilità al rischio neutro, Q , che fa sì che il tasso di crescita della domanda effettivamente considerato sia $\mu' = \mu - \lambda \cdot \sigma$, con λ prezzo di mercato del rischio ricavabile dal modello *CAPM - Capital Asset Pricing Model* (Hull, 2000).

Così come proposta la $f(t, D)$ è particolarmente complessa da valutare; per questo motivo si ricorre spesso al modello proposto in (Trigeorgis, 1991) che prevede una discretizzazione dell'intervallo temporale di riferimento e il ricorso alla simulazione Montecarlo (Mooney, 1997).

Inoltre, per una corretta valutazione delle alternative a disposizione, sarà necessario considerare quanto graficamente illustrato in Figura 3.5.

Nell'intervallo $[T, T_{inst}]$, la capacità produttiva di un RMS è ridotta a causa del tempo necessario per portare a termine il processo di riconfigurazione ed è analiticamente esprimibile come $C' = (1 - \rho) \cdot C_0$, con $0 \leq \rho \leq 1$. Nell'intervallo $[T_{inst}, T_{rampup}]$, invece, la capacità cresce linearmente fino al valore finale desiderato C_1 , a causa delle inevitabili perdite di velocità e qualità dovute al fermo macchina.

Infine, così come anticipato all'inizio del paragrafo, sarà necessario valutare i ricavi netti aggiuntivi derivanti dall'incremento di capacità, a partire dall'istante

⁴⁸ Nel valutare un asset finanziario, una delle tecniche più adoperate è quella di mantenere un comportamento neutro al rischio in relazione ai possibili cash-flow futuri conseguibili. Per fare un esempio, se la probabilità che si verifichi ad un tempo $t+dt$ un cash-flow pari 1.000€ è pari al 30%, il valore dell'asset all'istante t viene stimato in 300€. Per ulteriori approfondimenti si consulti, ad esempio, (Hull, 2000)

T al quale viene esercitata l'opzione di espansione, fino alla fine del periodo d'osservazione T_{end} . Questi, una volta scontati all'istante iniziale T , dovranno essere confrontati con l'investimento I_I effettuato per ottenere il desiderato incremento di capacità.

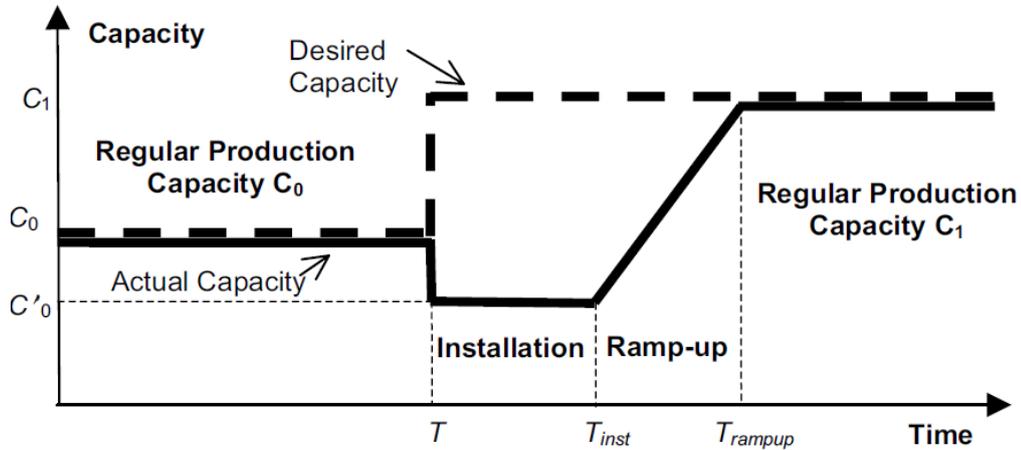


Figura 3.5 – Andamento del valore della capacità in caso di riconfigurazione di un RMS
 (Amico, et al., 2003)

Il valore finale dell'opzione, in un qualsiasi istante $t < T$, può essere espresso, secondo quanto proposto in (Amico, et al., 2003), come:

$$V_t = e^{-r \cdot (T-t)} \sum_{K=0}^{n_1} p_k \cdot \bar{\Phi}_k \quad (3.52)$$

$$p_k = \binom{n_1}{k} \cdot q_k \cdot (1 - q)^{n_1 - k}$$

con:

- $\bar{\Phi}_k = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \Phi_{k,i}$
- k indice del nodo dell'albero binomiale, legato all'omologo indice h tramite la relazione $h = 2 \cdot K - n_I$;
- n numero di replicazioni adoperate nella simulazione Montecarlo.

Diverse analisi di scenari di mercato nei quali viene realizzato un confronto fra investimenti in sistemi produttivi alternativi, adoperando la tecnica analizzata sono rintracciabili in (Kemna, 1993; Kogut, et al., 1994; Amico, et al., 2003; Yeo, et al., 2003).

3.3 Bibliografia

- Amico M., Pasek Z., Asl F., Perrone G., *A New Methodology to Evaluate the Real Options of an Investment Using Binomial Trees and Montecarlo Simulation*. Proceedings of the 35th conference on Winter simulation: driving innovation. New Orleans, Louisiana, U.S.A., 2003.
- Amico M. Bruccoleri M., Lo Nigro G., Perrone G., *A set of optimization models for making investment decisions in manufacturing enterprises*. Proceedings of the 1st CIRP International Conference on Agile, Reconfigurable Manufacturing. Ann Arbor, Michigan, U.S.A., 2001.
- Asl F.M., Ulsoy A.G., Koren Y., *Dynamic Modeling and Stability of the Reconfiguration of Manufacturing System*. Proceedings of the 2000 Japan-USA Symposium on Flexible Automation. Ann Arbor, Michigan, U.S.A., 2000.
- Bjork T., *Arbitrage Theory in Continuous Time*. Oxford University Press, Oxford, U.K., 2009.
- Black F., Scholes M., *The Pricing of Options and Corporate Liabilities*. Journal of Political Economy, Vol. 81 (3), 1973, pp. 637-659.
- Bruccoleri M., Perrone G., *Economical Models for Reconfigurable Manufacturing Systems*. In Dashchenko A.I., *Reconfigurable Manufacturing Systems and Transformable Factories*. Springer, Berlino, Germania, 2006, pp. 629-641.
- Daimon T., Kondoh S., Umeda Y., *Proposal of decision support method for life cycle strategy by estimating value and physical lifetimes*. Proceedings of the 3rd International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing (EcoDesign '03). Tokyo, Giappone, 2003.
- Fabrycky W.J., Blanchard B.S., *Life-cycle cost and economic analysis*. Prentice-Hall, Boston, Massachusetts, U.S.A., 1991.
- Heisel U., Meitzner M., *Flexibilitats und Produktivitatssteigerung durch rekonfigurierbare Werkzeugmaschinen-systeme*. Proceedings of the 1st International CAMT conference. Wroclaw, Polonia, 2002.
- Hu S.J., *Paradigms of manufacturing - a panel discussion*. Proceedings of the 3rd Conference on Reconfigurable Manufacturing. Ann Arbor, Michigan, U.S.A., 2005.
- Hull J.C., *Options, Futures and Other Derivatives*, 4th Edition. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, U.S.A., 2000.
- Kemna A.G., *Case Studies on Real Options*. Financial Management, Vol. 22 (3), 1993, pp. 259-270.
- Kogut B., Kulatilaka N., *Operating Flexibility, Global Manufacturing and the Option Value of a Multinational Network*. Management Science, Vol. 40 (1), 1994, pp. 123-139.

- Koren Y., *Computer Control of Manufacturing Systems*. McGraw Hill, New York, U.S.A., 1983.
- Koren Y., *What are the differences between FMS & RMS. Paradigms of manufacturing - a panel discussion*. Proceedings of the 3rd Conference on Reconfigurable Manufacturing. Ann Arbor, Michigan, USA, 2005.
- Koren Y., Heisen U., Jovane F., *Reconfigurable Manufacturing Systems. A keynote paper*. Annals of the CIRP, Vol. 48 (2), 1999, pp. 527-540.
- Kuzgunkaya O., ElMaraghy H.A., *Economic and strategic perspectives on investing in RMS and FMS*. International Journal of Flexible Manufacturing Systems, Vol. 19 (3), 2007, pp. 217-246.
- Miller T.L., Park C.S., *Decision Making Under Uncertainty - Real Options to the Rescue?*. The Engineering Economist, Vol. 47, 2002, pp. 105-150.
- Molina A., Rodriguez C., Ahuett H., *Next-generation manufacturing systems: key research issues in developing and integrating reconfigurable and intelligent machines*. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, Vol. 18 (7), 2005, pp. 525-536.
- Mooney C.Z., *Monte Carlo Simulation*. Sage Publications Inc., Thousand Oaks, California, U.S.A., 1997.
- Naik B., Chakravarty A.K., *Strategic Acquisition of New Manufacturing Technology: a Review and Research Framework*. International Journal of Production Research. Vol. 30 (7), 1992, pp. 1575-1601.
- Ross S.M., *Introduction to probability models*. Boston, Massachusetts, U.S.A., Academic Press, 2007.
- Son S.Y., Olsen T.L., Yip-Hoi D., *Economic Benefits of Reconfigurable Manufacturing Systems*. Proceedings of the 2000 Japan-USA Symposium on Flexible Automation. Ann Arbor, Michigan, U.S.A., 2000.
- Trigeorgis L.A., *Log-Transformed Binomial Numerical Analysis Method for Valuing Complex Multi-Option Investments*. The Journal of Financial and Quantitative Analysis, Vol. 26 (3), 1991, pp. 309-326.
- Urbani A., *Life Cycle Cost Calculation for Manufacturing Systems by Means of Reconfigurability Analysis*. In Dashchenko A.I., *Reconfigurable Manufacturing Systems and Transformable Factories*. Springer, Berlino, Germania, 2006, pp. 643-658.
- Yeo K.T., Qiu F., *The value of management flexibility - a real option approach to investment evaluation*. International Journal of Project Management, Vol. 21 (4), 2003, pp. 243-250.

Capitolo IV

GENERAZIONE ED EVOLUZIONE DELLE FAMIGLIE DI PARTI

Nel proporre una definizione esaustiva di RMS, si è fatto riferimento ad un insieme di caratteristiche chiave in grado di favorire il processo di continuo adattamento del sistema alle esigenze espresse dal mercato. Una variazione di queste ultime corrisponde, in definitiva, ad un mutato interesse verso certi tipi di prodotti, specifiche funzionalità o nuove tecnologie e questo influisce sulle politiche e sulle modalità produttive adottate da un'azienda. Una delle alternative a disposizione per abbattere costi e tempi di produzione, è quella di raggruppare i prodotti, e/o le parti che li compongono, in famiglie e, successivamente, riorganizzare intorno ad esse l'intero sistema produttivo. Il concetto, per quanto largamente dibattuto e approfondito perché storicamente legato all'introduzione dei principi della *Group Technology*, si rivela, in veste peraltro rinnovata, quanto mai critico nella progettazione di un RMS.

In questo capitolo, dopo aver sottolineato il legame esistente fra performance offerta da un RMS e corretta progettazione delle famiglie di prodotti, verrà proposta una classificazione delle tecniche esistenti in letteratura che consentono l'identificazione del raggruppamento in famiglie più idoneo. Fra queste verranno individuate quelle che meglio si prestano ad un'estensione dinamica del problema e che quindi potrebbero rivelarsi utili nell'ambito dei sistemi oggetto di studio. A tal proposito, il parallelismo con le discipline evoluzionistiche consentirà l'introduzione di un nuovo strumento per l'analisi dell'evoluzione dell'insieme delle famiglie inizialmente individuate, problema particolarmente sentito nell'ambito dei RMS.

4.1 Mercati e Produzione: il legame offerto dalla riconfigurabilità dei processi produttivi

Dalla definizione e dall'analisi delle caratteristiche che contraddistinguono un RMS, emergono evidenti potenzialità di adattamento che dovrebbero consentire il soddisfacimento delle richieste di mercato in tempi rapidi e a costi contenuti.

Tuttavia, per rendere effettive tali potenzialità è necessario che il collegamento fra mercato e sistema di produzione consenta, in base alle informazioni raccolte, di individuare gli attributi di cui dovrà essere dotato l'RMS, così da disporre dei necessari input al progetto strategico del sistema (Figura 4.1).

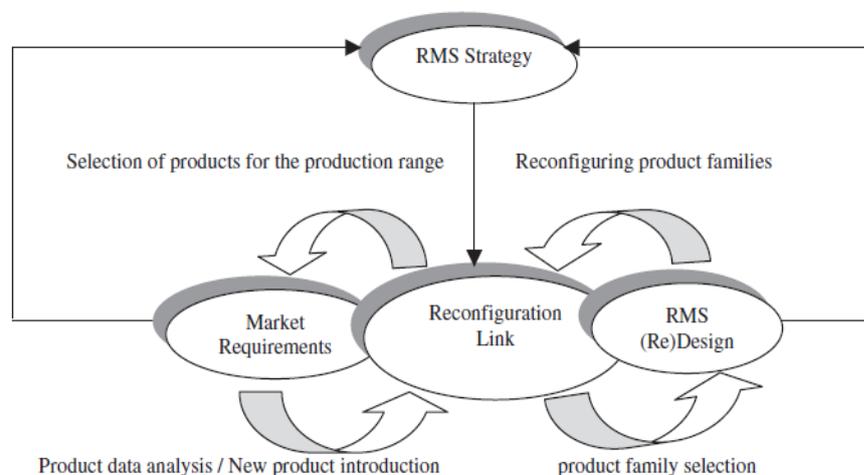


Figura 4.1 – Legame esistente fra richieste di mercato e caratteristiche produttive di un RMS (Abdi, et al., 2004)

Da un punto di vista logico, le tipologie di prodotto richieste sono innanzitutto selezionate in base al *core business* aziendale, alla domanda e alla tecnologia attualmente disponibile per la loro produzione.

Il successivo trasferimento alla funzione di progettazione e sviluppo ha lo scopo di verificare l'esistenza delle necessarie condizioni di compatibilità con i processi produttivi che tipicamente hanno luogo in strutture dotate di caratteristiche modulari (*Design for Reconfigurability*) (Dahmus, et al., 2001; Gu, et al., 2004). Le alternative progettuali disponibili:

- verranno vagliate singolarmente, per individuare le differenti combinazioni di moduli che sarà necessario equipaggiare a bordo delle macchine impegnate nel ciclo produttivo;
- indicheranno, nel complesso, le strategie da adottare al fine di garantire gli obiettivi economici prefissati.

In quest’ottica, le caratteristiche del sistema suggeriscono il raggruppamento dei prodotti (o delle parti da realizzare) in “famiglie” dotate di attributi comuni, cui associare una specifica configurazione delle macchine e quindi del RMS. In questo modo si avrà la possibilità di abbattere i *lead time* di produzione, minimizzando nel contempo i costi di movimentazione dei materiali e quelli legati al set-up delle macchine (*economie di scopo*) (Mehrabi, et al., 2002).

Le informazioni sulle famiglie verranno altresì adoperate per la valutazione delle risorse attualmente disponibili e, grazie ad un’analisi congiunta dei volumi produttivi, forniranno gli spunti necessari per un’*analisi di scalabilità della capacità del sistema* (Asla, et al., 2003).

I dati accumulati verranno adoperati come dato di input per la progettazione strategica del RMS e, dunque, per l’assegnazione delle risorse disponibili.

L’esecuzione di un insieme di verifiche consentirà il necessario feedback per valutare il divario esistente tra richieste e performance offerte dal sistema, al fine di apportare eventuali revisioni ai piani produttivi o alle specifiche di progetto (Abdi, et al., 2004).

Qualsiasi richiesta di un nuovo prodotto da parte del mercato innesca, tuttavia, una revisione del ciclo descritto⁴⁹ e l’assegnazione del prodotto ad una nuova famiglia o ad una già esistente. Nell’eventualità che si renda necessaria la creazione di una nuova famiglia, verrà generata anche una nuova configurazione del sistema da associarle.

⁴⁹ Il procedimento appena descritto, basato sull’analisi dell’evoluzione dinamica delle famiglie e sulla pianificazione dei processi di riconfigurazione, consente, fra l’altro, di massimizzare la riadoperabilità del sistema (Kol, et al., 2005).

4.2 Progettazione strategica di un RMS: il ruolo delle famiglie di prodotti

L'impiego di un RMS è subordinato alla possibilità di sfruttare efficacemente le potenziali *economie di scopo* derivanti dal corretto accorpamento dei prodotti richiesti dal mercato. Considerazioni errate nella fase di assegnazione dei prodotti alle famiglie potrebbero quindi intaccare l'efficienza dei sistemi in questione. Tale considerazione appare evidente se si ripercorre più nel dettaglio il processo logico alla base della progettazione strategica di cui si è accennato in precedenza (Figura 4.2).

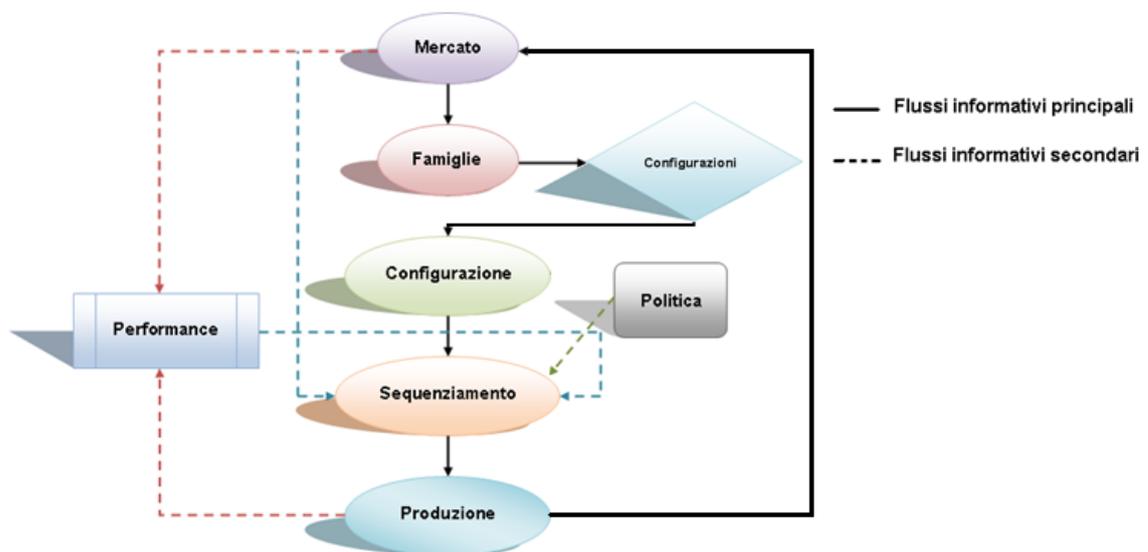


Figura 4.2 – Flussi informativi nella progettazione di un RMS

Il raggruppamento in famiglie dei prodotti avviene in base a “criteri di somiglianza”. Tale raggruppamento influisce sull’insieme delle configurazioni che si rendono disponibili per la produzione di ciascuna delle famiglie (Xiaobo, et al., 2000a). Dall’insieme in questione verranno estratte le configurazioni ottime da implementare praticamente (Xiaobo, et al., 2000b). Informazioni sui volumi di produzione previsti e il ricorso a specifiche politiche di selezione degli ordini, consentiranno di stabilire la sequenza ottima delle configurazioni assunte dal sistema nel tempo (Xiaobo, et al., 2001a). La

valutazione delle performance del sistema⁵⁰ permetterà, invece (Xiaobo, et al., 2001b):

- di apportare le modifiche necessarie in fase di sequenziamento degli ordini;
- di assegnare priorità nel processamento di ciascuna delle famiglie;
- di confrontare politiche di selezione differenti.

Per quel che concerne la relazione esistente fra insieme delle configurazioni ottime del sistema e determinazione delle famiglie, si consideri quanto segue. Detto (Xiaobo, et al., 2000b):

- $M = \{1, 2, \dots, m\}$ l'insieme delle famiglie individuato a seguito delle richieste del mercato;
- $X = (x_1, \dots, x_m)$ il vettore, rappresentativo dello stato del sistema, costituito dal numero di ordini x_i , piazzati per ciascuno dei prodotti appartenenti alla famiglia i ;
- $C_i = \{c_i^1, \dots, c_i^{n_i}\}$ l'insieme delle possibili configurazioni secondo le quali poter realizzare i prodotti appartenenti alla famiglia i ;
- B_i^{51} il numero massimo di ordini che è possibile accumulare per la famiglia i . Un ordine che dovesse arrivare dopo il raggiungimento di tale limite verrebbe rigettato;
- $g(c_i^j, c_k^l)$ il costo di transizione, associato al passaggio da una certa configurazione del sistema ad un'altra;

si supponga che:

- ciascun ordine consista di prodotti appartenenti ad una singola famiglia i ;
- il tasso di arrivo di un ordine appartenente alla famiglia i abbia distribuzione di Poisson con parametro λ_i ;

⁵⁰ In genere determinata in termini di livello di servizio garantito al cliente per ciascuna famiglia di prodotti.

⁵¹ Tali limiti potrebbero essere, ad esempio, calcolati in base a limiti previsti sui tempi di attesa per il completamento del prodotto.

- la configurazione del sistema $c_i^{k_i}$ cambi in base alla politica di selezione dell'ordine da processare;
- ciascuna configurazione del sistema si caratterizzi per una certa velocità di realizzazione del prodotto e per un certo profitto $r_i^{k_i}$;
- il tempo necessario in fase di produzione per soddisfare un generico ordine segua una distribuzione esponenziale, presentando valore medio $\frac{1}{\mu_i^{k_i}}$ nella configurazione del sistema $c_i^{k_i}$;
- il tempo richiesto per realizzare il passaggio da una certa configurazione del sistema ad un'altra sia trascurabile⁵².

Se H_i^j è il tempo necessario per produrre un prodotto appartenente alla famiglia i , quando è stata scelta la configurazione c_i^j , è possibile supporre che il tempo di produzione si distribuisca secondo una funzione di distribuzione $F_{H_i^j}(t)$. Tale funzione è identicamente distribuita al variare della configurazione j scelta ma con valori dei parametri che la caratterizzano differenti. Questo equivale a differenziare le configurazioni in termini di velocità nel realizzare il prodotto in questione.

Allorquando venisse selezionata la famiglia i , in un certo istante t , gli x_i ordini accumulati passerebbero dallo stato “in attesa” allo stato “in esecuzione”, con conseguente aggiornamento del corrispondente vettore di stato del sistema: $X = \{x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_{n-1}, x_n\} \rightarrow X' = \{x_1, x_2, \dots, 0, \dots, x_{n-1}, x_n\}$. Nel caso non ci fossero ordini in portafoglio ($X = 0$) bisognerà attendere l'arrivo di un ordine.

È possibile definire $S = \{X | 0 \leq x_i \leq B_i, \text{ per ogni } i \in M \text{ e } |X| > 0\}$, spazio degli stati, dove $|X| = \sum_{i \in M} x_i$ è il numero totale di ordini corrispondente allo stato X ⁵³.

⁵² Per quanto l'ipotesi possa essere ritenuta accettabile grazie alle caratteristiche proprie di un RMS, appare opportuno indagare a fondo per verificare l'effetto del tempo sul risultato finale.

⁵³ Lo stato $X = 0$ non è incluso nello spazio S perché non compare nessun ordine, quindi nessuna famiglia da processare.

Lo spazio delle azioni di selezione associato allo stato osservato $X (\in S)$ è $D(X) = \{i | x_i > 0, \text{ per ogni } i \in M\}$ ⁵⁴. Inoltre, $|D(X)| = \sum_{i \in M} \delta_i$ è il numero totale delle famiglie che possono essere selezionate se lo stato è X , dove:

$$\delta_i = \begin{cases} 1, & \text{se } x_i > 0 \\ 0, & \text{altrimenti} \end{cases}$$

Si supponga assegnata una *politica di selezione* delle famiglie $P = \{d(X) | X \in S\}$ con $d(X) \in D(X)$, attraverso la quale controllare l'azione del sistema nel periodo di utilizzazione⁵⁵. La configurazione del sistema RMS varia ogniqualvolta viene selezionata una nuova famiglia da produrre; questo determina dei costi di changeover $g(c_i^j, c_k^l)$ che dipendono dalla configurazione corrente c_i^j e da quella successiva c_k^l .

Lo spazio delle soluzioni è $U = C_1 \times \dots \times C_m$. Per ogni $i \in M$ si definisce $s_i = \{X | X \in S \text{ e } d(X) = i\}$ il sotto-spazio di stato di S in cui è stata selezionata la famiglia i . Dunque, allo stato iniziale X , si selezioni la famiglia $d(X) = i$ secondo la politica P . Se $F_{H_i^j}^{(n)}(t)$ è la convoluzione⁵⁶ di n -volte la distribuzione dei tempi di produzione $F_{H_i^j}(t)$, allora $F_{H_i^{k_i}}^{(x_i)}(t)$ è la distribuzione del tempo di produzione per produrre gli x_i prodotti considerati.

Sia $c_i^{k_i} \in C_i$ la configurazione scelta per produrre gli x_i prodotti ordinati e che siano state determinate le configurazioni $\psi = \{c_1^{k_1}, \dots, c_m^{k_m}\}$ per realizzare i prodotti. Dopo aver completato gli x_i , lo stato del sistema diverrà X' . La

⁵⁴ $D(X)$ è quindi un sottoinsieme che eventualmente può essere coincidente con M .

⁵⁵ Si assuma che tale politica consista, ad esempio, nello scegliere di volta in volta la famiglia che presenta il maggior numero di ordini. Tale politica non necessariamente si dimostra in tutti i casi la più efficiente. Tuttavia, per gli scopi perseguiti, ricorrere ad una politica di selezione piuttosto che ad un'altra si rivela ininfluente. Per una trattazione esaustiva circa la scelta della politica di selezione ottima, si consulti (Xiaobo, et al., 2000b).

⁵⁶ Si considerino due funzioni $f(t)$ e $g(t): \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$. Si definisce convoluzione di $f(t)$ e $g(t)$ la funzione $(f * g)(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau)g(t - \tau) d\tau = \int_{-\infty}^{\infty} f(t - \tau)g(\tau) d\tau$. La convoluzione soddisfa le proprietà di commutatività, associatività e distributività.

probabilità di transizione dallo stato X allo stato X' quando la configurazione attuale è $c_i^{k_i}$, $P \{X'|X, c_{d(X)}^{k_d(X)} = c_i^{k_i}\}$, può essere calcolata a seconda che:

1. $|D(X)| > 1$, o, $|D(X)| = 1$ e $|X'| > 1$. In questo caso si ha:

$$P \{X'|X, c_i^{k_i}\} = \int_0^\infty \prod_{j \in M} p_j \{x'_j | x_j, i, t\} dF_{H_i^{k_i}}^{(x_i)}(t) \quad (4.1)$$

dove, $H_i^{k_i}$ indica il tempo necessario per la produzione di un prodotto appartenente alla famiglia i , processata secondo la configurazione $c_i^{k_i}$ e $F_{H_i^{k_i}}^{(x_i)}$ rappresenta la distribuzione del tempo di produzione necessario per processare x_i unità di prodotti appartenenti alla famiglia i . Dato che per gli arrivi si è assunta una distribuzione di *Poisson*, la probabilità di arrivo di $(x'_j - x_j)$ ordini appartenenti alla famiglia j durante il tempo t , quando è stata selezionata la famiglia i , $p_j \{x'_j | x_j, i, t\}$, può essere calcolata come:

per $j \neq i$:

$$p_j \{x'_j | x_j, i, t\} = \begin{cases} \frac{(\lambda_j t)^{x'_j - x_j}}{(x'_j - x_j)!} e^{-\lambda_j t} & \text{se } x_j \leq x'_j \leq B_j - 1 \\ \sum_{k=B_j - x_j}^\infty \frac{(\lambda_j t)^k}{k!} e^{-\lambda_j t} & \text{se } x'_j = B_j \\ 0, & \text{altrimenti} \end{cases} \quad (4.2)$$

per $j = d(X) = i$:

$$p_j \{x'_j | x_j, i, t\} = \begin{cases} \frac{(\lambda_j t)^{x'_j}}{(x'_j)!} e^{-\lambda_j t} & \text{se } 0 \leq x'_j \leq B_j - 1 \\ \sum_{k=B_j}^\infty \frac{(\lambda_j t)^k}{k!} e^{-\lambda_j t} & \text{se } x'_j = B_j \\ 0, & \text{altrimenti} \end{cases} \quad (4.3)$$

2. $|D(X)| = 1$ e $|X'| = 1$ (supponendo $x'_j = 1$). In questo caso si ha:

$$P \{X'|X, c_i^{k_i}\} = P^a \{X'|X, c_i^{k_i}\} + P^b \{X'|X, c_i^{k_i}\} \quad (4.4)$$

dove:

$$P^a \{X'|X, c_i^{k_i}\} = \frac{\lambda_l}{\sum_{n \in M} \lambda_n} \int_0^\infty \prod_{j \in M} e^{-\lambda_j t} dF_{H_i^{k_i}}^{(x_i)}(t) \quad (4.5)$$

e

$$P^b \{X'|X, c_i^{k_i}\} = \int_0^\infty (\lambda_l t) \prod_{j \in M} e^{-\lambda_j t} dF_{H_i^{k_i}}^{(x_i)}(t) \quad (4.6)$$

Più nello specifico, $P^a \{X'|X, c_i^{k_i}\}$ indica la probabilità che nessun ordine arrivi durante la realizzazione delle x_i unità di prodotto della famiglia i e l'ordine successivo appartenente alla famiglia l arrivi solo quando termina la produzione; $P^b \{X'|X, c_i^{k_i}\}$, indica la probabilità che nessun ordine della famiglia l giunga durante la produzione delle x_i unità di prodotto della famiglia i .

Nell'insieme delle configurazioni ψ , la matrice delle probabilità di transizione di stato è $Q(\psi) = \left(P \{X'|X, c_d^{k_d(X)}\} \right)_{X, X' \in S}$. Detto A l'intervallo di tempo che intercorre nel passaggio dallo stato X allo stato X' , la sua distribuzione è data da:

1. Se $|D(X)| > 1$, o, se $|D(X)| = 1$ e $|X'| > 1$:

$$F_A(t, X' | c_i^{k_i}) = F_{H_i^{k_i}}^{(x_i)}(t) \quad (4.7)$$

2. Se $|D(X)| = 1$ e $|X'| = 1$ (supponendo $x_j' = 1$):

$$F_A(t, X' | X, c_i^{k_i}) = \frac{P^a \{X'|X, c_i^{k_i}\}}{P^a \{X'|X, c_i^{k_i}\} + P^b \{X'|X, c_i^{k_i}\}} \left(F_{H_i^{k_i}}^{(x_i)} * G_l \right)(t) + \frac{P^b \{X'|X, c_i^{k_i}\}}{P^a \{X'|X, c_i^{k_i}\} + P^b \{X'|X, c_i^{k_i}\}} F_{H_i^{k_i}}^{(x_i)}(t) \quad (4.8)$$

Il termine $\left(F_{H_i^{k_i}}^{(x_i)} * G_l \right)(t)$ rappresenta la convoluzione tra il tempo di produzione di x_i unità di prodotto i e l'intervallo di tempo richiesto per l'arrivo di un ordine della famiglia l . Tale tempo può essere calcolato tenendo presente che

la distribuzione dei tempi di interarrivo è di tipo esponenziale $G_i(t) = 1 - e^{-\lambda_i t}$. L'intervallo di tempo tra due azioni di selezione successive $T(t|X, c_i^{k_i})$, quando si sia selezionata la famiglia i allo stato X e la configurazione $c_d^{k_d(X)} = c_i^{k_i}$, ha distribuzione data da:

$$F_T(t|X, c_i^{k_i}) = \sum_{X' \in S} P\{X'|X, c_i^{k_i}\} F_A(t, X' | X, c_i^{k_i}) \quad (4.9)$$

L'intervallo di tempo atteso fra due azioni di selezione successive, $I(X, \psi)$, dato il set di configurazioni Ψ , cioè una volta selezionata la famiglia $d(X)$ allo stato X e scelta la configurazione $c_d^{k_d(X)}$, ha valore:

$$I(X, \psi) = \int_0^\infty t dF_T(t|X, c_d^{k_d(X)}) \quad (4.10)$$

Le transizioni di stato danno vita ad un processo *semi-Markoviano* con distribuzione stazionaria π :

$$\pi(X, \psi) = \frac{\Pi(X) \cdot I(X, \psi)}{\sum_{Y \in S} \Pi(Y) \cdot I(Y, \psi)} \quad (4.11)$$

dove $\Pi = \Pi(X)_{X \in S}$ è il vettore riga estratto da $\Pi = \Pi \cdot Q(\psi)$, con $\sum_{X \in S} \Pi(X) = 1$

Il profitto atteso dalla produzione delle x_i unità è esprimibile come:

$$R(X, \psi) = r_i^{k_i} x_i - \sum_{Y \in S} g(c_i^{k_i}, c_d^{k_d(Y)}) P\{Y|X, c_i^{k_i}\} \quad (4.12)$$

ovvero, come differenza fra ricavo ottenuto dal completamento del compito e i costi attesi di changeover.

Indicando con l_n l'intervallo di tempo dall' n -sima azione di selezione all' $n+1$ -sima, con R_n il profitto ottenuto attraverso il completamento dell' n -simo compito produttivo, il profitto medio atteso è:

$$W(\psi) = \lim_{N \rightarrow \infty} E \left(\frac{\sum_{n=1}^N R_n}{\sum_{n=1}^N l_n} \right) \quad (4.13)$$

Indipendentemente da altre considerazioni che potrebbero discendere dalla formulazione del problema proposta, appare evidente quanto affermato in

principio: il profitto medio atteso generato da un RMS dipende dalla configurazione del sistema scelta che è a sua volta funzione dal raggruppamento dei prodotti effettuato.

4.3 Formazione delle famiglie di prodotti: dalla Group Technology ai RMS

Storicamente, il ricorso a tecniche che consentissero il raggruppamento di prodotti in famiglie per scopi progettuali è da ricondurre all'applicazione dei principi della *Group Technology (GT)* (Burbidge, 1975).

L'identificazione e il successivo raggruppamento delle parti, effettuato sulla base di similitudini di vario genere, consentiva la successiva progettazione di specifiche celle di lavorazione in cui macchine, utensili e postazioni di lavoro erano disposti per rendere efficiente il flusso delle parti attraverso la cella e per minimizzare gli spostamenti infracellulari⁵⁷ (Liao, 2001).

Raggruppando le parti in famiglie, si otteneva un incremento dell'efficienza produttiva in termini di (Goetsch, et al., 2004):

- riduzione dei tempi di set-up;
- standardizzazione dei processi;
- snellimento della programmazione della produzione;
- diminuzione del carico di lavoro gravante sull'operatore;
- diminuzione del tempo impiegato per la progettazione di nuove parti.

Considerazioni dello stesso tipo possono essere fatte anche per un RMS, le cui caratteristiche definiscono implicitamente il problema. In questo caso, tuttavia, i prodotti appartenenti ad una famiglia devono essere dotati di attributi che li rendano compatibili con le caratteristiche del sistema produttivo considerato. A tal proposito, non è difficile estendere quanto detto nel Capitolo II al caso di un prodotto.

⁵⁷ Come sarà meglio specificato in seguito, è anche possibile raggruppare parallelamente le parti in famiglie e le macchine in celle di lavorazione.

La *Modularità* consente di far fronte, attraverso una specifica configurazione del sistema, all'eventuale complessità realizzativa di un prodotto (Galan, et al., 2007; Gershenson, et al., 2003). Può essere definita come il numero di moduli indipendenti, cioè non interagenti in nessun modo, di cui un prodotto è composto. Tale caratteristica consente, fra l'altro, un'elevata personalizzazione tramite l'assemblaggio di moduli funzionali più semplici. Nonostante ciò comporti un incremento del numero di parti che il sistema dovrà trattare, i benefici introdotti emergono:

- nell'abbattimento dei tempi e dei costi di produzione, grazie alla diminuita complessità del prodotto finito;
- nella possibilità di implementare efficaci strategie di organizzazione di prodotti/processi particolarmente complessi.

La possibilità di adoperare alcune parti in più prodotti senza dover per questo adattare la parte al prodotto (*Comunanza*), consente di valutare l'effettivo ricorso alla standardizzazione, con la prospettiva di ridurre il numero totale di parti diverse circolanti nel sistema.

La *Compatibilità* tra prodotti appartenenti ad una stessa famiglia assicura che siano raggruppati prodotti per i quali, ad esempio, sia necessario ricorrere alle stesse risorse operative o che siano realizzati per soddisfare le richieste dello stesso segmento di mercato (Galan, et al., 2007). È un attributo direttamente mutuato dalla concezione tradizionale del raggruppamento in famiglie e riassume le considerazioni tecniche, operative ed economiche effettuate in quel contesto.

Inoltre, quanto più un prodotto è riposizionabile all'interno dell'insieme delle famiglie individuato⁵⁸, con revisioni minime del progetto, tanto più il prodotto è *Riadoperabile*.

Infine, poiché un RMS è progettato per produrre un numero sufficientemente elevato di famiglie di prodotti, un fattore chiave per la loro determinazione diviene la *Domanda* delle parti. A ben pensarci, sebbene tale caratteristica possa

⁵⁸ Il discorso rimane valido anche in caso di riorganizzazione delle famiglie in caso di introduzione di nuovi prodotti o varianti di prodotti già in catalogo.

essere ritenuta destabilizzante⁵⁹, è altrettanto vero che il raggiungimento di un valore minimo del volume complessivo della domanda rende conveniente il processo di riconfigurazione del sistema e che, contemporaneamente, prendere in carico commesse di dimensioni troppo consistenti potrebbe ritardare i tempi di consegna di altri ordini in portafoglio (Galan, et al., 2007; Xiaobo, et al., 2000a).

4.4 Tecniche di raggruppamento

Come detto, i sistemi di produzione di tipo cellulare hanno, per primi, consentito l'abbattimento dei costi di produzione, puntando sulla costruzione di cicli comuni per la realizzazione di prodotti differenti, piuttosto che sul conseguimento di adeguati volumi di un singolo, specifico prodotto, così come accadeva con le linee dedicate di produzione⁶⁰ (Figura 4.3).

Il fatto che tali sistemi puntino su *economie di scopo* piuttosto che su *economie di scala*, li rende, in alcuni aspetti, simili ai RMS. Proprio in virtù di tali analogie, se si tengono presenti le caratteristiche di prodotto illustrate nel paragrafo precedente, è possibile provare ad estendere le tecniche di raggruppamento dei prodotti adottati nei CMS (*Cellular Manufacturing Systems*) al caso dei RMS, piuttosto che prevederne di specifiche.

⁵⁹ Le fluttuazioni della domanda potrebbero determinare la necessità di rivedere l'organizzazione in famiglie più frequentemente di quanto non lo si debba fare se non fosse considerata fattore d'aggregazione.

⁶⁰ In realtà, il volume di produzione rimane sempre il vero fattore discriminante. La costruzione di cicli di produzione quanto più simili possibile, infatti, consente di prendere in considerazione il volume della domanda relativo alla famiglia piuttosto che quello, ben più esiguo, relativo alla singola parte della famiglia.

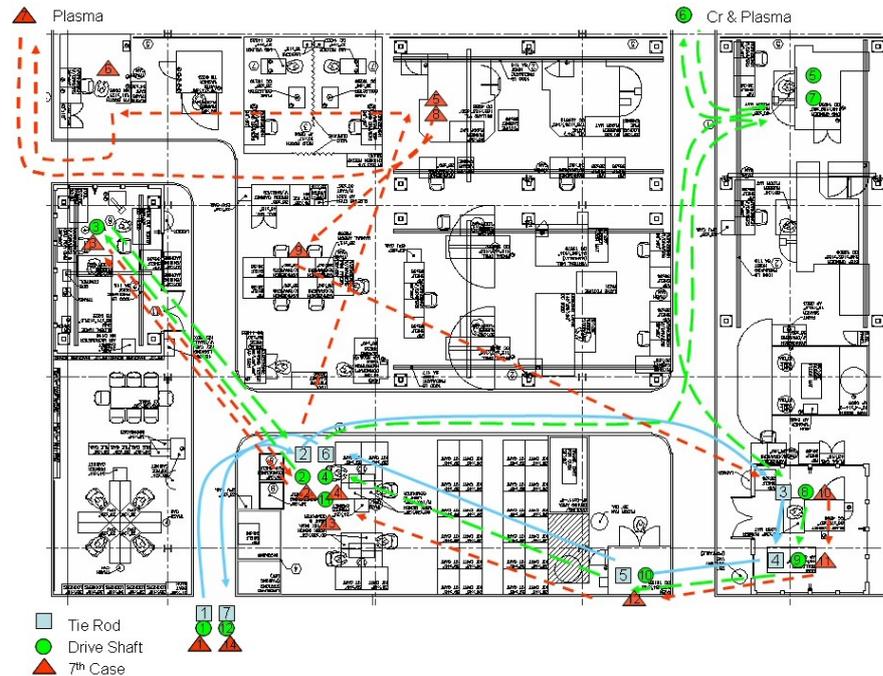


Figura 4.3 – Organizzazione cellulare di un sistema per la produzione di televisori CRT/Plasma con relativi flussi di prodotto⁶¹

Nell’ambito delle applicazioni industriali della GT, in particolare, è possibile rintracciare in letteratura quattro approcci al raggruppamento delle parti in famiglie, ognuno dei quali richiede specifiche competenze o un certo grado di esperienza pregressa:

- *Ispezione visiva* - È il criterio più semplice e meno sofisticato, consiste nell’esaminare i vari prodotti, fotografandoli e/o ricorrendo a rappresentazioni grafiche, per poi raggrupparli in famiglie in base alle caratteristiche in comune;
- *Classificazione e codifica* - I vari progetti e/o caratteristiche concernenti il processo produttivo delle parti, sono identificate, catalogate e collegate ad un codice numerico, al fine di raggruppare i pezzi in famiglie ricorrendo a specifiche funzioni matematiche (Goetsch, et al., 2004);
- *Analisi del flusso di produzione* - Impiega le informazioni riguardo i processi produttivi delle parti per costruire una matrice macchina -componente che, sostanzialmente, rappresenta il percorso della

⁶¹ Disponibile on-line all’indirizzo: www.resourcesystemsconsulting.com/blog/wp-content/photos/.

parte all'interno del processo produttivo (organizzato in celle). In base a questi dati, si usano specifici *algoritmi di clustering* per formare le famiglie (King, 1980; Chandrasekharan, et al., 1987; Sarker, et al., 1999). In questo caso, com'è facile intendere, vengono prima organizzate le celle di lavorazione e successivamente avviene la definizione delle famiglie.

- *Programmazione matematica.* Prevede il ricorso a vari algoritmi di calcolo per determinare le famiglie in base a somiglianze geometriche e di processo delle parti. In questi casi si fa largo ricorso ad algoritmi basati su *Logica Fuzzy* (Liao, 2001; Su, 1995) per tener conto delle incertezze nel processo di classificazione.

Più nello specifico, in Figura 4.4 viene suggerita una possibile classificazione delle tecniche esistenti in letteratura per la formazione delle famiglie di prodotti/parti o per la formazione delle celle di produzione.

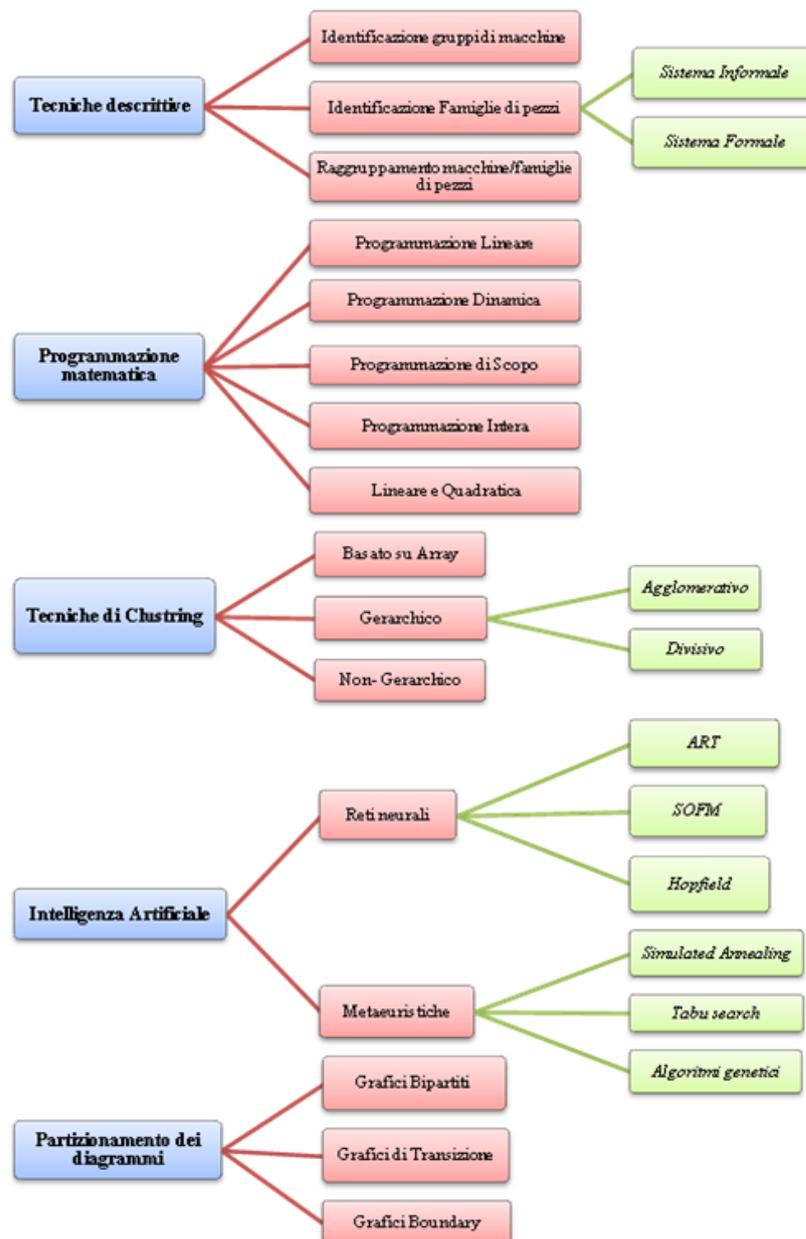


Figura 4.4 – Classificazione delle tecniche adoperate per la formazione delle celle e delle famiglie di prodotti/parti⁶²

4.4.1 Tecniche descrittive

Le tecniche di tipo descrittivo possono essere raggruppate in tre macrocategorie (Selim, et al., 1998):

- Identificazione dei gruppi di macchine da organizzare in celle di produzione (*MGI*);

⁶² Adattata da (Galan, et al., 2007).

- Identificazione delle famiglie di prodotti (*PFI*);
- Raggruppamento simultaneo delle macchine e delle famiglie di prodotti (*PF/MG*).

I metodi *MGI*, prevedono una prima fase in cui le macchine sono raggruppate in base ai flussi fisici delle parti/prodotti da produrre, noto il ciclo produttivo di ciascuna parte/prodotto, e una seconda fase in cui le parti/prodotti sono assegnati ai gruppi di macchine precedentemente individuati.

Procedimento speculare è proposto nei *PFI* in cui si identificano prima le famiglie e in base a queste si realizza il raggruppamento delle macchine. In questo caso è possibile ricorrere a *sistemi di codifica informali* e *sistemi di codifica formali*.

Un esempio di *sistema informale* è costituito dalla semplice ispezione visiva. Tali sistemi, in effetti, risentono eccessivamente del giudizio personale, non consentono una classificazione oggettiva delle parti/prodotti (Galan, et al., 2007) e si dimostrano comunque efficienti solo nel risolvere problemi in cui la varietà delle macchine/prodotti considerati sia contenuta (Heragu, 1994).

I *sistemi formali* prevedono, invece, una codifica della forma, dimensioni, materiali adoperati, etc... e una successiva classificazione delle parti/prodotti in base a tali caratteristiche. In questo caso sorgono spesso problemi opposti a quelli tipici dei sistemi informali perché il ricorso a sistemi di classificazione computerizzati, particolarmente rigidi, pone problemi di scarsa robustezza del metodo: assegnare un prodotto ad una famiglia piuttosto che ad un'altra potrebbe comportare il conseguimento di soluzioni produttive estremamente differenti, in termini di collocazione fisica delle macchine e costi da sostenere.

I metodi *PF/MG* consentono di identificare contemporaneamente le famiglie e i gruppi di macchine da adoperare. In (Burbidge, 1963) viene proposto uno dei primi approcci descrittivi *PF/MG* in riferimento al *criterio dell'analisi del flusso di produzione (PFA)*. Vengono prese in considerazione solo informazioni provenienti dai fogli di percorso adoperati per formare le celle, trascurando tutte le altre caratteristiche geometriche o costitutive delle parti, perché non

considerate utili allo scopo (Burbidge, 1992). Particolarmente diffuso è il ricorso alle tecniche di *sintesi nucleare*, nelle quali le celle di produzione sono create intorno a “macchine chiave” (Selim, et al., 1998) dopo aver effettuato un *analisi del flusso dei componenti (CFA)* (El-Essawy, et al., 1972).

4.4.2 Programmazione Matematica

Gli approcci basati su *programmazione matematica* possono essere classificati in quattro gruppi principali, a seconda della formulazione del problema:

- Programmazione lineare;
- Programmazione dinamica;
- Programmazione di scopo;
- Programmazione intera lineare e quadratica.

In generale, gli approcci adoperati più di frequente prevedono il ricorso a modelli basati su *Logica Fuzzy* o estensioni di quelli adoperati per risolvere problemi di localizzazione pesata⁶³ (*P-median problems*).

Questi ultimi, in particolare, sono sviluppati nell’ambito della *ILP (Integer Linear Programming)* e sono adoperabili in un qualsiasi problema di clustering (Mulvey, et al., 1979; Klastorin, 1985). L’estensione al caso della formazione delle famiglie di parti avviene specificando alcuni elementi rappresentativi del numero delle famiglie da formare (*mediani*⁶⁴), attorno ai quali avrà luogo l’addensamento (Kusiak, 1987). Il modello risolve sequenzialmente il problema della formazione delle famiglie e quello relativo alla formazione delle celle, sulla base delle informazioni contenute nella matrice d’incidenza macchina-pezzo. Il valore assunto dalla funzione obiettivo, tuttavia, è particolarmente sensibile alla variazione dei mediani presi in considerazione. Tale dipendenza può essere

⁶³ Senza scendere nei dettagli, il problema della localizzazione pesata consiste nel determinare la localizzazione di P facility il cui scopo è soddisfare le richieste di una popolazione di clienti (N), in modo da minimizzare la somma delle distanze (opportunamente pesate) fra ciascun centro di domanda e ciascuna facility. Matematicamente si tratta di individuare una specifica configurazione fra le $\binom{N}{P} = \frac{N!}{P!(N-P)!}$ disponibili.

⁶⁴ Calcolati a partire dal numero totale di parti.

eliminata ricorrendo a modelli di programmazione matematica quadratica intera (*QIP – Quadratic Integer Programming*), così come esposto in (Wang, 2003). Modelli come quelli proposti in (Kusiak, 1987) hanno, infatti, funzioni obiettivo lineari ma matrici dei coefficienti dei vincoli non *totalmente unimodulari*⁶⁵. Diversamente, la matrice dei vincoli propria di modelli *QIP* è totalmente unimodulare ma la sua funzione obiettivo non è lineare. Risultati particolarmente soddisfacenti, in termini di soluzioni ottenute e difficoltà computazionale, possono essere ottenuti combinando i due approcci. In pratica, si procede ad una selezione di n parti (macchine) diverse che fungeranno da gruppo rappresentativo. Poiché l'obiettivo della formazione delle famiglie di parti (celle di lavorazione) è quello di raggruppare parti (macchine) con differenti caratteristiche progettuali (caratteristiche di produzione) per dar vita a gruppi disgiunti, è ragionevole supporre che le n parti (macchine) possano rappresentare n gruppi differenti. Invece di ricorrere ai mediani, sono le n parti (macchine) a rappresentare, ciascuna, un singolo gruppo. I vantaggi conseguibili con questo approccio sono:

- l'esistenza certa di una soluzione ottima al problema (totale unimodularità della matrice dei coefficienti dei vincoli);
- il numero delle variabili decisionali e lo sforzo computazionale necessario sono sufficientemente contenuti.

Nell'ambito della programmazione dinamica, invece, è particolarmente diffuso il ricorso a diverse forme di logica polivalente, al fine di consentire un'analisi più rigorosa delle aree di sovrapposizione nella classificazione delle parti/macchine. Le tematiche sono esaustivamente trattate in (Barajas, et al., 2009), dove viene effettuata un'indagine sull'utilizzo di vari tool basati sui principi della

⁶⁵ Una matrice totalmente unimodulare è una matrice (non necessariamente quadrata) per la quale ogni minore non singolare è unimodulare. Ne consegue che ogni suo elemento vale 0, +1 o -1. Un programma intero nel quale la matrice dei vincoli è totalmente unimodulare può essere risolto efficientemente, in quanto il suo rilassamento lineare (rilassamento LP) porta a soluzioni intere. Ogni problema di flussi su una qualsivoglia forma di rete comporta una matrice dei vincoli con le proprietà tipiche di tali tipi di matrice e, per questo motivo, ogni problema di flusso di rete con capacità intere limitate possiede una soluzione ottimale intera (Heller, et al., 1956).

Logica Fuzzy, sulle fasi del processo di progettazione delle famiglie che più diffusamente sono interessate dal ricorso a tali strumenti e sui vantaggi che è possibile conseguire grazie al loro utilizzo.

Gli approcci basati su programmazione matematica sono particolarmente complessi e, soprattutto, per quanto siano in grado di fornire la soluzione ottima al problema, soffrono dell'imposizione di ipotesi talvolta restrittive se l'obiettivo è quello di applicarli in contesti produttivi reali.

4.4.3 Analisi dei Cluster

Grazie a tali tecniche è possibile individuare gruppi di parti/prodotti tali da massimizzare il grado di similitudine all'interno del cluster e, contemporaneamente, minimizzare quello fra parti appartenenti a cluster differenti. Possono essere classificati in tre categorie:

- *Clustering basato su array*. Le macchine vengono assegnate ai gruppi e i pezzi alle famiglie riordinando le righe e le colonne di una matrice del tipo macchina - pezzo (*matrice di incidenza*), dove il valore del generico elemento a_{ij} è 1 se la macchina i opera sul pezzo j , 0 altrimenti. L'algoritmo *BEA (Bond-Energy Algorithm)* punta, a seguito di successive riorganizzazioni, alla determinazione di una matrice diagonale a blocchi, massimizzando specifici parametri, quali l'efficacia del raggruppamento proposto (McCormick, et al., 1972). Nel *ROC (Rank Order Clustering)*, proposto per la prima volta in (King, 1980) e successivamente esteso per risolvere problemi su vasta scala in (King, et al., 1982), viene assegnato un peso ad ogni riga e colonna della matrice d'incidenza. Successivamente, si cerca di allocare le macchine alle celle e i pezzi alle famiglie, ridisponendo le righe e le colonne per valore discendente dei pesi, al fine di dar vita ad una matrice diagonale a blocchi in cui appaiano evidenti i differenti cluster. L'algoritmo, in specifiche condizioni, potrebbe non fornire la soluzione ottima. In (Chandrasekharan, et al., 1986a), tuttavia, ne viene sviluppata una versione modificata (*MODROC*)

che consente un'identificazione oggettiva delle celle/famiglie, incorporando un metodo d'analisi del tipo "block and slice"⁶⁶ e una clusterizzazione di tipo gerarchico.

- *Clustering di tipo gerarchico.* In questo caso viene effettuata una sorta di suddivisione della matrice di incidenza in celle, che verranno a loro volta suddivise fino ad ottenere gruppi non ulteriormente partizionabili. Al crescere del grado di somiglianza delle parti/prodotti appartenenti alla cella individuata, crescerà anche il numero di famiglie considerate e, quindi, diminuirà il volume della domanda caratterizzante la singola famiglia. L'analisi, in definitiva, si traduce in considerazioni circa quest'ultimo punto. Le classificazioni gerarchiche sono spesso accompagnate da efficaci rappresentazioni visive (*dendrogrammi*, strutture ad alberi invertiti, Figura 4.5) che mostrano i diversi raggruppamenti (parti/prodotti o gruppi di macchine) che possono essere formati in base alla somiglianza delle parti/prodotti nella famiglia (o macchine nelle celle);

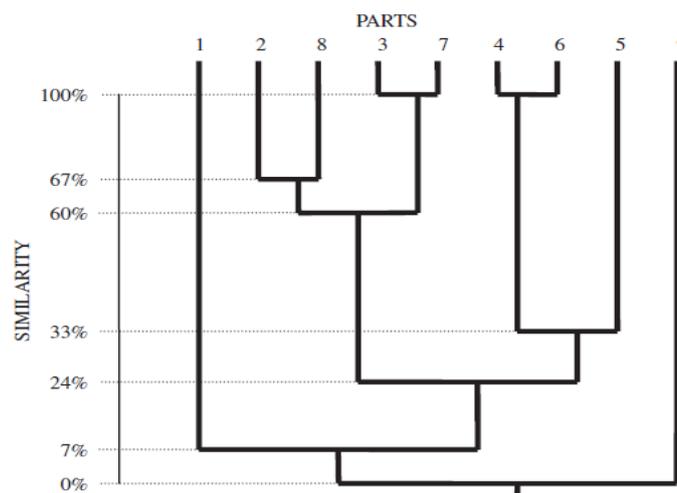


Figura 4.5 –Esempio di dendrogramma (Galan, et al., 2007)

⁶⁶ Una volta identificato nell'angolo in alto a sinistra della matrice riordinata un blocco contenente tutti 1, le colonne appartenenti al blocco vengono rimosse e, successivamente, la matrice troncata viene riadoperata nell'algoritmo (Chandrasekharan, et al., 1986a).

Le tecniche di clustering gerarchico possono essere ulteriormente suddivise in *metodi agglomerativi* e *divisivi*. Nelle tecniche agglomerative si ipotizza che, inizialmente, ogni cluster contenga un singolo elemento; ad ogni passo vengono fusi i cluster che presentano più elevato valore di somiglianza fino ad ottenere cluster di dimensioni più consistenti e che risultino sufficientemente distanti fra loro (Sarker, et al., 1999). Naturalmente, è necessario misurare il grado di somiglianza fra cluster e scegliere, in alcuni casi, i punti iniziali dai quali dar luogo ai primi processi di fusione. Nelle tecniche divisive, invece, lo spazio delle soluzioni è inizialmente costituito da un singolo cluster contenente tutti gli elementi oggetto di ripartizione. Il cluster verrà suddiviso in due parti in base al valore assunto da una specifica funzione che tiene normalmente conto della somiglianza degli elementi presenti nei sottocluster figli. Ad ogni passo verrà selezionato, uno specifico cluster che sarà nuovamente oggetto della suddivisione di cui sopra. In generale, viene fissata una popolazione minima al di sotto della quale il cluster non può, o non conviene, venga ulteriormente suddiviso (Vakharia, et al., 1995);

- *Clustering di tipo non gerarchico*. Sono tecniche iterative che, in genere, producono un numero di cluster più consistente di quello effettivamente necessario. Hanno inizio a partire da una ripartizione casuale delle informazioni circa i prodotti e le macchine, per poi procedere ad una loro riorganizzazione basata sui tradizionali criteri di massimizzazione della somiglianza all'interno del cluster. L'arbitrarietà insita nella determinazione della partizione iniziale influenza notevolmente la possibilità di raggiungere soluzioni ottime; per tale motivo la procedura deve essere ripetuta più volte, partendo da differenti partizioni iniziali. Tra questi vale la pena ricordare *ZODIAC* sviluppato in (Chandrasekharan, et al., 1987) e *GRAFICS* sviluppato in (Srinivasan, et al., 1991).

I metodi di clustering gerarchico agglomerativo, per quanto presentino problematiche circa la definizione della funzione di agglomerazione, sono, senza dubbio, i metodi più diffusi in letteratura perché sufficientemente flessibili, precisi e poco esigenti in termini di risorse dedicate.

4.4.4 Tecniche basate su Intelligenza Artificiale

Comprendono il ricorso a:

- *Reti neurali* - Particolarmente diffuse sono le reti ART (*Adaptive Resonance Theory*), SOFM (*Self-Organized Feature Map*) e di Hopfield per la determinazione dei collegamenti parti-macchina e la successiva formazione delle celle;
- *Tecniche Metaeuristiche* - Il problema della formazione delle celle è affrontato tramite *algoritmi genetici*, *tabu search* e *simulated annealing*.

Per quel che concerne l'approccio neurale, il ricorso a reti ART si è progressivamente diffuso a valle dei miglioramenti in termini di sforzo computazionale richiesti apportati dai modelli ART1 e ART2, fino ad arrivare al più recente Fuzzy ART (Figura 4.6), in cui i parametri di somiglianza sono codificati ricorrendo a *Logica Fuzzy* (Burke, et al., 1995). Il modello incorpora un parametro di vigilanza a garantire la stabilità della rete e arriva a convergenza (teoricamente sempre) in tempi sufficientemente rapidi (10 cicli al massimo), garantendo grande flessibilità in termini di rappresentazione degli attributi. Restano, tuttavia, insolute le problematiche relative al possibile conseguimento di scarsi indici di aggregazione, con conseguente proliferazione delle famiglie.

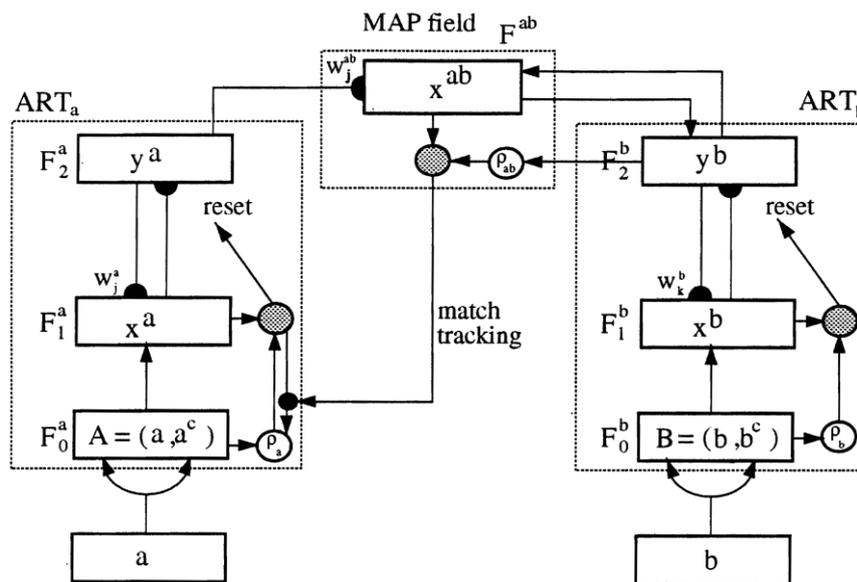


Figura 4.6 - Architettura di una rete ART con moduli fuzzy deputata al riconoscimento delle caratteristiche geometriche di una parte/prodotto (Burke, et al., 1995)

Nelle reti SOFM (Figura 4.7) si sfruttano, invece, le capacità di organizzazione e riorganizzazione dei neuroni che consentono di affrontare problemi di identificazione e classificazione delle parti con un numero estremamente ridotto di neuroni e sinapsi (Kohonen, 1982).

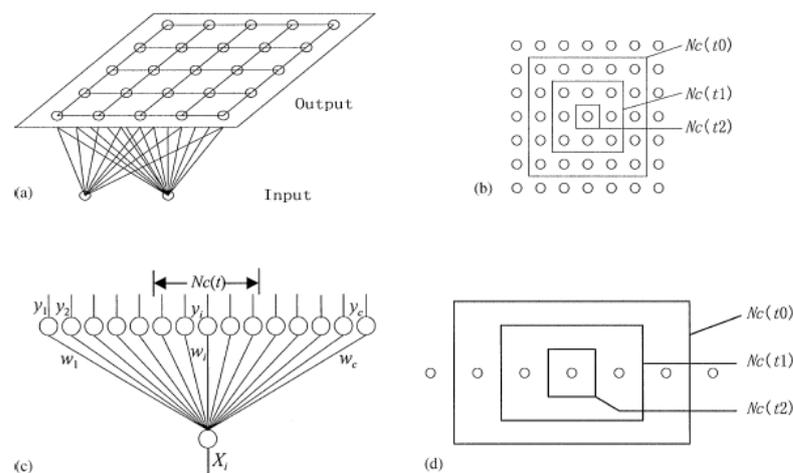


Figura 4.7 – Reti neurali SOFM: a) Rete bidimensionale, b) Scelta dell'area di competenza neuronale per la rete bidimensionale, c) Rete unidimensionale, d) Scelta dell'area di competenza per una rete unidimensionale (Zhang, et al., 2001)

In (Smith, et al., 1996), con il modello *SONN (Self-Organization Neural Network)*, viene superato il limite tipico delle *reti di Kohonen* relativo alla necessità di operare in un ambiente al massimo bidimensionale, ottimizzando ulteriormente la funzione obiettivo grazie a concetti di competizione e inibizione tra i nodi della rete. La convergenza verso lo spazio delle soluzioni fattibili viene facilitata dall'impiego di una specifica *rete di Hopfield*. Tale approccio ibrido viene successivamente implementato in (Jzau-Sheng, 1999) per risolvere alcuni problemi tipici dell'industria automobilistica e i risultati proposti vengono verificati tramite modelli di simulazione.

Le *reti neurali di Hopfield* consentono di risolvere problemi di ottimizzazione minimizzando la *funzione energia di Lyapunov*⁶⁷ (Hopfield, et al., 1985). Per la categoria di problemi affrontati non è possibile dimostrare la convergenza della rete e qualora, nel caso specifico, si ottenesse una soluzione, questa si potrebbe dimostrare infattibile. A tal proposito, in (Jzau-Sheng, 1999) viene proposto un modello di rete neurale (*CFHN, Compensated Fuzzy Hopfield Network*) in grado di affrontare la clusterizzazione delle parti come problema di ottimizzazione in parallelo, ovvero di minimizzazione di un parametro, funzione della minima distanza quadratica euclidea esistente fra l'insieme degli esempi forniti alla rete in fase di addestramento e il relativo centro del cluster da individuare. Nella fase di addestramento si sfruttano i principi della *Logica Fuzzy* consentendo una classificazione della parte in più cluster, con un certo grado di appartenenza. L'aggiunta di un termine di compensazione consente di aggiornare rapidamente la conoscenza della rete in fase di addestramento e incrementa la velocità di convergenza verso punti di minimo della funzione di energia.

I metodi metaeuristici hanno il grosso vantaggio di fornire, in generale, soluzioni che non dipendono dalla configurazione iniziale. Sebbene poco diffusi a causa dello sforzo computazionale richiesto, le soluzioni individuate sono spesso migliori di quelle ottenibili tramite qualsiasi altra tecnica fin qui presentata e, fatto ancor più rilevante, grazie alla possibilità di imporre in modo

⁶⁷ A tal proposito, si consulti (Plumbley, 1995).

particolarmente semplice eventuali vincoli da soddisfare, risultano sempre fattibili.

La *Tabu Search* è una tecnica metaeuristica particolarmente diffusa in letteratura e adatta alla risoluzione di problemi di ottimizzazione combinatoriale (Glover, 1989; Glover, 1990). La ricerca della soluzione ottima avviene esplorando localmente la superficie di risposta, impedendo o penalizzando spostamenti che possano riportare a soluzioni già esplorate. Tali spostamenti, detti “*tabu moves*”, sono contenuti in una specifica memoria, chiamata “*tabu list*”, la cui dimensione varia a seconda del tipo di problema affrontato. In (Aljaber, et al., 1997) viene sviluppato un algoritmo specificatamente pensato per la risoluzione di problemi di formazione delle famiglie di parti e delle celle di lavorazione, in cui i cluster di parti/macchine vengono determinati minimizzando il numero totale di movimenti nelle celle. Il problema viene risolto in due passi successivi:

- il raggruppamento delle parti e delle macchine viene ricondotto alla determinazione di un percorso minimo, costruito sulla base di specifiche somiglianze fra parti e macchine (*Shortest Spanning Path*);
- i singoli percorsi vengono decomposti in sottografici allo scopo di minimizzare il numero totale dei movimenti nelle celle.

Nello stesso articolo, dal confronto fra i risultati ottenibili con vari metodi euristici, si verifica la miglior qualità delle soluzioni fornite dalla tecnica *tabu search*, sebbene i tempi necessari alla risoluzione del problema risultino più elevati.

Le tecniche di ottimizzazione basate su *Simulated Annealing* (SA) prendono spunto dai processi fisici alla base dei trattamenti di tempra: il reticolo cristallino della sostanza da temprare viene modificato tramite un processo di raffreddamento controllato in grado di esaltarne la resistenza meccanica. Con ragionamento analogo, in un problema di ottimizzazione combinatoriale, la soluzione attuale può essere sostituita da una soluzione “adiacente”, scelta con

una probabilità dipendente dalla differenza fra i valori assunti dalla funzione obiettivo e da un parametro globale T (denominato *temperatura*); quest'ultimo diminuisce gradualmente nelle varie iterazioni dell'algoritmo. Procedendo in questo modo è possibile esplorare un'ampia fetta della superficie di risposta del problema nella fase di implementazione iniziale (T grande), per poi effettuare una ricerca più minuziosa, in un intorno della soluzione ottima individuata fino a quel momento, nella fase finale (T piccolo) (Kirkpatrick, et al., 1983). In (Zolfaghari, et al., 1998) viene proposto un algoritmo basato su SA per la formazione delle celle di lavoro, facilmente estendibile al caso della formazione delle famiglie di parti. Più nello specifico viene definito un indice di *efficienza del raggruppamento*⁶⁸ (η):

$$\eta = q\eta_1 + (1 - q)\eta_2 \quad (4.14)$$

dove:

- η_1 è il rapporto fra il numero di uno presenti all'interno delle sottomatrici disposte sulla diagonale della matrice a blocchi, adoperata per individuare le corrispondenze macchina-pezzo, e il numero totale di elementi appartenenti alle stesse sottomatrici;
- η_2 è il rapporto fra il numero degli zero presenti nel resto della matrice a blocchi e il numero totale di elementi posti al di fuori delle sottomatrici di cui sopra;
- q è un fattore di peso compreso tra 0 e 1.

La (2) è successivamente adottata come funzione obiettivo, definendo una funzione di costo da associare allo specifico stato considerato:

$$C(X) = 1 - \eta_g(X) \quad (4.15)$$

dove η_g è l'efficienza del raggruppamento dello stato X , compreso tra 0 e 1, e $C(X)$ è il costo dello stato X , anch'esso compreso tra 0 e 1. Evidentemente,

⁶⁸ Una discussione esaustiva sulle modalità di strutturazione di tali tipi di indici è presente in (Chandrasekharan, et al., 1986a; Chandrasekharan, et al., 1986b).

quanto più la matrice a blocchi è vicina ad una *matrice a blocchi diagonale*⁶⁹, tanto più il termine d'efficienza è alto, tanto più la funzione di costo tende a zero. Gli stati vengono inizializzati individuando una soluzione primitiva fattibile tramite una *rete di Hopfield* che successivamente verrà migliorata tramite SA. Ad ogni iterazione l'algoritmo determina una soluzione prossima a quella di partenza, riassegnando una parte/macchina in virtù dei vincoli imposti. Sono previste condizioni d'arresto sia in termini di numero d'iterazioni, sia in termini di differenza percentuale del costo ottenuto nel tempo dalle soluzioni.

I principi su cui poggiano gli *algoritmi genetici* sono ampiamente tratti in (Holland, 1992). In generale, un certo numero di possibili soluzioni (*individui*) vanno a costituire l'insieme delle soluzioni di partenza (*popolazione iniziale*) che evolverà nel tempo a comprendere soluzioni inizialmente non contemplate. In ciascuna iterazione si opera una selezione di individui appartenenti alla popolazione attuale per generare nuovi elementi; questi andranno a sostituire un pari numero d'individui già presenti⁷⁰ dando vita alla *generazione* seguente.

L'evoluzione è ottenuta attraverso una parziale ricombinazione delle soluzioni: ogni individuo trasmette parte del suo patrimonio genetico ai propri discendenti e la sporadica introduzione di mutazioni casuali nella popolazione di partenza permette di evitare il rapido impoverimento del corredo genetico delle generazioni future.

A valle del processo di evoluzione vengono individuati gli individui più adatti alla risoluzione del problema (*valutazione della funzione di fitness*); questi si candideranno come genitori della successiva evoluzione della specie.

L'operazione di ricombinazione fra individui appartenenti alla stessa generazione è anche nota come *crossover*. La selezione degli individui da ricombinare viene effettuata, in genere, ricorrendo alla tecnica della "*ruota*

⁶⁹ Una *matrice a blocchi*, o *matrice partizionata*, è una matrice rettangolare suddivisibile in sottomatrici chiamate blocchi. Un *matrice a blocchi diagonale* è una matrice a blocchi quadrata, i cui elementi della diagonale principale sono anch'essi matrici quadrate e in cui i restanti elementi sono tutti nulli.

⁷⁰ Tale affermazione non è sempre verificata. Esistono diversi casi di applicazione in letteratura dove la popolazione viene inizialmente fatta crescere fino ad un valore limite per poi rimanere costante nel tempo.

truccata”: ogni individuo ha una probabilità (P_c) di essere selezionato proporzionale al valore della *funzione di fitness* che è in grado di generare. In letteratura è possibile rintracciare varie tecniche di crossing-over. Una delle più semplici (*single point crossing over*) consiste nel combinare due individui in un punto a caso della stringa che li codifica (Figura 4.8). La probabilità che si determini un processo di *mutazione* (P_m) è, invece, definita a priori, assume valori molto bassi (in genere 0,1) e al fine di garantire una maggiore capacità esplorativa dell’algoritmo (problemi di ottimo locale) coinvolge anche cromosomi con valore di fitness alto.

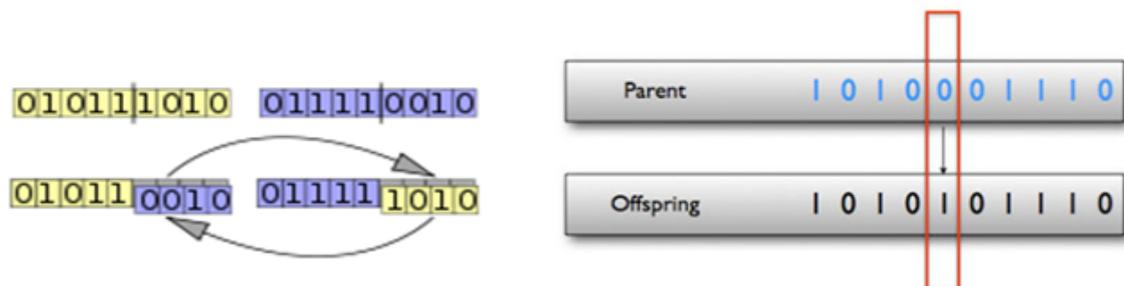


Figura 4.8 - Esempio di crossover e mutazione (Man, et al., 1996)

In problemi di ottimizzazione, non è possibile dimostrare a priori la convergenza di tali tipi di algoritmi verso soluzioni ottime, soprattutto a causa della natura casuale con la quale evolvono e perché le soluzioni spesso dipendono dalla “qualità” della popolazione iniziale (Man, et al., 1996).

Nel caso della generazione di famiglie di parti, un gene identifica una famiglia mentre un cromosoma identifica un insieme di famiglie (Figura 4.9).

[1, 2, 3, 2, 2, 1, 1, 2, 3, 1]

Figura 4.9 – Esempio di assegnazione di 10 parti a 3 famiglie (Jeon, et al., 2006)

La funzione di fitness più diffusamente adoperata prevede la massimizzazione della somma dei coefficienti di somiglianza tra due pezzi (5):

$$Max \sum_i \sum_j S_{ij} X_{ij} \tag{4.16}$$

dove $X_{ij} = 1$ se il pezzo i appartiene alla famiglia j , $X_{ij} = 0$ altrimenti.

In (Zolfaghari, et al., 2003) viene affrontato un problema con 50 macchine e 150 parti. La funzione di fitness è in realtà un indice di efficacia dei gruppi costruiti e prende in considerazione il tempo di produzione e la dimensione dei lotti da adoperare. Con una metodologia analoga in (Gonçalves, et al., 2004) vengono risolti 35 problemi considerati tipici in applicazioni della *GT*. I risultati vengono paragonati a quelli ottenibili tramite sei metodi di ottimizzazione classica, potendosi riscontrare un aumento della qualità della soluzione finale di circa il 12%. In (Jeon, et al., 2006), le parti sono raggruppate in famiglie utilizzando un algoritmo genetico che si basa su coefficienti di somiglianza, implementando celle di lavorazione di tipo flessibile per poter soddisfare i continui cambiamenti della domanda di mercato simulata.

Infine, è opportuno sottolineare che, in generale, l'assegnazione delle macchine alle celle di lavorazione prevede il ricorso a tecniche di ottimizzazione ibrida. Quest'ultimo tipo di soluzione è di largo impiego in letteratura perché consente di migliorare le soluzioni ottenute diminuendo, nel contempo, lo sforzo computazionale richiesto e, quindi, i tempi della simulazione (Ravichandran, et al., 2002; James, et al., 2007).

4.4.5 Grafici Partizionati

La matrice pezzo-macchina può essere rappresentata con l'ausilio di specifici diagrammi. In questo modo la definizione delle famiglie, delle celle di lavorazione e l'assegnazione delle famiglie alle celle sono riconducibili a problemi di *partizionamento dei diagrammi*. A tal proposito è possibile ricorrere a (Kusiak, et al., 1988):

- *Tecniche di bipartizione*. Si individuano due gruppi diversi di nodi di cui uno rappresentativo delle parti/prodotti, l'altro delle macchine che li lavorano (Figura 4.10). Gli archi che collegano i gruppi di nodi indicano quali macchine operano sulle parti/prodotti. L'obiettivo del modello è quello di determinare la configurazione ottima degli archi al fine di

individuare, tramite tagli successivi, sottodiagrammi disgiunti in cui sia massimizzata una funzione di somiglianza;

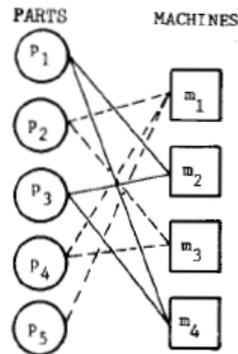


Figura 4.10 - Grafo Bipartito (Kusiak, et al., 1988)

- *Diagrammi di transizione.* Le macchine sono rappresentate tramite nodi e le parti/prodotti come archi che collegano i nodi (o viceversa, Figura 4.11). L'obiettivo è quello di massimizzare il numero totale di componenti fabbricati da ogni gruppo di macchine minimizzando, nel contempo, il flusso di componenti tra gruppi di macchine;

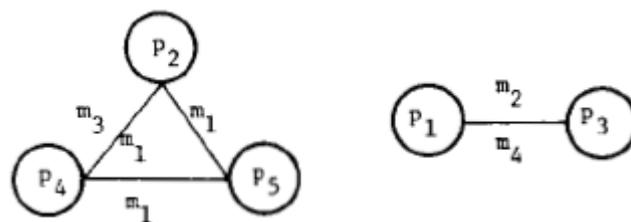


Figura 4.11 - Diagrammi di transizione (Kusiak, et al., 1988)

- *Boundary graphs.* Sono composti da una gerarchia di grafici bipartiti (Figura 4.12).

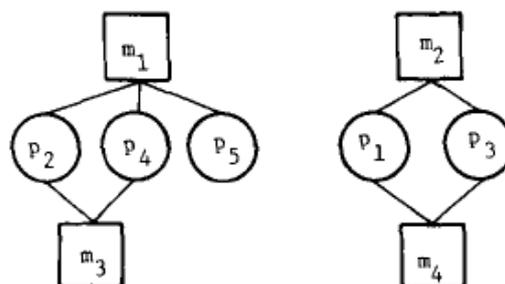


Figura 4.12 - Boundary Graphs (Kusiak, et al., 1988)

Negli approcci di tipo grafico, determinare la macchina o il componente collo di bottiglia è estremamente complicato; tale problema rappresenta una limitazione particolarmente critica per la loro pratica applicazione.

4.5 Tecniche di raggruppamento, estensione ai RMS

Non tutte le tecniche di raggruppamento considerate nel paragrafo precedente si prestano ad un'immediata estensione al caso dei RMS. In effetti, le tecniche di *clustering agglomerativo* e quelle basate sulle *teorie evoluzionistiche*, oltre a consentire una diretta trattazione dinamica del problema, sono le uniche a dimostrarsi adattabili alle caratteristiche possedute dai RMS.

4.5.1 Un Algoritmo di clustering gerarchico per la formazione di famiglie di parti/prodotti destinato a RMS⁷¹

L'applicazione di tali algoritmi prevede, anche in questo caso, la preliminare costruzione della *matrice d'incidenza parte-macchina*. Tuttavia, le caratteristiche dei sistemi produttivi in esame ne influenzano notevolmente i contenuti. Saranno infatti necessarie considerazioni circa modularità, comunanza, compatibilità, riusabilità e domanda dei prodotti a consentirne l'accorpamento.

4.5.1.a Matrice di modularità

La caratteristica *modularità* indica il numero di moduli indipendenti di cui è composto un prodotto, cioè il numero di moduli che non interagiscono in nessun modo fra di loro. Può essere ottenuta dalla distinta base (*BOM*), che ben rappresenta la struttura del prodotto, includendo componenti ed eventuali interfacce di collegamento.

La strutturazione della matrice è un processo a tre tappe. Inizialmente viene generata una matrice prodotto-pezzo secondo l'*albero dei componenti*. In questa matrice, composta da n prodotti, $i = (A, B, \dots n)$, e m parti, $j = (1, 2, \dots m)$, disposti, rispettivamente, sulle righe e sulle colonne, vengono assegnati valori

⁷¹ Cfr. (Abdi, et al., 2004).

agli elementi a_{ij} che la costituiscono, pari ad 1 se il prodotto i richiede il pezzo j , 0 altrimenti.

Successivamente, viene calcolato il *livello di modularità* del singolo prodotto p (M_p), ricorrendo all'espressione (4.17), dove sono considerati il numero di componenti modulari presenti nel prodotto (Ψ_p) e il numero totale di componenti che lo costituiscono (Φ_p):

$$M_p = \frac{\Psi_p}{\Phi_p} \quad \text{con} \quad 0 \leq M_p \leq 1 \quad (4.17)$$

Infine, viene costruita la *matrice di modularità* attraverso la definizione di coefficienti di somiglianza, S_{pq} fra il prodotto p e quello q , calcolati con la (4.18):

$$S_{pq} = 1 - |M_p - M_q| \quad \text{con} \quad 0 \leq S_{pq} \leq 1 \quad (4.18)$$

dove M_p e M_q sono i livelli di modularità dei prodotti p e q , rispettivamente.

4.5.1.b Matrice di comunanza

Si effettua una misura del grado di standardizzazione del prodotto. La matrice può essere usata per identificare i prodotti che condividono alcune parti e per la sua costruzione sono necessarie due fasi. Nella prima fase si sviluppa, ancora una volta, una matrice parte-prodotto, nella seconda, si effettua un'analisi della somiglianza tra coppie di prodotti (p, q) tramite, ad esempio, il *coefficiente di somiglianza di Jaccard* (Anderberg, 1973):

$$J_{pq} = \frac{a}{a+b+c} \quad \text{con} \quad 0 \leq J_{pq} \leq 1 \quad (4.19)$$

dove a indica il numero di parti che i prodotti p e q hanno in comune, b è il numero di parti presenti in p ma non in q , c è il numero di parti presenti in q ma non in p . Se $J_{pq} = 1$ i prodotti sono costituiti dalle stesse parti, se $J_{pq} = 0$ i prodotti sono completamente differenti.

4.5.1.c Matrice di compatibilità

La matrice ha lo scopo di verificare quanto un prodotto sia compatibile con gli altri in caso di raggruppamento. In particolare, si fa riferimento alla⁷²:

- *compatibilità tecnologica*, cioè alle somiglianze tecniche tra i prodotti, in termini di affinità di ciclo produttivo, materiali adoperati, caratteristiche geometriche, dimensioni;
- *compatibilità di marketing*, cioè alle somiglianze in termini di obiettivi di mercato che ci si è prefissi o mercato di destinazione del prodotto.

La compatibilità può essere calcolata adoperando due matrici, riferite alla componente tecnologica e di marketing rispettivamente. La prima dovrebbe essere definita da un team di esperti provenienti dalla produzione, la seconda dovrebbe essere sviluppata dal reparto marketing e tramite sondaggi presso i consumatori⁷³.

Le matrici sono composte da prodotti distribuiti sia sulle righe che sulle colonne. Il singolo elemento a_{ij} indica assoluta incompatibilità fra i prodotti nel caso sia pari a 0, piena compatibilità nel caso in cui sia pari ad 1. È possibile, tuttavia, che gli esperti possono incontrare problemi nella classificazione adoperando una semplice scala a due valori, ecco perché di solito la scala dei giudizi presenta granularità maggiore. Per esempio, se due prodotti sono compatibili per quel che concerne il processo produttivo ma non lo sono per le operazioni di assemblaggio o se sono compatibili in uno specifico segmento di mercato ma non in altri, allora è plausibile aspettarsi valori dell'indice compresi fra 0 e 1.

⁷² In realtà, si potrebbe seguire una strada leggermente diversa da quella prospettata: costruire due gruppi di matrici, uno contenente matrici relative all'area tecnologica, l'altro contenete matrici relative a singole caratteristiche di marketing.

⁷³ Naturalmente, se un nuovo prodotto sostituisce un prodotto preesistente in una famiglia, sarà necessario riformulare entrambe, a causa delle nuove possibili interazioni che il nuovo prodotto può avere con i vecchi. Nel caso di un prodotto innovativo, il giudizio degli esperti del settore marketing diventa particolarmente critico.

4.5.1.d Matrice di riusabilità

Un prodotto che possieda elevate caratteristiche di *riusabilità*, è un prodotto costituito di parti che potranno essere riadoperate, grazie a piccolissimi adattamenti, all'interno del prodotto che lo sostituirà in produzione.

La matrice viene costruita in tre fasi. Nella prima fase si determina la matrice prodotto-componenti, nella seconda si costruisce una matrice i cui coefficienti (R_{pq}) valutano la riusabilità delle parti costituenti il prodotto p in quello q , qualora il prodotto q venisse introdotto nello stesso cluster del prodotto p o, semplicemente, ne fosse prevista la produzione dopo aver terminato la produzione del prodotto p :

$$R_{pq} = \frac{\gamma_{pq}}{\lambda_{pq}} \quad \text{con} \quad 0 \leq R_{pq} \leq 1 \quad (4.20)$$

dove γ_{pq} è il numero di componenti che il prodotto p condivide con il prodotto q e λ_{pq} è il numero totale di componenti del prodotto p .

Da sottolineare che, in generale, è $R_{pq} \neq R_{qp}$ a meno che i prodotti non abbiano lo stesso numero di componenti. Tuttavia, per questioni di coerenza, dovrebbe essere $R_{pq} = R_{qp}$. Per questo motivo, i coefficienti della matrice di riusabilità (Λ_{pq}) vengono opportunamente ricalcolati come media aritmetica di ciascuno degli elementi a_{ij} delle due matrici:

$$\Lambda_{pq} = \frac{R_{pq} + R_{qp}}{2} \quad \text{con} \quad 0 \leq \Lambda_{pq} \leq 1 \quad (4.21)$$

4.5.1.e Matrice della domanda

Uno degli obiettivi tipici della gestione aziendale è quello di garantire la massimizzazione del tasso di utilizzazione della capacità di cui il sistema è dotato. D'altra parte, i RMS sono sistemi le cui caratteristiche, per definizione, dovrebbero garantire il conseguimento di tale obiettivo in modo ancor più deciso dei tradizionali sistemi di produzione. Per farlo, tuttavia, è necessario raggruppare i prodotti che presentano domanda di mercato simile e selezionare macchine che li processino con capacità simili.

Il coefficiente D_{pq} , consente di relazionare i prodotti p e q nei termini proposti, con:

$$D_{pq} = 1 - \frac{|d_p - d_q|}{d_{max} - d_{min}} \quad \text{con} \quad 0 \leq D_{pq} \leq 1 \quad (4.22)$$

dove d_p è la domanda del prodotto p , d_q è la domanda del prodotto q , d_{max} è il massimo valore che può assumere d_p e d_{min} è il minimo valore che può assumere d_p . Analogamente a quanto detto in precedenza per la *matrice di riusabilità*, se deve essere $D_{pq}=D_{qp}$ è necessario effettuare una media aritmetica dei risultati ottenuti in precedenza.

4.5.1.f Relazioni fra le matrici

Gli attributi descritti presentano importanza relativa variabile a seconda delle circostanze: tipologia di prodotto, tecnologie di produzione, esigenze logistiche. Per questa ragione è necessario stabilire delle relazioni che consentano, tramite una matrice dei pesi, di rendere prioritaria una caratteristica piuttosto che un'altra.

Tra i metodi di assegnazione dei pesi esistenti in letteratura, di particolare interesse sono, nel caso considerato, i metodi del punteggio con limite assegnato, della valutazione e della classificazione ordinale⁷⁴ (Hajkowicz, et al., 2000).

Il *metodo del punteggio con limite assegnato* è il metodo più diretto per ottenere le informazioni sui pesi dal punto di vista decisionale, sebbene richieda considerazioni approfondite per ogni criterio preso in considerazione. In questo metodo, un numero predeterminato di punti viene distribuito tra i vari criteri e il punteggio viene messo direttamente in relazione con l'importanza del criterio.

Il *metodo della valutazione* fornisce l'importanza relativa dei criteri attraverso delle scale prestabilite, di granularità variabile⁷⁵. I valori più bassi indicano, naturalmente, importanze minori. Questo metodo consente di mutare

⁷⁴ Fra i metodi sarebbero da annoverare anche quelli di *tipo grafico*. Questi tuttavia assumono importanza marginale in riferimento all'effettivo ricorso che se ne fa in letteratura.

⁷⁵ A tal proposito, particolarmente diffuso è il ricorso alla scala proposta da T.L. Saaty in (Saaty, 1980).

l'importanza di un criterio senza influenzare i pesi di un altro, cosa non consentita nel metodo del punteggio con limite assegnato.

Il *metodo della classificazione ordinale* richiede che i criteri siano classificati in ordine di importanza. Il *metodo di Borda*⁷⁶ è uno dei metodi concepiti con questo scopo. Consiste in una procedura di votazione da parte di diversi esperti; ogni interlocutore estrae dagli n criteri proposti il più importante assegnandogli $n-1$ punti, per poi estrarre il secondo e assegnargli $n-2$ punti e così via. Dopo aver proceduto all'assegnazione dei punti da parte di ciascun esperto, i criteri sono classificati in base al numero di punti accumulati (Tabella 4-1).

Tabella 4-1 – Metodo di classificazione ordinale

Prodotto	DM1	DM2	DM3	Totale	Posizione
A	0	0	1	1	4
B	3	3	3	9	1
C	1	2	0	3	3
D	2	1	2	5	2

In ogni caso, indipendentemente dal metodo adoperato, sarà necessario confrontare a coppie i criteri. A tal proposito, il metodo più efficace, oltre che il più comunemente adoperato in letteratura, è l'*Analytic Hierarchy Process* (AHP) (Saaty, 1980; Ramanathan, et al., 1994; van Den Honert, et al., 1996). L'importanza relativa di un criterio è classificata su una scala in nove punti, che si estende da giudizi di *egual importanza* (1), fino a giudizi di *importanza assoluta* (9) (Tabella 4-2).

I vantaggi nel ricorrere a tale metodo di confronto includono la verifica della coerenza delle valutazioni tramite un indice di inconsistenza e la possibilità, tramite software opportunamente progettati, di effettuare approfondite analisi di sensitività.

La formazione della matrice decisionale finale prevede la valutazione dei cinque attributi chiave; ciascun elemento (a_{ij}) è calcolato come somma dei

⁷⁶ Il metodo di Borda è un sistema di voto ponderato. I suoi primi impieghi sono molto antichi, poiché fu utilizzato dal Senato romano fino all'anno 105. Fu formalizzato nel 1770 da Jean-Charles de Borda nell'opera: *Mémoire sur les élections au scrutin. Histoire de l'Académie Royale des Sciences*, pubblicata a Parigi nel 1781.

coefficienti di ogni matrice degli attributi del prodotto, moltiplicati per i corrispettivi pesi:

$$a_{ij} = \sum_{r \in R} a_{ijr} \sigma_r \quad \text{con} \quad 0 \leq a_{ij} \leq 1 \quad (4.23)$$

dove R è la serie di attributi, a_{ijr} sono i coefficienti nella matrice per ogni attributo, e σ_r è il peso di ogni attributo.

Tabella 4-2 – Scala di Saaty

SCALA PER I CONFRONTI		
Importanza relativa	Definizione	Spiegazione
1	Importanza uguale	Due elementi contribuiscono ugualmente all'obiettivo
3	Importanza moderata	Esperienza e giudizio favoriscono leggermente un elemento rispetto all'altro
5	Importanza forte	Esperienza e giudizio favoriscono fortemente un elemento rispetto all'altro
7	Importanza molto forte	Un elemento è favorito fortemente rispetto ad un altro; la sua dominanza è praticamente dimostrabile
9	Importanza estrema	Un elemento è assolutamente favorito rispetto ad un altro
Le intensità 2, 4, 6 e 8 possono essere usate per esprimere valori intermedi. Intensità di 1.1, 1.2, 1.3 etc... potrebbero essere adoperate per elementi che sono della stessa importanza.		

4.5.1.g Formazione delle famiglie

Una volta effettuato il confronto fra attributi è possibile realizzare il vero raggruppamento in famiglie. La metodologia ALCA (*Average Linkage Clustering Algorithm*) può essere applicata a tutti gli attributi chiave considerati in precedenza (Seifoddini, 1989).

In particolare, si raggruppano i prodotti con i coefficienti di somiglianza più alti, dando vita ad una sottomatrice in cui i prodotti sono raggruppati in famiglie. Le somiglianze tra i pezzi sono ricalcolate con la seguente:

$$S_{ij} = \frac{\sum_{m \in i} \sum_{n \in j} S_{mn}}{N_i * N_j} \quad (4.24)$$

dove i e j sono delle famiglie; m , n parti appartenenti alle famiglie i e j , rispettivamente; S_{ij} è il coefficiente di somiglianza tra i pezzi m e n ; N_i e N_j il numero di parti nella famiglia i e j , rispettivamente.

Iterando il procedimento, tutti i prodotti verranno raggruppati in una singola famiglia ottenendo, quale risultato finale, uno specifico *dendrogramma* (Figura 4.13).

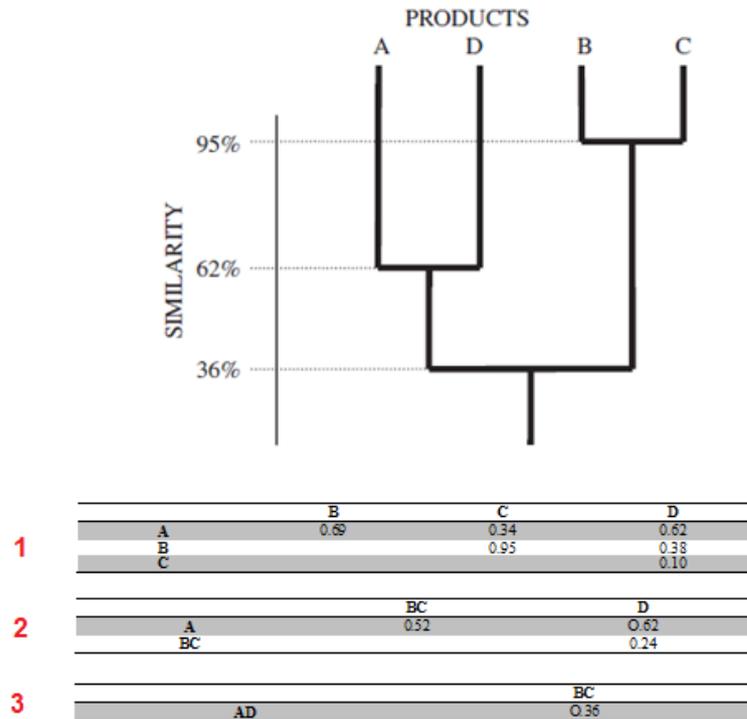


Figura 4.13 – Dendrogramma risultante dal raggruppamento in classi di 4 prodotti (Galan, et al., 2007)

4.5.1.h Selezione della famiglia

A valle del raggruppamento in famiglie, è necessario individuare la specifica famiglia di prodotti/parti da associare alle successive configurazioni assunte dal sistema. Anche in questo caso è possibile ricorrere ad una strutturazione gerarchica del problema così da rendere possibile considerazioni di tipo qualitativo e quantitativo (Figura 4.14).

Il processo di selezione della famiglia avviene tenendo conto di due grandi priorità: necessità di produzione (*MAN*) e necessità di mercato (*MAR*). Tali priorità vengono successivamente decomposte in criteri di valutazione (*livello 2*), ciascuno dei quali può prevedere il ricorso a sottocriteri (*livello 3*).

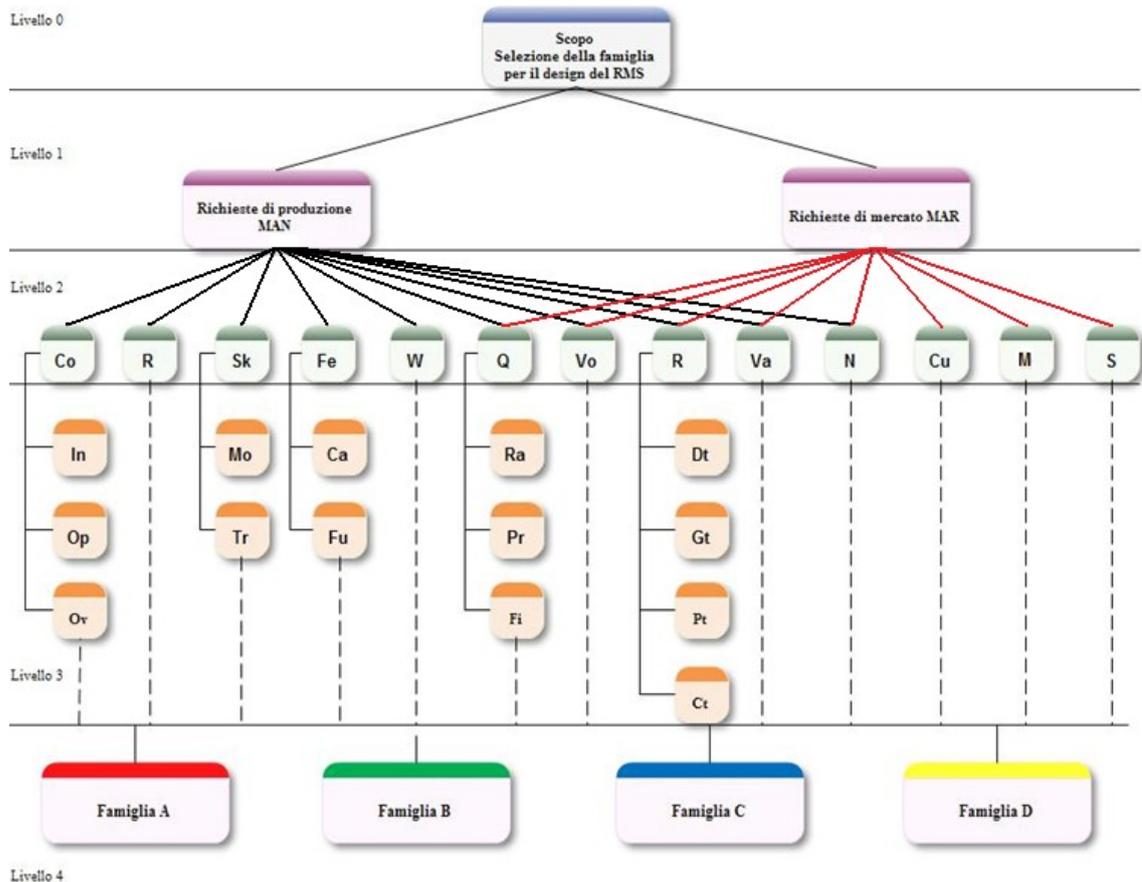


Figura 4.14 – Relazioni gerarchiche per la selezione della famiglia nella progettazione del RMS (Abdi, et al., 2004)

Nel primo gruppo sono annoverati criteri che consentono di prendere in considerazione problematiche tecnico-operative più direttamente collegate ai processi produttivi. In particolare:

1. *Costo (Co)* - Determina per ogni famiglia i costi di produzione, inclusi:
 - *Investimenti (in)*: capitale investito per le attrezzature di produzione come mezzi di movimentazione dei materiali e macchine utensili. La caratteristica di *riusabilità* può ridurre gli investimenti per la riconfigurazione del sistema;
 - *Costi operativi (op)*: costi per l'utilizzo dei macchinari, per la forza lavoro direttamente impiegata sulle linee produttive e nelle funzioni di manutenzione, il trasporto, il controllo di qualità, la sicurezza e l'igiene dei luoghi di lavoro;

- *Costi generali (ov)*: fanno riferimento a costi per l'energia, personale tecnico e amministrativo.

Il criterio potrebbe presentare caratteristiche conflittuali in riferimento alla varietà di prodotti (*Va*) e Riusabilità (*Re*).

2. *Riusabilità (Re)* - Indica il grado con cui sarà possibile utilizzare gli impianti di produzione esistenti per una famiglia di prodotti futura sulla base di analogie operative. Fornisce informazioni circa la capacità dell'intero sistema di produzione di modificare le proprie strutture e funzionalità al variare del prodotto realizzato, garantendo, in ogni caso, elevati valori del coefficiente di utilizzo. Diviene un'aliquota più incisiva allorquando si verifica una revisione del portafoglio di prodotti offerti al mercato a causa dell'introduzione di nuovi codici a causa dei costi di adattamento da sostenere. Fornisce, infine, benefici a lungo termine grazie alla riduzione gli investimenti supplementari per la riconfigurazione del sistema.
3. *Competenze degli operatori (sk)* - Misura l'abilità degli operatori nell'utilizzare le macchine e gli utensili disponibili. Il fattore umano, infatti, si rivela determinante per la qualità delle lavorazioni anche in sistemi altamente robotizzati come quelli considerati. Può comprendere:
 - *Motivazione (mo)*: misura l'attitudine al lavoro dell'operatore relativamente alla specifica famiglia di prodotti che si intende realizzare;
 - *Formazione (tr)*: facilita il processo di apprendimento al variare dei compiti che si determina al momento del processo di riconfigurazione.
4. *Fattibilità (Fe)* - Misura le capacità tecnologiche che il sistema deve possedere per produrre una specifica famiglia. È legato, al variare dei volumi e della varietà di prodotti realizzati, a:

- *Capacità produttiva (ca)*: indica di quanto la capacità produttiva di un RMS deve essere adeguata, al variare dei volumi di produzione;
 - *Funzionalità (fu)*: indica quanto un RMS si adatti rapidamente al mutare delle esigenze operative nel passare dalla produzione di un prodotto ad un altro.
5. *Work-In-Process (W)* - Misura il volume delle parti/componenti di un prodotto presenti a vario titolo all'interno del RMS. Sebbene favorisca la stabilizzazione del processo produttivo, provoca un incremento dei costi di immagazzinamento e gestione del sistema.

Nel secondo gruppo sono considerati criteri relativi ad esigenze di tipo tecnico/economico, legate al soddisfacimento delle richieste del cliente, e di tipo tattico/strategico, legate alle politiche di mercato adottate dall'azienda. In particolare:

1. *Soddisfazione del cliente (Cu)* - Indica il grado di soddisfazione del cliente relativamente ad una specifica famiglia di prodotti. In sostanza, rappresenta la desiderabilità di una famiglia e può dipendere da parametri di progettazione del prodotto (semplicità d'impiego, caratteristiche del design, manutenibilità). Il progetto modulare del prodotto facilita la manutenibilità e l'intercambiabilità dei componenti dei prodotti in base ai cambiamenti delle esigenze del cliente;
2. *Quota di mercato (M)* - Può rappresentare la quota che una specifica famiglia è in grado di assorbire rispetto alla produzione totale dell'azienda considerata o in relazione al mercato pertinente;
3. *Vendite (S)* - Individua il reddito atteso dalle vendite dei prodotti appartenenti ad una famiglia nell'orizzonte di programmazione considerato.

Esistono, inoltre, fattori trasversali che giocano un ruolo determinante nelle scelte effettuate sia in termini tecnici che economici e di mercato. Ci si riferisce, più nello specifico, a:

1. *Qualità (Q)* - Misura l'idoneità dei prodotti e dei parametri funzionali all'interno di una famiglia. Può essere scomposto nei seguenti sottocriteri:
 - *Materie prime (ra)*: valuta la qualità dei materiali acquistati per realizzare i prodotti/parti che costituiscono la famiglia presa in considerazione. Potrebbe tenere conto anche delle operazioni di accettazione e verifica in ingresso al sistema produttivo;
 - *Processo (pr)*: riguarda la qualità delle operazioni svolte durante il processo di produzione dei vari prodotti;
 - *Prodotti finiti (fi)*: valuta la qualità del prodotto finito. Può tenere conto delle fasi di ispezione/collaudato eseguite prima della consegna del prodotto al cliente.
2. *Volume (Vo)* - Rappresenta il volume di produzione dei prodotti all'interno della famiglia sulla base delle richieste del mercato o della produzione totale dell'azienda;
3. *Tempi di risposta (R)* - Indica il tempo di riconfigurazione necessario affinché il sistema sia pronto per realizzare prodotti appartenenti ad una famiglia differente rispetto a quella attualmente in produzione. Oltre ai tempi necessari per l'adattamento dell'ambiente di lavoro e delle singole macchine, comprendono i tempi necessari per la riorganizzazione delle attività produttive e della forza lavoro. Più nello specifico si considerano le seguenti aliquote:
 - tempi di progettazione/sviluppo del prodotto (*dt*);
 - tempi di assegnazione del prodotto ad una famiglia sulla base delle analogie operative (*gt*);
 - tempo di processo (*pt*), compresi i tempi di riorganizzazione di cui si è detto in precedenza e il tempo di produzione vero e proprio;

- tempi di consegna al cliente (*ct*).
4. *Varietà (Va)* - Indica il numero di tipi/modelli di prodotto all'interno di una famiglia nell'orizzonte di programmazione considerato;
 5. *Introduzione di nuovi prodotti (N)* - Relativa all'introduzione di prodotti non precedentemente contemplati in una specifica famiglia e alla riconfigurabilità del sistema di produzione a fronte di tali introduzione.

Naturalmente, l'importanza relativa di ciascun criterio, come già detto per altro in precedenza, può variare da un'azienda all'altra. A tal proposito, la raccolta e la successiva analisi statistica dei dati, possono convalidare la procedura di classificazione adottata.

4.5.2 Uno strumento di indagine basato su teorie evoluzionistiche

Si è avuto modo di rimarcare più volte le criticità che potrebbero sorgere nella progettazione delle famiglie, allorquando si assistesse all'evoluzione della gamma di prodotti. In linea di principio questo si verifica ogniqualvolta alcuni prodotti vengono rimpiazzati da prodotti nuovi, si presenta l'opportunità di offrire al cliente una revisione di un prodotto già esistente, o perché lo stesso prodotto, grazie al progresso tecnologico, può essere realizzato tramite processi produttivi più efficienti che ne mutano le caratteristiche⁷⁷.

Purtroppo, per quanto il problema sia particolarmente sentito, sono ancora carenti le basi scientifiche che possano guidare i progettisti di RMS nelle proprie scelte sulla base dell'evoluzione dinamica delle famiglie, in modo da meglio relazionare i cambiamenti strutturali ed organizzativi del sistema alle esigenze del mercato (Hsieh, 2002).

⁷⁷ Un esempio particolarmente calzante, a tal proposito, è quello dell'elettronica di consumo al servizio della produzione di chip destinati alla produzione di beni appartenenti al settore informatico. Il settore delle schede video, ad esempio, si è dimostrato, negli ultimi anni, particolarmente instabile in termini di soluzioni offerte al pubblico e tecnologie produttive: ogni 6 mesi il layout di una scheda video viene riorganizzato per fornire prestazioni più spinte ed ogni 6 mesi – 1 anno si assiste alla progressiva miniaturizzazione dei chip (si pensi all'imminente passaggio dai 65µm ai 40 µm) che consente una gestione più efficiente dei consumi energetici e della dissipazione di calore a parità di potenza di calcolo.

Da un punto di vista logico, è possibile riferire il termine “evoluzione” tanto ai processi industriali e alle tematiche d’organizzazione del lavoro, quanto al prodotto.

Per quanto attiene al primo caso, il termine è stato inizialmente adoperato per indicare le modalità secondo le quali certe aziende o interi settori produttivi si fossero trasformati nel tempo, mentre oggi viene adoperato (Matta, et al., 1993; Balakrishnan, et al., 2007):

- per indicare il progressivo adattamento di specifiche funzioni aziendali alle condizioni imposte dagli scenari in cui queste si trovano a dover operare⁷⁸;
- per indicare la progressiva maturazione di esperienza in specifici settori produttivi.

In letteratura, si è fatto spesso ricorso alle analogie biologiche per concretizzare gli obiettivi legati alla produzione e ottimizzare con continuità le performance del sistema in un ambiente turbolento (van Brussel, 1999; Hsieh, 2002), derivandone, sebbene talvolta solo per astrazione, diverse forme di sistemi di produzione: *sistemi di produzione olonici*⁷⁹, *sistemi di produzione biologici*⁸⁰ (ElMaraghy, et al., 2008; Ueda, et al., 2000), *fabbrica frattale* (Warnecke, 1993; Warnecke, et al., 1993; Tharumarajah, et al., 1998).

Per quel che concerne il prodotto, il termine evoluzione è adoperato come sinonimo di “innovazione” ed è dunque collegato alla tecnologia e allo sviluppo di nuovi prodotti da offrire al cliente. A tal proposito, due strategie, quella *rivoluzionaria* e quella *evoluzionaria*, sono state oggetto di particolare interesse

⁷⁸ Si pensi, ad esempio, ad uno specifico modello organizzativo adottato inizialmente solo per una divisione e successivamente esteso all’intero sistema.

⁷⁹ Il termine Olone (*Holon*) fu coniato per la prima volta dal sociologo ungherese Arthur Koestler allo scopo di spiegare l’evoluzione dei sistemi biologici e sociali. Questi sistemi tendono a sviluppare, durante la crescita, delle forme intermedie stabili che sono parzialmente autosufficienti. Tuttavia, risulta molto difficile distinguere, in un sistema vivente, tra l’intero corpo del sistema ed una sola delle sue parti. Tale osservazione portò Koestler a proporre la voce “holon”, combinazione del greco “holos”, che significa tutto, con il suffisso “on”, che sta ad indicare una particella o parte infinitesima (Koestler, 1967).

⁸⁰ *BMS - Biological Manufacturing System*, in cui le caratteristiche principali del processo evolutivo non sono legate esclusivamente all’avvenimento del cambiamento di per se, ma sono spesso nell’abilità di preservare e trasferire che si modificano nel tempo.

nella recente letteratura: la prima guidata dalla competizione nei mercati sui quali l'azienda è chiamata ad operare, la seconda tesa a massimizzare gli effetti derivanti dal miglioramento continuo. Quest'ultima, si dimostra più adatta per la gestione di un RMS (ElMaraghy, et al., 2008).

In effetti, gli elementi appartenenti alle singole famiglie sono visti, soprattutto nei sistemi di produzione tradizionali, come dotati di caratteristiche principali comuni assolutamente robuste e, dunque, variabili solo in intervalli particolarmente ridotti. Tale concezione appare assolutamente plausibile in contesti di mercato particolarmente stabili e/o lì dove il progresso tecnologico non sia tale da accorciare in modo drastico la vita commerciale del prodotto. In contesti dinamici, al contrario, si rende necessario modificare in modo continuo il prodotto, tanto da snaturarne le caratteristiche iniziali e generare variazioni sostanziali nei raggruppamenti (*snaturamento delle radici della famiglia*, alcune caratteristiche scompaiono, altre sono sviluppate o introdotte) (ElMaraghy, et al., 2008).

L'entità delle differenze esistenti fra i prodotti appartenenti a generazioni differenti dipende, evidentemente, dal numero e dalla natura delle modifiche. La possibilità di mantenere l'organizzazione attuale è legata allo sviluppo di una chiara differenziazione tra alcuni degli elementi appartenenti alla stessa famiglia, con conseguente decremento del grado di somiglianza secondo le caratteristiche di cui si è detto nei paragrafi precedenti e per il quale, quindi, si renda necessaria una rivalutazione dell'intero insieme di famiglie o di una sua parte (Figura 4.15).

Questa “evoluzione” dell'insieme dei prodotti potrebbe essere causa di gravi inefficienze nel sistema così come progettato inizialmente, soprattutto a causa del legame esistente fra successive configurazioni e caratteristiche iniziali delle famiglie da produrre⁸¹. Per questo motivo se ne rende necessaria una oculata gestione.

⁸¹ Cfr. Paragrafo 4.2.

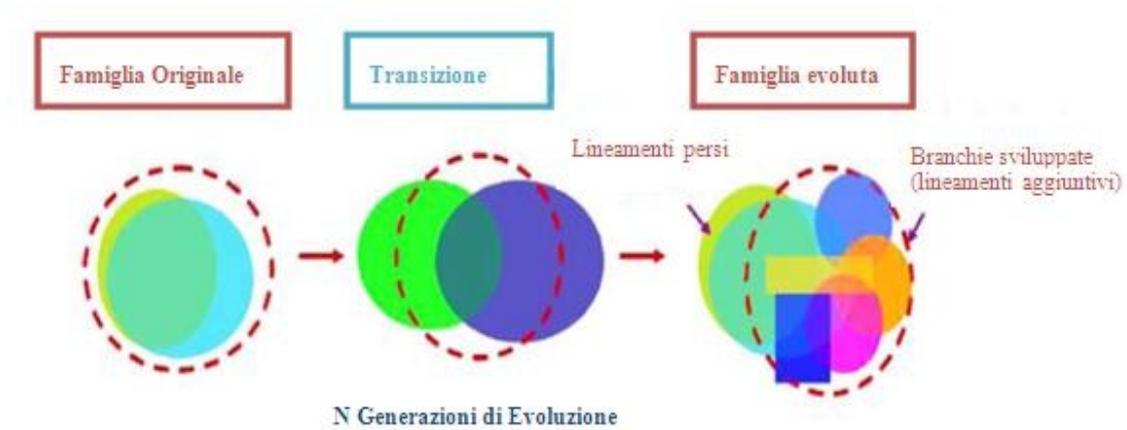


Figura 4.15 - Evoluzione delle famiglie di prodotti (ElMaraghy, et al., 2008)

4.5.2.a Gestire l'evoluzione tramite l'approccio cladistico

Sostanzialmente, l'evoluzione di una famiglia di parti/prodotti prevede una duplice chiave di lettura:

- *Evoluzione temporale.* È un'evoluzione graduale e rappresenta una progressione unidirezionale e spontanea, guidata dalla disponibilità di nuove conoscenze e tecnologie più performanti. La unidirezionalità è dettata da considerazioni logiche elementari: se sono state sviluppate nuove e migliori soluzioni, non c'è motivo di riportare i prodotti allo stato precedente;
- *Evoluzione funzionale.* È causata da rilevanti modifiche nelle richieste provenienti dal mercato, normalmente dettate da specifici fattori. È un'evoluzione selettiva e discreta, sebbene possa essere affrontata tramite revisioni progressive e scadenziante del progetto del prodotto. Questo tipo di cambiamento può essere bi/multi-direzionale a seconda che il nuovo prodotto debba soddisfare diverse richieste funzionali ma non renda necessariamente obsoleto il design precedente.

Fra i vari approcci adoperati nelle scienze biologiche per modellare in questa chiave i processi di evoluzione, uno dei più efficaci è, senza dubbio, quello

fornito dalla Cladistica⁸², che punta al raggruppamento delle entità secondo modalità gerarchiche (*gruppi e sottogruppi discreti*).

Le radici storiche della moderna *tassonomia cladistica* sono tradizionalmente associate all'opera di Willi Hennig che, sebbene non avesse apportato nessun concetto che non fosse già presente nella letteratura scientifica precedente, ebbe il merito di sistematizzare e integrare le idee essenziali in un corpus rigoroso e convincente (Henning, 1965).

Sostanzialmente⁸³, l'approccio si basa sulla determinazione del grado di parentela, ovvero sulla distanza temporale dell'ultimo progenitore comune: animali e piante vengono disposti in gruppi tassonomici monofiletici (*cladi*) comprendenti, cioè, un unico antenato comune e tutti i suoi discendenti. Le relazioni evolutive sono stabilite a partire da caratteri condivisi (*omologie*), presumendo che stiano ad indicare l'esistenza di un antenato comune. Le strutture omologhe, in definitiva, sono quelle che, in diversi organismi, hanno un'origine comune, anche se non necessariamente la stessa funzione. Le omologie, inoltre, si contrappongono alle *analogie* (o *omoplasie*): due caratteri possono essere considerati analoghi quando non hanno un'origine comune ma condividono la stessa funzione⁸⁴.

Individuate le omologie esistenti nel gruppo preso in considerazione, ne viene determinata la *polarità*. Si assume, cioè, che gruppi di organismi di più recente parentela condividano *caratteri omologhi derivati* che sono originati da una *forma ancestrale* presente prima delle diramazioni che hanno dato origine al gruppo di organismi in studio. Per stabilire quale sia la forma ancestrale di un carattere e quale quella derivata si identifica un *outgroup*, cioè un gruppo di organismi esterno al gruppo in studio, perché originato da un antenato più antico, ma più vicino evolutivamente al gruppo in studio rispetto a qualunque altro gruppo esterno. Lo stato del carattere presente nell'*outgroup* viene

⁸² Dal termine greco *klados*, ovvero *ramo*, è anche nota come *sistematica filogenetica*.

⁸³ Per uno studio più approfondito delle tematiche è possibile far riferimento a (Kitching, et al., 1998).

⁸⁴ Si pensi, ad esempio, alle ali degli uccelli e a quelle delle farfalle, svolgono la stessa funzione anche se evolutivamente distinte.

convenzionalmente considerato ancestrale (*plesiomorfo*) mentre lo stato o gli stati dei caratteri presenti nel gruppo in studio vengono definiti caratteri derivati (*apomorfi*). La condivisione di caratteri derivati da parte di un gruppo di organismi viene detta *sinapomorfia*, e le sinapomorfie sono indice di monofilia, cioè portano ad considerare i membri di quel gruppo come derivati da un unico antenato comune.

Volendo ulteriormente precisare, un gruppo si dice (de Queiroz, et al., 1992):

- *monofiletico* (o *olofiletico*), quando comprende un dato *taxon*⁸⁵ ancestrale e tutti i *taxa* che discendono da esso. Nei gruppi monofiletici, come detto, è possibile risalire ad un'unica forma ancestrale che rappresenta il capostipite di tutte le specie di quel gruppo e nel contempo di nessuna altra specie che a tale gruppo non appartiene;
- *parafiletico*, è un gruppo che comprende forme ancestrali ed alcune delle forme discendenti e per questo implica la presenza di “rami potati”. Ad esempio, la classe dei rettili comprende i rettili ancestrali ed i rettili attuali, ma non i mammiferi e gli uccelli, anch'essi discendenti da rettili antichi oggi estinti.
- *polifiletico*, è un gruppo che presuppone almeno due separate origini evolutive e comprende quindi i discendenti di più di una forma ancestrale; i gruppi polifiletici riuniscono *taxa* provenienti da linee filetiche diverse.

Solo i gruppi monofiletici possono essere elevati al rango di *clade* e costituire una categoria tassonomica⁸⁶.

Riepilogando, le operazioni che portano a costruire una classificazione filogenetica sono:

⁸⁵ Dal greco *τάξις*, *taxis*, ovvero ordinamento, è un raggruppamento di organismi reali, distinguibili morfologicamente e geneticamente da altri e riconoscibili come unità sistematica (Mayr, 1996).

⁸⁶ La classificazione si basa, in realtà, sull'assunto che due nuove specie si formino improvvisamente per separazione da un antenato comune anziché attraverso un graduale cambiamento evolutivo (Kitching, et al., 1998). Questa ipotesi risulta, paradossalmente, più forte nello studio dell'evoluzione biologica che nel caso di estensione al sistema produttivo che verrà presentata nel paragrafo successivo.

1. *Delimitazione del problema filogenetico*, cioè delimitazione del gruppo di interesse (*ingroup*);
2. *Individuazione del gruppo di riferimento (outgroup)*. Quest'ultimo deve essere esterno all'insieme dei taxa dell'*ingroup* al cui interno si vogliono stabilire le relazioni di parentela. Gli *outgroup* servono per fornire una radice all'albero, o agli alberi, che saranno ottenuti;
3. *Campionamento dei caratteri*. Scelta e/o individuazione dei caratteri che saranno informativi⁸⁷ in rapporto al problema posto;
4. *Codifica e costruzione della matrice dei caratteri informativi*. Questa codifica comprende innanzitutto l'individuazione delle omologie primarie e la successiva polarizzazione dei caratteri: infine, il frutto di questa analisi è riportato in una matrice di caratteri;
5. *Esplorazione degli alberi possibili*. A un determinato numero di taxa nella matrice corrisponde un numero preciso di alberi possibili. Se i taxa e i caratteri presi in esame sono molti, ci si avvale dell'aiuto di specifici software in grado di elaborare le matrici di interesse;
6. *Adozione di un criterio per la scelta di un albero*. In cladistica quello generalmente adottato è quello della *massima parsimonia*: si sceglie cioè l'albero che richiede il più basso numero di avvenimenti evolutivi per dare ragione degli stati assunti dai caratteri presentati dai taxa a confronto.

L'ipotesi filogenetica classica viene, infine, rappresentata tramite un dendrogramma (*cladogramma*) che illustra i rapporti di parentela fra i taxa considerati; una volta ricostruita la filogenesi, si può costruire uno schema di classificazione, o correggerne uno pre-esistente, in perfetta assonanza con il dendrogramma.

Il cladogramma di Figura 4.16 consente di individuare rapidamente le forme ancestrali di partenza (in rosso) e l'introduzione di caratteri specifici (in blu) che

⁸⁷ Si tenga presente che un carattere viene definito *non informativo* ai fini della classificazione quando non consente la discriminazione voluta fra le classi. Inoltre, non è possibile la formazione di gruppi sulla base di caratteri primitivi condivisi, cioè se pure un carattere primitivo consentisse la discriminazione fra gruppi, tale discriminazione non deve essere considerata ai fini delle analisi svolte.

hanno portato ad una differenziazione delle classi. Si evidenziano inoltre le tipiche caratteristiche dell'*evoluzione parallela*, in cui due specie si originano da un antenato comune e si evolvono in modo simile nel tempo, probabilmente in risposta a pressioni selettive simili.

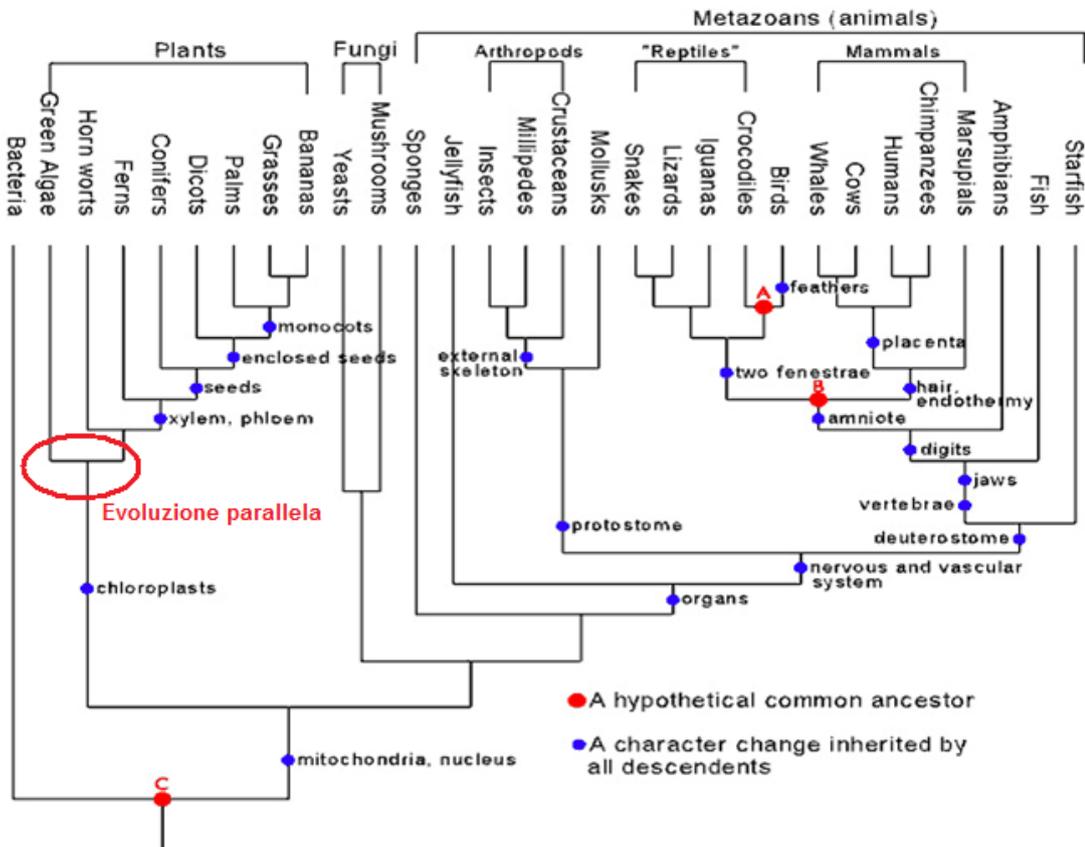


Figura 4.16 – Filogenesi globale del vivente (Gee, 2006)

Caratteristiche di *evoluzione divergente*, in cui una forma ancestrale si è evoluta in due o più specie, che continuano ad evolversi indipendentemente e si differenziano sempre di più nel tempo, sono invece riscontrabili in Figura 4.17.

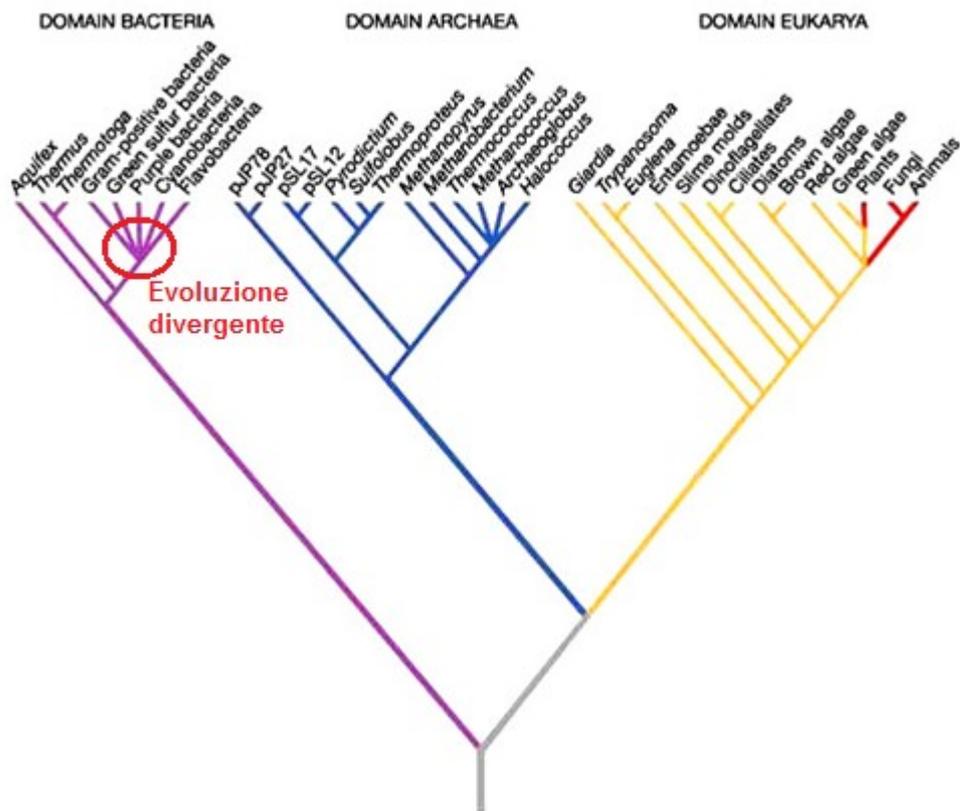


Figura 4.17 – Cladogramma dei viventi nei tre domini (Gee, 2006)

4.5.2.b Estensione ai sistemi produttivi dinamici: criticità ed opportunità

Sebbene tradizionalmente l’approccio cladistico si concentri sui cambiamenti registrati in specifiche entità viventi, un eventuale estensione al caso dei sistemi industriali potrebbe garantire l’individuazione di un modello di riferimento per la gestione diretta della dinamicità nella formazione delle famiglie e fornire indicazioni di raggruppamento sulla base, ad esempio, delle soluzioni adottate in fase di progettazione di prodotto.

In questo caso, il processo di costruzione sistematico del cladogramma partirebbe dalla scelta dell’insieme dei prodotti attualmente a disposizione (*taxon finale*), per poi caratterizzare le relazioni esistenti fra ciascuno di essi tramite lo studio degli stati assunti dai caratteri ereditati. Infatti, mentre un carattere indica una peculiarità della parte/prodotto/cella di lavoro, i suoi stati (*primitivo* o

derivato di cui si è detto in precedenza) ne mostrano i diversi valori, fasi, forme in cui è possibile rintracciare la caratteristica stessa⁸⁸.

La dimensione del cladogramma è ancora pari al numero di fasi individuate, cioè al numero totale delle variazioni negli stati dei caratteri che, attraverso le relazioni individuate, hanno generato i prodotti che si trovano alle estremità dei rami del cladogramma (il mix di prodotti attuale). Ai fini della discriminazione fra i diversi alberi individuati, è possibile far ancora ricorso al principio della massima parsimonia.

Due sono le principali difficoltà esistenti nella costruzione⁸⁹ di un cladogramma a scopo industriale:

- la rappresentazione analitica di un'n-pla di problemi complessi. Se fosse, ad esempio, necessario raggruppare n taxa, bisognerebbe progettare $\frac{(2n-3)!}{[2^{n-2}(n-2)!]}$ cladogrammi differenti (Wheeler, et al., 2006). Questo comporta uno sforzo computazionale consistente nel caso di formulazione analitica del problema e impone, dunque, il ricorso a tecniche di ottimizzazione euristiche⁹⁰;
- assenza di una vera e propria formulazione analitica del principio della massima parsimonia. In questo caso è, inoltre, necessario scegliere se ricorrere ad algoritmi che calcolino la dimensione del cladogramma parallelamente alla sua costruzione o, piuttosto, solo a valle della sua costruzione.

L'analisi delle somiglianze delle caratteristiche delle parti/prodotti rispetto a eventi cronologici, o comunque su scala temporale, consente, soprattutto se accompagnata dall'utilizzo di algoritmi di evoluzione di tipo genetico, di

⁸⁸ Ad esempio, si pensi ad una parte in cui non siano stati ricavati dei fori e alla stessa parte sulla quale successivamente vengano ricavati fori o scanature.

⁸⁹ A tal proposito, un metodo alternativo diffusamente adoperato nelle discipline biologiche per la costruzione di un cladogramma è l'albero di Wagner (Farris, 1970).

⁹⁰ In effetti, questo problema presente anche nell'approccio tradizionale è risolvibile ricorrendo alla stessa ipotesi formulata da Henning e cioè che esista una forma primitiva in comune. I caratteri derivati verranno aggiunti in fasi successive dando vita a gruppi che li condividono (*sinamorfismi*) o che rimarranno peculiarità di elementi singoli (*automorfismi*)

ricostruire schemi regolari secondo i quali è probabile si possano evolvere i gruppi considerati e, di conseguenza, secondo i quali possano variare le esigenze in base alle quali riorganizzare il RMS (ElMaraghy, et al., 2008).

4.5.2.c Analisi di un caso applicativo

Con riferimento alle informazioni di partenza presentati in (ElMaraghy, et al., 2008), si è proceduto applicando quanto presentato nei paragrafi precedenti al caso della produzione del blocco cilindri per motori destinati ad autotrazione.

In Figura 4.18 sono visibili un motore con cilindri in linea ed un motore con disposizione dei cilindri a V, accompagnati da alcune delle caratteristiche costruttive che li contraddistinguono.

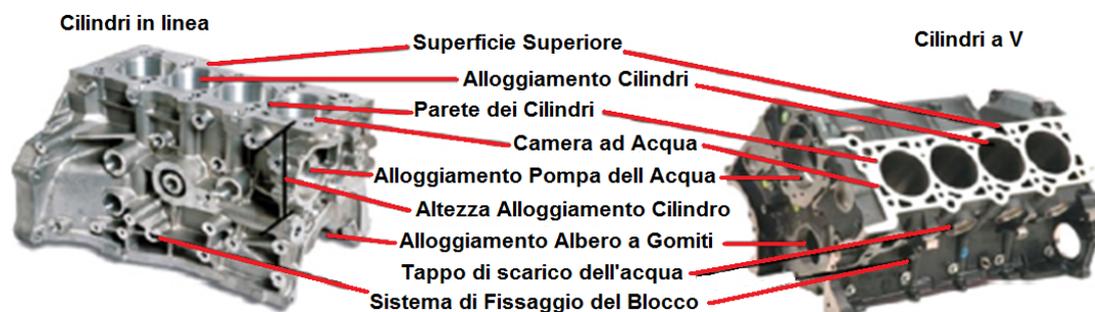


Figura 4.18 – Esempio di blocco cilindri (ElMaraghy, et al., 2008)

Il blocco cilindri, in generale, può essere caratterizzato considerando i materiali impiegati nel processo di produzione, il posizionamento di specifiche parti accessorie o la presenza di specifici componenti⁹¹. I possibili stati assunti da tali caratteri sono riportati in Tabella 4-3.

La presenza di uno “0” nella colonna degli stati indica che il modello considerato non possiede il carattere in questione o che si tratta di un *carattere*

⁹¹ Sebbene il numero di cilindri che trovano alloggio nel blocco sia variabile, la caratteristica non viene presa in considerazione ai fini della classificazione. Questo, infatti, comporterebbe la presenza di una caratteristica con un numero di stati maggiore di 2, ognuno dei quali riferibile al numero di cilindri posseduto, con conseguente impossibilità di ricorrere alla costruzione classica della matrice degli stati. La caratteristica, inoltre, a valle degli esperimenti effettuati comporterebbe un incremento notevole della dimensione del cladogramma ed un'eccessiva frammentazione per gli scopi perseguiti.

allo stato primitivo, mentre lo stato “1” indica che il carattere esiste o che si tratta di un carattere allo stato derivato.

Tabella 4-3 – Identificazione dei caratteri e dei loro stati

Caratteri	Stati	Descrizione
1 Materiale	0	Alluminio
	1	Ghisa
2 Disposizione dei cilindri	0	In linea con Ø=0
	1	A V con Ø=60° o 90°
3 Tipologia ruota motrice	0	Anteriore (Posizionamento trasversale del motore)
	1	Posteriore (Posizione longitudinale del motore)
4 Copertura area cilindro	0	Aperto: blocco ottenuto per pressofusione
	1	Chiuso: blocco ottenuto per fonderia
5 Accoppiamento cilindro-blocco cilindri	0	Ricavato dalla parete del blocco
	1	Separato dalla parete interna del blocco (per la presenza della camera di raffreddamento ad acqua)
6 Alloggiamento del manovellismo	0	Assemblato successivamente al blocco
	1	Integrato al blocco
7 Alloggiamento dell'albero a camme	0	Assente dal blocco (sopra le camme)
	1	Disposto superiormente alle valvole
8 Alloggiamento dell'albero bilanciante	0	Assente
	1	Esistente
9 Pompa dell'acqua	0	Completamente separabile dal blocco
	1	Integrata nel blocco
10 Pompa dell'olio	0	Completamente separabile dal blocco
	1	Montata sul blocco
11 Altezza alloggiamento cilindro	0	Bassa (corsa del pistone minore del diametro di alesaggio)
	1	Alta (corsa del pistone maggiore del diametro di alesaggio)

Sulla base delle caratteristiche effettivamente possedute dall'ingroup, si è proceduto alla codifica tramite *matrice dei caratteri informativi*⁹² (Tabella 4-4), mentre la Figura 4.19 mostra un “prodotto virtuale”, dotato di tutti i caratteri negli stati derivati. Per effettuare il raggruppamento dei prodotti ed analizzare i corrispondenti cladogrammi, si è fatto ricorso ad un software diffusamente adoperato in ricerche concernenti la genetica⁹³ (Nixon, 2002).

⁹² Vale la pena sottolineare che, qui come in (ElMaraghy, et al., 2008), nel carattere “materiale”, il ricorso all'alluminio è considerato stato primitivo poiché la maggior parte dei blocchi presi in considerazione prevedono la fabbricazione in alluminio. Questo, oltre che rendere il cladogramma più parsimonioso, rende la caratteristica in questione meno influente nel processo di raggruppamento.

⁹³ Il software è disponibile all'indirizzo: <http://www.cladistics.com/>. Una guida esaustiva al programma, redatta da Diana Lipscomb della George Washington University, è disponibile all'indirizzo: www.gwu.edu/~biology/docs/Winclad.doc.

Tabella 4-4 – Stati dei caratteri nei blocchi presi in considerazione

Varianti	Caratteri										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
EF-DET 659 cc	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0
F8B 796 cc	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1
G13B 1298 cc	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1
4A-GEU 1597 cc	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0
711 M 1691 cc	1	0	1	1	1	0	1	0	0	1	0
QR20DE 1998 cc	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0
Mopar 2360 cc	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
Cosworth 2935 cc	0	1	1	1	0	1	0	0	1	0	0
Buick215 2900 cc	0	1	0	0	0	1	1	0	1	0	0
Cyclone 3496 cc	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0
LN3 3800 cc	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0
LS2 5967 cc	0	1	1	0	0	1	1	0	1	1	0

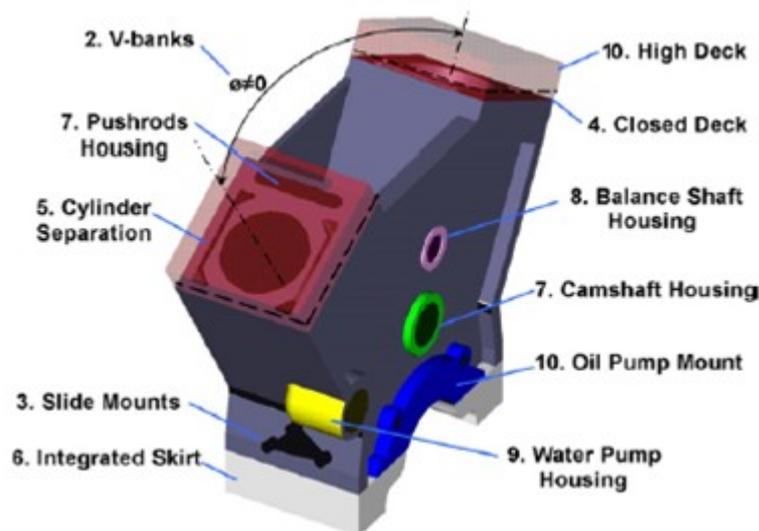


Figura 4.19 – Modello semplificato di blocco cilindri con tutte le caratteristiche in stati derivati (ElMaraghy, et al., 2008)

WinClada, più nello specifico, fornisce un'interfaccia grafica per l'imputazione in varie forme dei dati concernenti i *taxa*, le caratteristiche e gli stati ad esse associate. L'analisi viene effettuata eseguendo in background

programmi di terze parti specificatamente progettati allo scopo, quali NONA⁹⁴ (Goloboff, 1993a) o HENNIG86⁹⁵ (Farris, 1988), mentre i risultati vengono riportati in veste grafica nell'ambiente originario.

La successiva ottimizzazione degli alberi può, ancora una volta, essere effettuata adoperando lo stesso software o fornendo il file di output a programmi terzi come TNT⁹⁶.

In Figura 4.20 sono illustrate le fasi di:

- imputazione dati e scelta del metodo per l'analisi della *matrice dei caratteri informativi* (1);
- impostazione dei parametri relativi all'esecuzione delle simulazioni (2).

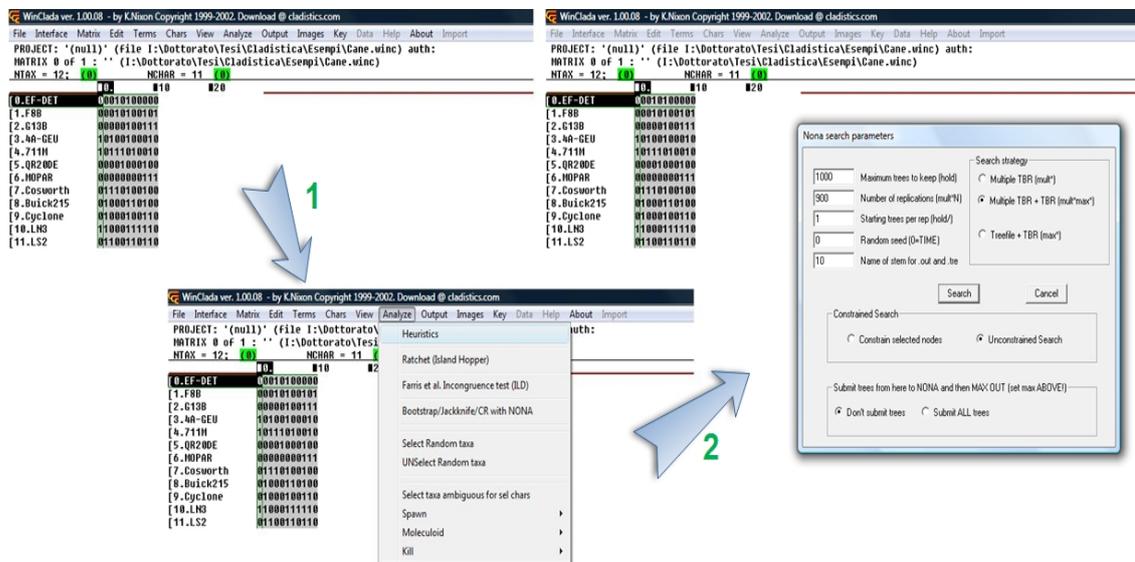


Figura 4.20 – Ambiente WinClada, imputazione dati e impostazione dei parametri d'analisi

Per quel che concerne quest'ultimo punto:

- si è impostato il valore massimo (1000) relativo al numero di alberi da memorizzare nell'analisi, al fine di poter disporre anche di alberi che non minimizzassero l'*indice di parsimonia*;

⁹⁴ Il software è disponibile all'indirizzo: <http://www.cladistics.com/>.

⁹⁵ Il software è disponibile all'indirizzo: <http://www.cladistics.com/>. Una guida esaustiva al funzionamento del programma, redatta da Diana Lipscomb della George Washington University, è disponibile all'indirizzo: <http://www.gwu.edu/~clade/faculty/lipscomb/web.pdf>.

⁹⁶ Il software è disponibile all'indirizzo: <http://www.zmuc.dk/public/phylogeny/>. I principi di funzionamento sono esaustivamente discussi in (Goloboff, et al., 2008).

- per ogni simulazione vengono effettuate 950 replicazioni per garantire l'affidabilità dei risultati conseguiti;
- è stata adoperata una tecnica di ricerca che prevede un processo di bisezione dell'albero inizialmente generato e successive riconessioni. Tale processo viene ripetuto un numero di volte pari al numero di replicazioni impostato al fine di garantire un'analisi esaustiva delle possibili ricombinazioni (*Multiple TBR+TBR*).

L'analisi è stata svolta non imponendo vincoli sul nodo di partenza. Questo, sebbene abbia incrementato i tempi della simulazione, ha consentito di memorizzare soluzioni non coerenti con le argomentazioni proposte in (Henning, 1965) e cioè che:

- il carattere derivato più diffuso (5 o 8 nel caso considerato) è posto alla base della prima scissione nel cladogramma;
- il *taxon* più vicino all'ipotetico primitivo⁹⁷ (*EF-DET 659 cc* oppure *QR20DE 1998 cc* nel caso considerato) è posto in alto nel cladogramma ottenuto.

Tali soluzioni, per quanto possano essere caratterizzate da valore dell'*indice di parsimonia* ottimo, presenteranno un più elevato numero di polarità negative⁹⁸ e quindi, in un'interpretazione rigida dei risultati, non si riveleranno utili allo scopo perseguito; tuttavia, tenerne traccia, potrebbe consentire l'individuazione di "gruppi comuni", utili ai fini d'indagini collaterali.

⁹⁷ Costituito da caratteri presentanti tutti stato "0".

⁹⁸ La presenza di polarità negative indica la regressione del carattere considerato da *derivato* a *primitivo*. Per quanto si punti a minimizzarne la presenza, è evidente che al crescere del numero di prodotti considerati, cresce la probabilità che se ne presentino soprattutto in presenza di scarsa omogeneità dell'insieme di partenza.

Dopo aver individuato gli alberi caratterizzati dal valore minimo dell'indice di parsimonia ($L=23$), si è proceduto all'analisi e alla risoluzione delle *ambiguità* presenti in ciascuno di essi tramite ottimizzazione *ACCTRAN*⁹⁹ (Figura 4.21).

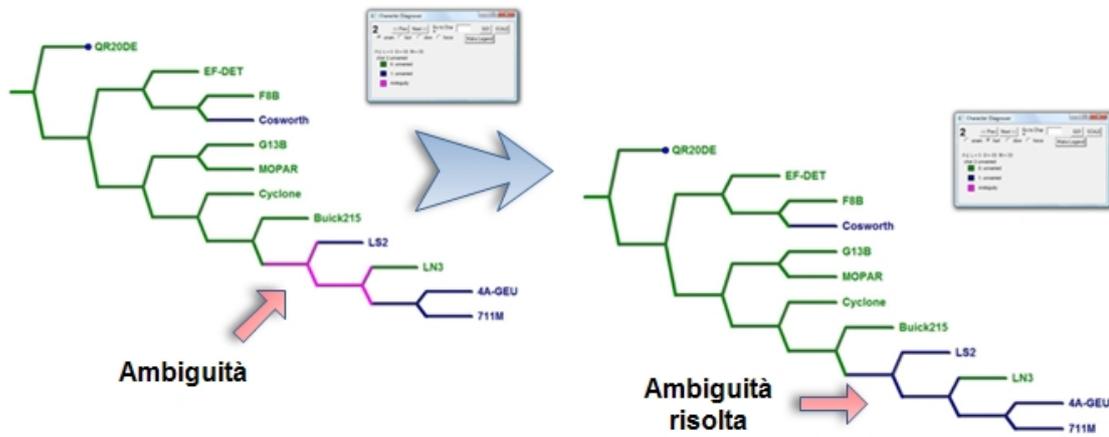


Figura 4.21 – Risoluzione delle ambiguità tramite criterio di ottimizzazione *ACCTRAN*

Si è, infine, considerato il numero di polarità negative possedute da ciascun albero individuato dal risolutore (Figura 4.22), verificando quali caratteri ne fossero affetti. I risultati ottenuti sono riepilogati in Tabella 4-5, dove vengono evidenziati gli alberi con il minor numero di polarità negative.

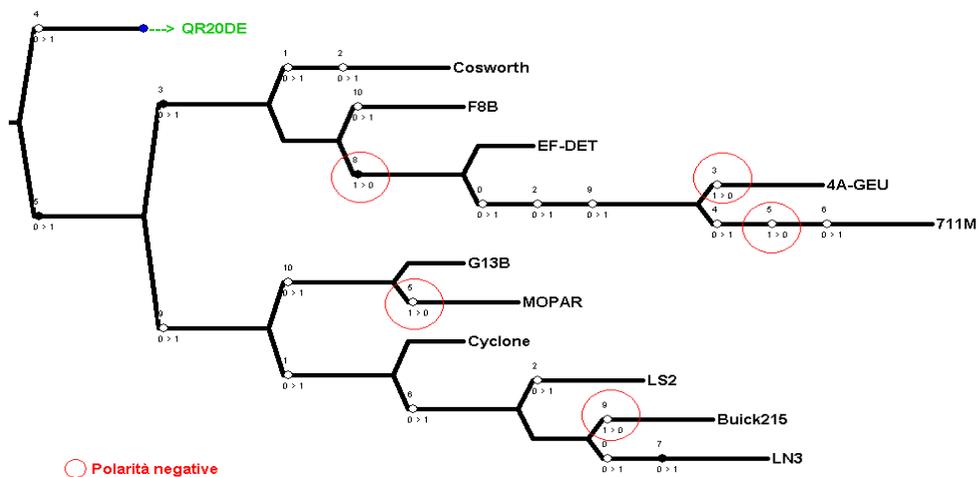


Figura 4.22 – Individuazione delle polarità negative tramite *WinClada*

⁹⁹ Per un approfondimento circa il metodo di ottimizzazione adoperato si consulti: www.gwu.edu/~biology/docs/Winclad.doc. Circa l'effettiva capacità posseduta da tale metodo di minimizzare fenomeni di parallelismo delle origini si consulti (Agnarsson, et al., 2008).

Tabella 4-5 – Alberi ottimi generati dal risolutore (L=23) e analisi della distribuzione delle polarità negative

Albero	Primo Elemento	Polarità negative totali	Caratteri che danno vita a polarità negative e frequenza																			
			0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10									
1	EF-DET 659 cc	6					x	1			x	3					x	1	x	1		
2	EF-DET 659 cc	6					x	1			x	3					x	1	x	1		
3	EF-DET 659 cc	7				x	1	x	2			x	3							x	1	
4	EF-DET 659 cc	7						x	2			x	3				x	1	x	1		
5	EF-DET 659 cc	7				x	1	x	2			x	3							x	1	
6	EF-DET 659 cc	6						x	2			x	3							x	1	
7	EF-DET 659 cc	6						x	2			x	3							x	1	
8	EF-DET 659 cc	7						x	2			x	3					x	1	x	1	
9	EF-DET 659 cc	8			x	1			x	1			x	3	x	1			x	1	x	1
10	EF-DET 659 cc	6						x	1			x	3					x	1	x	1	
11	EF-DET 659 cc	8			x	1			x	1			x	3	x	1			x	1	x	1
12	EF-DET 659 cc	8			x	1			x	1			x	3	x	1			x	1	x	1
13	EF-DET 659 cc	8			x	1			x	1			x	3	x	1			x	1	x	1
14	EF-DET 659 cc	8			x	1			x	1			x	3	x	1			x	1	x	1
15	EF-DET 659 cc	8			x	1			x	1			x	3	x	1			x	1	x	1
16	EF-DET 659 cc	8			x	1			x	1			x	3	x	1			x	1	x	1
17	EF-DET 659 cc	6						x	1			x	3					x	1	x	1	
18	EF-DET 659 cc	6						x	1			x	3					x	1	x	1	
19	EF-DET 659 cc	7						x	2			x	3					x	1	x	1	
20	QR20DE 1998 cc	7			x	1	x	1				x	2	x	1			x	1	x	1	
21	QR20DE 1998 cc	7			x	1						x	2	x	1			x	2	x	1	
22	QR20DE 1998 cc	5											x	2					x	2	x	1
23	QR20DE 1998 cc	5						x	1			x	2						x	1	x	1
24	QR20DE 1998 cc	5						x	1			x	2						x	1	x	1
25	QR20DE 1998 cc	7			x	1						x	2	x	1				x	2	x	1
26	QR20DE 1998 cc	5											x	2					x	2	x	1
27	QR20DE 1998 cc	7			x	1						x	2	x	1				x	2	x	1
28	QR20DE 1998 cc	5											x	2					x	2	x	1
29	QR20DE 1998 cc	5						x	1			x	2						x	1	x	1
30	QR20DE 1998 cc	6				x	1	x	1			x	2					x	1	x	1	
31	QR20DE 1998 cc	5						x	1			x	2						x	1	x	1
32	QR20DE 1998 cc	7			x	1						x	2	x	1				x	2	x	1
33	QR20DE 1998 cc	7			x	1						x	2	x	1				x	2	x	1
34	QR20DE 1998 cc	5											x	2					x	2	x	1
35	QR20DE 1998 cc	6						x	1			x	2						x	2	x	1
36	QR20DE 1998 cc	8	x	1	x	1						x	2	x	1				x	2	x	1
37	QR20DE 1998 cc	8			x	1	x	1				x	2	x	1				x	2	x	1
38	QR20DE 1998 cc	5						x	1			x	2						x	1	x	1

Gli alberi sono stati raggruppati in due insiemi caratterizzati da omogeneità in termini di caratteristiche affette da polarità negative, per garantire una migliore

efficacia rappresentativa e una migliore interpretazione dei risultati (Figura 4.23, Figura 4.24).

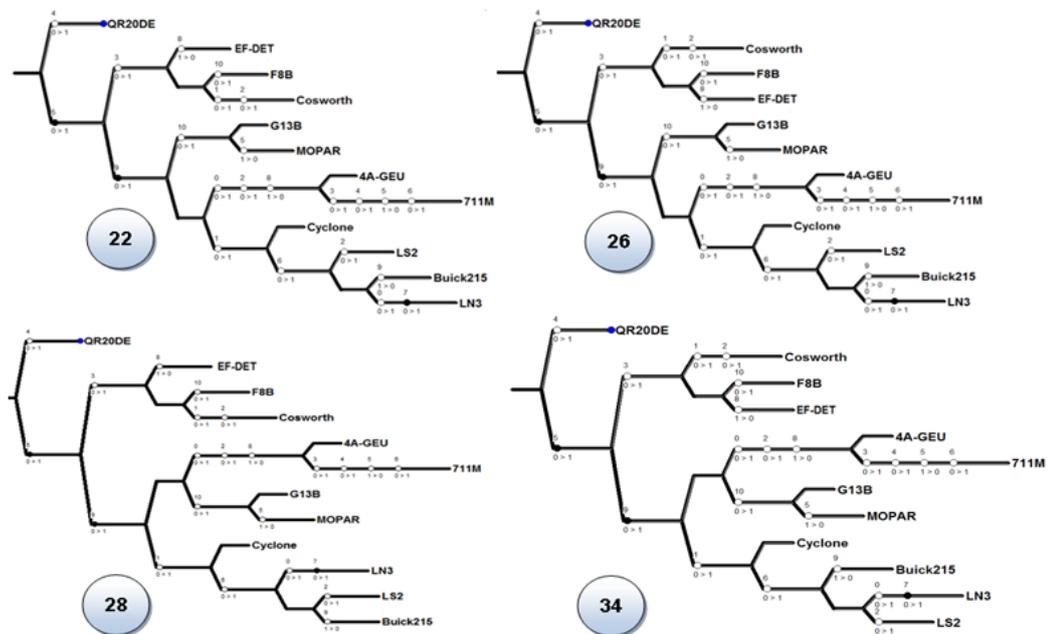


Figura 4.23 – Alberi con 3 caratteristiche affette da polarità negativa

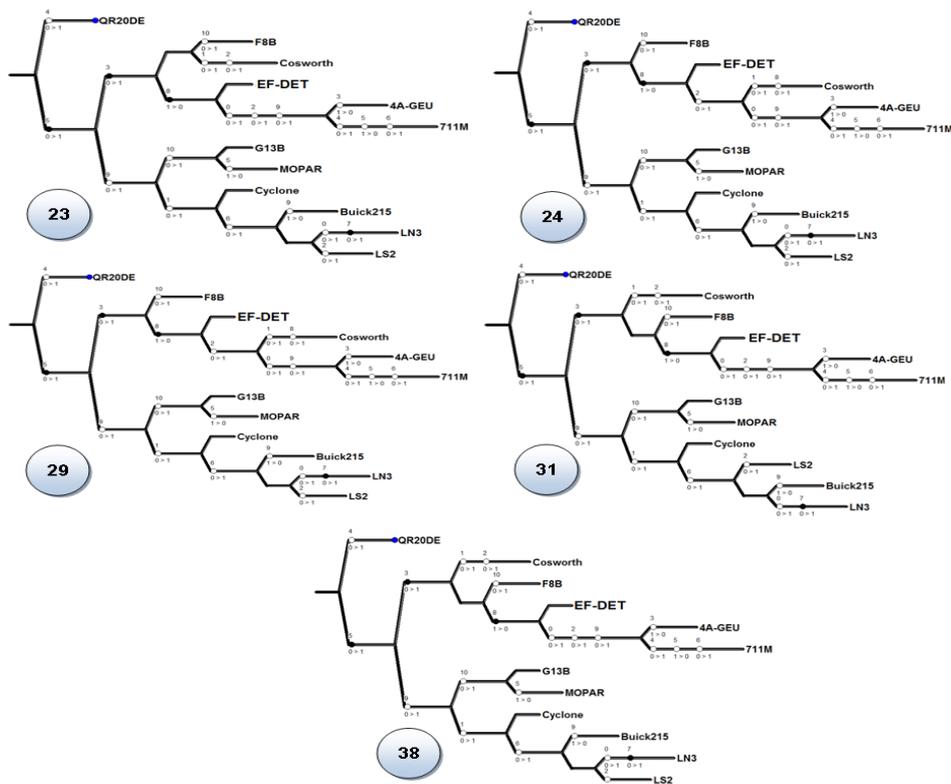


Figura 4.24 – Alberi con 4 caratteristiche affette da polarità negativa

Gli alberi appartenenti alle due famiglie presentano stesso valore dell'*indice di consistenza* ($CI=47\%$) e dell'*indice di ritenzione* ($RI=53\%$) definiti come¹⁰⁰:

$$CI = \frac{M}{S} \quad ; \quad RI = \frac{G - S}{G - M}$$

dove:

- M è il numero totale atteso di caratteri oggetto di cambiamenti una volta assegnata la *matrice dei caratteri informativi*;
- S è il numero di cambiamenti effettivamente verificatisi nell'albero;
- G è il più grande numero di step evolutivi presentato da uno qualsiasi dei caratteri presi in considerazione.

Per quanto i valori dei due indici possano in prima battuta risultare non eccessivamente elevati, c'è da tener presente che il software adoperato favorisce la costruzione di alberi che massimizzino l'insorgenza di *omoplasie*, coerentemente con quanto previsto dall'approccio cladistico. Tale rigidità potrebbe non essere necessaria in un'eventuale applicazione industriale della tecnica ed è per questo che il ricorso a tecniche di seconda ottimizzazione, volte proprio all'incremento degli indici di cui sopra, appare assolutamente giustificabile (Carpenter, 1988; Goloboff, 1993b).

Indipendentemente da tali considerazioni, analizzando i risultati ottenuti è possibile constatare che:

- gli alberi appartenenti alla stessa famiglia si differenziano per semplici inversioni di prodotti, questo vuol dire che pur mantenendo la stessa struttura di base in ciascuno di questi potrebbe svilupparsi un carattere prima di un altro;
- gli alberi appartenenti alle due famiglie si differenziano esclusivamente per la differente collocazione della coppia *4A-GEU – 7IIM* (Figura 4.25).

¹⁰⁰ Per ulteriori approfondimenti sull'utilizzo degli indici al fine di saggiare la bontà delle soluzioni ottenute si veda (Lipscomb, 1998).

Gli alberi ottenuti, dunque, presentano le medesime caratteristiche informative.

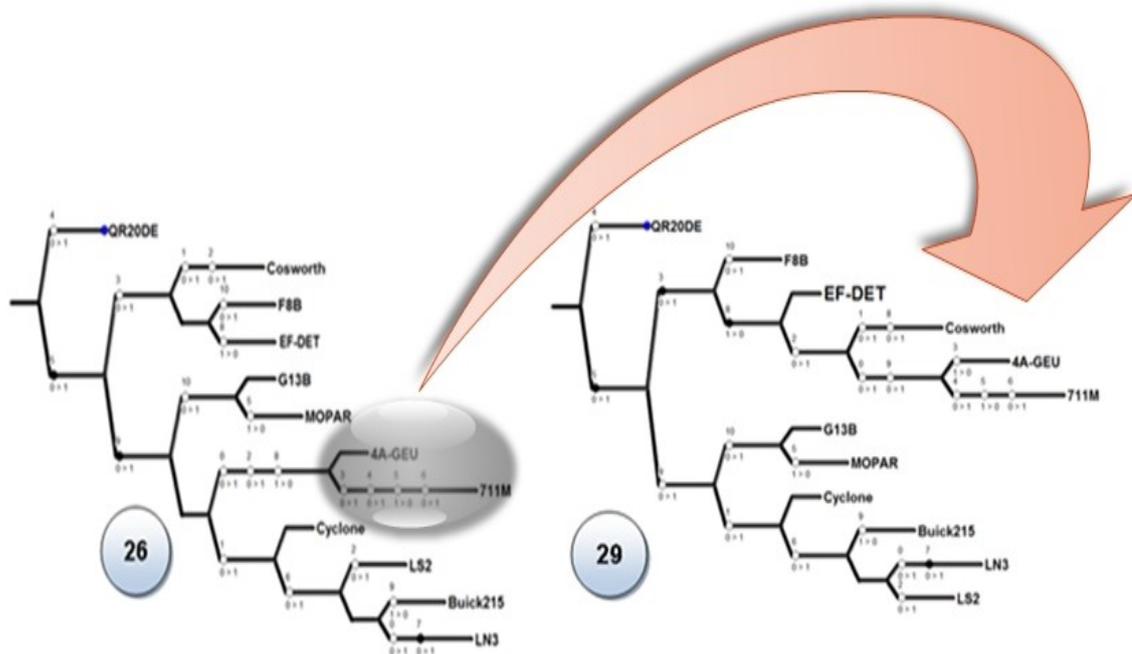


Figura 4.25 – Collocazione del gruppo 4A-GEU - 711M nelle famiglie di alberi

Scelto uno qualsiasi dei prodotti facente parte dell'insieme di partenza, è possibile collegare la sua evoluzione progettuale e/o funzionale a specifiche perturbazioni provenienti dal mercato; questo potrebbe favorire certi tipi di scelte piuttosto che altre in presenza di scenari simili a quelli già riscontrati.

La possibilità di raggruppare prodotti con caratteristiche omogenee favorisce la progettazione del sistema produttivo, grazie alla progressiva aggiunta di caratteri derivati, poiché consente di individuare i prodotti virtuali rappresentativi di ciascuno dei gruppi individuati (Figura 4.26).

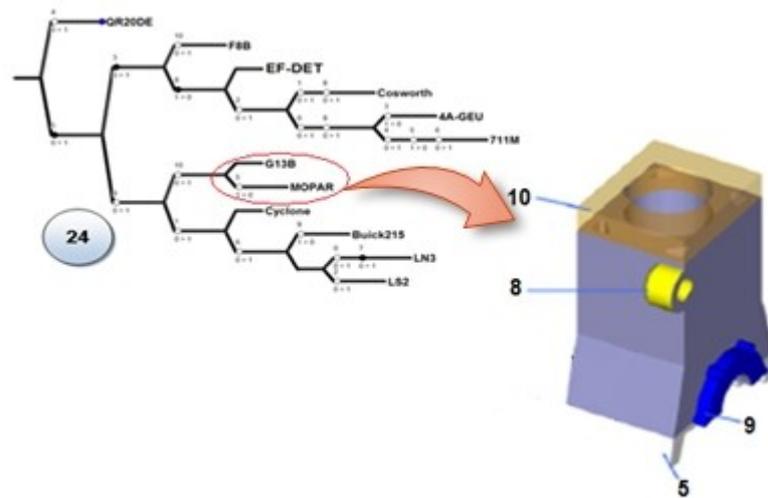


Figura 4.26 – Componente Virtuale rappresentativo del gruppo G13B - MOPAR

Dal cladogramma, inoltre, è possibile individuare i prodotti che con più probabilità possano essere oggetto di evoluzioni future. Dalla Figura 4.27, infatti, sono chiaramente evidenti due linee evolutive principali:

- *Prima linea evolutiva* - Caratterizzata da un numero meno consistente di evoluzioni (21%) a rimarcare una più spiccata stabilità dei mercati serviti;
- *Seconda linea evolutiva* - I prodotti con più caratteristiche allo stato derivato (711M, LN2, LN3) appartengono a tale gruppo. È caratterizzata da un numero più consistente di evoluzioni (68%) e da un progressivo addensamento delle evoluzioni verso l'estremità del cladogramma a testimonianza di una più marcata "vivacità evolutivistica", sintomo di una crescente attenzione dei mercati a quelle tipologie di prodotti o di investimenti più consistenti per lo sviluppo di nuove tecnologie in risposta a più pressanti esigenze di mercato (ElMaraghy, et al., 2008). La presenza dei tre sottoraggruppamenti potrebbe indicare un'ulteriore segmentazione del mercato cui i prodotti sono destinati.

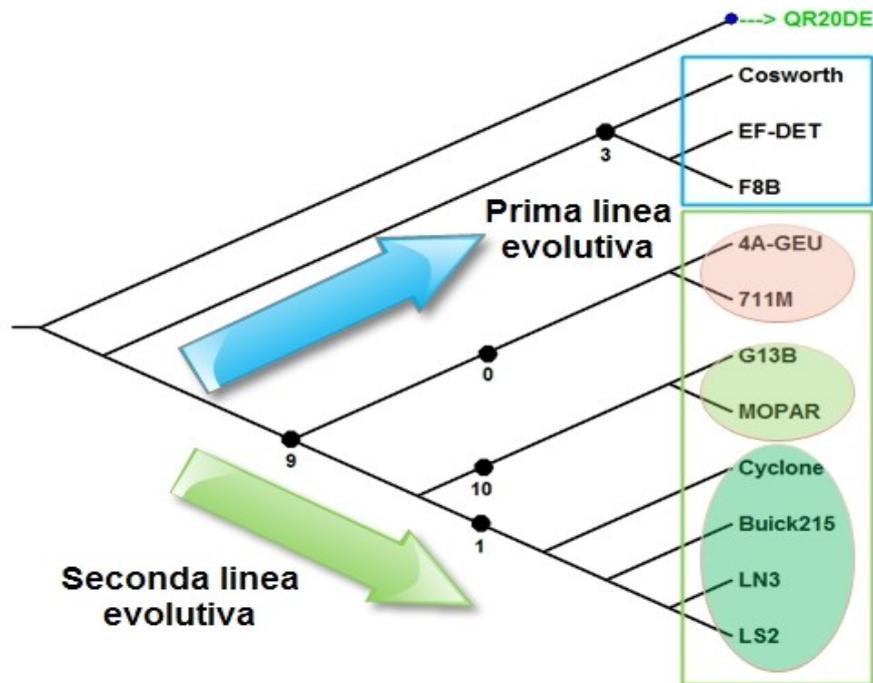


Figura 4.27 – *Linee evolutive ed eventi principali che le caratterizzano*

4.6 Conclusioni

Una delle alternative a disposizione per abbattere costi e tempi di produzione derivanti dall’adattamento delle strategie aziendali ad un mutato interesse verso certi tipi di prodotti, specifiche funzionalità o nuove tecnologie da parte del mercato, è quella di raggruppare i prodotti, e/o le parti che li compongono, in famiglie e, successivamente, riorganizzare intorno ad esse l’intero sistema produttivo.

Tali considerazioni possono essere estese anche al caso di un RMS, le cui caratteristiche definiscono implicitamente il problema.

Dopo aver dimostrato il legame esistente fra progettazione delle famiglie di prodotti, pianificazione delle riconfigurazioni ed efficienza di un RMS, sono stati evidenziati gli attributi che rendano la strutturazione delle famiglie compatibile con le caratteristiche dei sistemi produttivi oggetto di studio.

Piuttosto che sviluppare tecniche specifiche, è stata valutata la possibilità di estendere al caso dei RMS tecniche per la progettazione delle famiglie tipicamente adottate nei *Cellular Manufacturing Systems*, sottolineando quanto le tecniche basate su analogie biologiche consentano una gestione più diretta della dinamicità che, in questo caso, caratterizza il problema.

In particolare, il ricorso ai principi della cladistica ha consentito un'analisi in chiave evolutiva della tematica. Il raggruppamento dei prodotti in base allo sviluppo nel tempo di caratteri derivati, infatti, non solo consente di legare la progettazione del prodotto alle perturbazioni dei mercati e lo sviluppo di “prodotti virtuali” analoghi ai “componenti virtuali” della *Group Technology*, ma favorisce l'individuazione di linee evolutive del prodotto in risposta alla crescente specificità delle richieste del cliente. In questo modo, fra l'altro, possono essere individuate le famiglie che con maggiori probabilità potrebbero in futuro essere oggetto di revisione a causa del decadimento degli indici di somiglianza che ne avevano in principio consentito la formazione.

4.7 Bibliografia

- Abdi M.R., Labib A.W., *Grouping and Selecting products: the design key of Reconfigurable Manufacturing Systems*. International Journal of Production Research, Vol. 42 (3), 2004, pp. 521-546.
- Aljaber N., Baek W., Chen C.L., *A tabu search approach to the cell formation problem*. Computers Industrial Engineering, Vol. 32 (1), 1997, pp. 169-185.
- Anderberg M.R., *Cluster Analysis for Applications*. Academy Press, New York, U.S.A., 1973.
- Asla F.M., Ulsoya A.G., *Stochastic Optimal Capacity Management in Reconfigurable Manufacturing Systems*. CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 52 (1), 2003, pp. 371-374.
- Balakrishnan J., Eliasson J.B., Sweet T.R., *Factors affecting the evolution of manufacturing in Canada: a historical perspective*. Journal of Operations Management, Vol. 25 (2), 2007, pp. 260-283.
- Barajas M., Agard B., *The Use of Fuzzy Logic in Product Family Development: Literature Review and Opportunities*. Rapporto CIRRELT-2009/31 dell'Interuniversity Research Centre on Enterprise Networks, Logistics and Transportation. Montreal, Canada, 2009.

- Burbidge J.L., *Change to Group Technology: Process organization is obsolete*. International Journal of Production Research, Vol. 30 (5), 1992, pp. 1209-1219.
- Burbidge J.L., *Production flow analysis*. The Production Engineer, Vol. 42 (12), 1963, pp. 742-752.
- Burbidge J.L., *The introduction of Group Technology*. Heinemann, Londra, 1975.
- Burke L., Kamal S., *Neural Networks and the part family/machine group formation problem in cellular manufacturing: a framework using Fuzzy ART*. Journal of Manufacturing Systems, Vol. 14 (3), 1995, pp. 148-159.
- Carpenter J.M., *Choosing among multiple equally parsimonious cladograms*. Cladistics, Vol. 8, 1988, pp. 147-153.
- Chandrasekharan M.P., Rajagopalan R., *MODROC: an extension of rank order clustering for group technology*. International Journal Production Research, Vol. 24 (5), 1986a, pp. 1221-1233.
- Chandrasekharan M.P., Rajagopalan R., *ZODIAC: an algorithm for concurrent formation of part families and machines cells*. International Journal of Production Research, Vol. 25 (6), 1987, pp. 835-850.
- Dahmus J.B., Gonzalez-Zugasti J.P., Otto K.N., *Modular product architecture*. Design Studies, Vol. 22 (5), 2001, pp. 409-424.
- de Queiroz K., Gauthier J., *A Phylogenetic taxonomy*. Annual Review of Ecology and Systematics, Vol. 32, 1992, pp. 449-480.
- El-Essawy I.F., Torrance J., *Component Flow Analysis – An effective approach to production systems design*. Production Engineer, Vol. 51, 1972, pp. 165-176.
- ElMaraghy H.A., AlGeddawy T., Azab A., *Modelling Evolution in Manufacturing: a Biological Analogy*. CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 57 (1), 2008, pp. 467-472.
- Farris J.S., *Hennig86*, ver. 1.5. Pubblicato dall'autore, Port Jefferson, New York, U.S.A., 1988.
- Galan R., *A systematic approach for product families formation in Reconfigurable Manufacturing Systems*. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, Vol. 23 (5), 2007, pp. 489-502.
- Gee H., *Tempo profondo. Antenati, fossili, pietre*. Einaudi Editore, Torino, Italia, 2006.
- Gershenson J.K., Prasad G.J., Zhang Y., *Product modularity: definitions and benefits*. Journal of Engineering Design, Vol. 14 (3), pp. 295-313.
- Glover F., *Tabu Search. Part I*. ORSA Journal on Computing, Vol. 1 (3), 1989, pp. 190-206.
- Glover F., *Tabu Search. Part II*. ORSA Journal on Computing, Vol. 2 (1), 1990, pp. 4-32.

- Goetsch D.L., Chalk L.W., *Technical Drawing*, 5th Edition. Delmar Cengage Learning, Florence, Kentucky, U.S.A., 2004.
- Goloboff P.A., *Estimating character weights during tree search*. *Cladistics*, Vol. 9, 1993b, pp. 83-91.
- Goloboff P., *NONA*, ver. 2.0. Pubblicato dall'autore, INSUE - Fundación e Instituto Miguel Lillo, S.M. de Tucumán, Argentina, 1993a.
- Gonçalves J.F., Resende M.G., *An evolutionary algorithm for manufacturing cell formation*. *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 47 (2-3), 2004, pp. 247-273.
- Gu P., Hashemian M., Nee A.Y., *Adaptable Design*. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 53 (2), 2004, pp. 539-557.
- Hajkowicz S.A., McDonald G.T., Smith P.N., *An evaluation of multiple objective decision support weighting techniques in natural resource management*. *Journal of Environmental Planning and Management*, Vol. 43 (3), 2000, pp. 505-518.
- Henning W., *Phylogenetic Systematics*. *Annual Review of Entomology* Vol. 10, 1965, pp. 97-116.
- Heragu S.S., *Group Technology and Cellular Manufacturing*. *IEEE Transactions on Systems, Manufacturing and Cybernetics*, Vol. 24 (2), pp. 203-215.
- Holland J.H., *Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence*. The MIT Press, Cambridge, U.K., 1992.
- Hopfield J.J., Tank D.W., *Neural computation of decision in optimization problems*. *Biological Cybernet*, Vol. 52 (3), 1985, pp. 141-152.
- Hsieh F., *Design of evolvable manufacturing processes*. *Proceedings of the 2002 Congress on Evolutionary Computation (CEC '02)*. Honolulu, Hawaii, U.S.A., 2002.
- James T.L., Brown E.C., Keeling K.B., *A hybrid grouping genetic algorithm for the cell formation problem*. *Computers & Operations Research*, Vol. 34 (7), 2007, pp. 2059-2079 .
- Jeon G., Leep H.R., *Forming part families by using genetic algorithm and designing machine cells under demand changes*. *Computers & Operations Research*, Vol. 33, 2006, pp. 263-283.
- Jzau-Sheng L., *Fuzzy Clustering using a Compensated Fuzzy Hopfield Network*. *Neural Processing Letters*, Vol. 10 (1), 1999, pp. 35-48.
- King J.R., Nakornchai V., *Machine-component group formation in group technology: Review and extension*. *International Journal Production Research*, Vol. 20 (2), 1982, pp. 117-133.
- King J.R., *Machine-component group formulation in production flow analysis: an approach using a rank order clustering algorithm*. *International Journal Production Research*, Vol. 18 (2), 1980, pp. 117-133.

- Kirkpatrick S., Gelatt Jr. C.D., Vecchi M.P., *Optimization by simulated annealing*. Science, Vol. 220, 1983, pp. 671-680.
- Klastorin T.D., *The p-median problem for cluster analysis, a comparative test using the mixture model approach*. Management Science, Vol. 31, 1985, pp. 84–95.
- Kohonen T., *Self-Organized formation of topologically correct feature maps*. Biological Cybernet, Vol. 43 (1), 1982, pp. 59-69.
- Kol J., Hul J.S., Huang T., *Reusability Assessment for Manufacturing Systems*. CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 54 (1), 2005, pp. 113-116.
- Kusiak A., Chow W.S., *Decomposition of Manufacturing Systems*. IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. 4 (5), 1988, pp. 457-471.
- Kusiak A., *The generalized group technology concept*. International Journal of Production Research, Vol. 25 (4), 1987, pp. 561-569.
- Liao T.W., *Classification and coding approaches to part family formation under a fuzzy environment*. Fuzzy Sets and Systems, Vol. 122 (3), 2001, pp. 425-441.
- Man K.F., Tang K.S., Kwong S., *Genetic Algorithms: Concepts and application*. IEEE Transactions on Industrial Electronics Vol. 43 (5), 1996, pp. 519-534.
- Matta D., Miller T., *A note on the growth of a production planning system: a case study in evolution*. Interfaces, Vol. 23 (4), 1993, pp. 116-122.
- McCormick W.T., Schweitzer P.J., White T.W., *Problem decomposition and data reorganization by cluster technique*. Operations Research Vol. 20 (5), 1972, pp. 993-1009.
- Mehrabi M.G., Ulsoy A.G., Koren Y., *Trends and perspectives in flexible and reconfigurable manufacturing systems*. Journal of Intelligent Manufacturing, Vol. 13 (2), 2002, pp. 135-146.
- Mulvey J., Crowder H., *Cluster analysis: an application of Lagrangian relaxation*. Management Science, Vol. 25 (4), 1979, pp. 329-340.
- Nixon K.C., *WinClada*, ver. 1.00.08. Pubblicato dall'autore, Ithaca, New York, U.S.A., 2002.
- Ramanathan R., Ganesh L.S., *Group preference aggregation methods employed in AHP: an evaluation and an intrinsic process for deriving members' weightages*. European Journal of Operational Research, Vol. 79, 1994, pp. 249-265.
- Ravichandran K.S., Chandra Sekhara Rao K., Saravanan R., *The Role of Fuzzy and Genetic Algorithms in Part Family Formation and Sequence Optimisation for Flexible Manufacturing Systems*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 19 (12), 2002, pp. 879-888.
- Saaty T.N., *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill, New York, U.S.A., 1980.

- Sarker B.R., Saiful Islam K.M., *Relative performances of similarity and dissimilarity measures*. Computers & International Engineering, Vol. 37 (4), 1999, pp. 769-807.
- Seifoddini H., *Single linkage versus average linkage clustering in machine cells formation applications*. Computers and Industrial Engineering, Vol. 16 (3), 1989, pp. 419–426.
- Selim H.M., Askin R.G., Vakharia A.J., *Cell Formation in Group Technology: Review, Evaluation and Directions for future Research*. Computers Industrial Engineering, Vol. 34 (1), 1998, pp. 3-20.
- Smith K., Palaniswami M., Krishnamoorthy M., *A Hybrid Neural Approach to Combinatorial Optimization*. Computers and Operations Research, Vol. 23 (6), 1996, 597-610.
- Srinivasan G., Narendran T., *GRAFICS – A non-hierarchical clustering algorithm for group technology*. International Journal of Production Research, Vol. 29 (3), 1991, pp. 463-478.
- Su C.T., *A Fuzzy Approach to Part Family Formation*. Proceedings of the International IEEE/IAS Conference on Industrial Automation and Control: Emerging Technologies. Taipei, Taiwan, 1995.
- Tharumarajah A., Wells A.J., Nemes L., *Comparison of emerging manufacturing concepts*. Proceeding of '98 IEEE International Conference on Systems, Manufacturing and Cybernetics. Preston, Australia, 1998.
- Ueda K., Hatono I., Fujii N., *Reinforcement learning approaches to Biological Manufacturing Systems*. CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 49 (1), 2000, pp. 343-346.
- Vakharia A.J., Wemmerlov U.A., *Comparative investigation of hierarchical clustering techniques and dissimilarity measures applied to the cell formation problem*. Journal of Operation Management, Vol. 13 (2), 1995, pp. 117-138.
- van Brussel H.A., *Conceptual framework for Holonic manufacturing: identification of manufacturing Holons*. Journal of Manufacturing Systems, Vol. 18 (1), 1999, pp. 35-52.
- van Den Honert R.C., Lootsma F.A., *Group preference aggregation in the multiplicative AHP: the model of the group decision process and pareto optimality*. European Journal of Operational Research. Vol. 96, 1996, pp. 363-370.
- Wang J., *Formation of machine cells and part families in cellular manufacturing systems using a linear assignment algorithm*. Automatica, Vol. 39 (9), 2003, pp. 1607-1615.
- Warnecke H.J., Huser M., *Lean Production*. Proceedings of the 12th International Conference on Production Research. Lappeenranta, Finlandia, 1993.
- Warnecke H.J., *The Fractal Company: a Revolution in Corporate Culture*. Springer-Verlag, Berlino, 1993.
- Wheeler W., Aagesen L., Arango C.P., *Dynamic Homology and Phylogenetic Systematics: A Unified Approach Using POY*. American Museum of Natural History Institute, New York, U.S.A., 2006.

- Xiaobo Z., Jiancai L., Zhenbi L., *A stochastic model of a reconfigurable manufacturing system Part 2: Optimal configurations*. International Journal of Production Research, Vol. 38 (12), 2000b, pp. 2829-2842.
- Xiaobo Z., Jiancai L., Zhenbi L., *A stochastic model of a reconfigurable manufacturing system. Part 1: a framework*. International Journal of Production Research, Vol. 38 (10), 2000a, pp. 2273-2285.
- Xiaobo Z., Jiancai L., Zhenbi L., *A stochastic model of a reconfigurable manufacturing system. Part 3: Optimal selection policy*. International Journal of Production Research, Vol. 39 (4), 2001a, pp. 747 - 758.
- Xiaobo Z., Jiancai L., Zhenbi L., *A stochastic model of a reconfigurable manufacturing system. Part 4: Performance measure*. International Journal of Production Research, Vol. 39 (6), 2001b, pp. 1113-1126.
- Zhang Z., Sun S., Zheng F., *Image fusion based on median filters and SOFM neural networks: a three-step scheme*. Signal Processing, Vol. 81 (6), 2001, pp. 1325-1330.
- Zolfaghari S. Liang M., *A new genetic algorithm for the machine/part grouping problem involving processing time and lot sizes*. Computers & Industrial Engineering, Vol. 45 (4), 2003, pp. 713–731.
- Zolfaghari S., Liang M., *Machine cell/part family formation considering processing times and machine capacities: a simulated annealing approach*. Computers & Industrial Engineering, Vol. 34 (4), pp. 813-823.

Capitolo V

LA GESTIONE DELLA CAPACITÀ DI UN RMS

La capacità di adattamento mostrata da un Sistema Riconfigurabile di Produzione in caso di perturbazioni del mercato deriva, come detto, da un insieme di attributi di tipo fisico e di tipo logico intorno ai quali il sistema viene progettato. Diversamente da quanto accade per un FMS, la struttura modulare di un RMS ne garantisce una più efficace regolabilità in termini di scalabilità fisica, consentendo l'abbattimento dei costi di mancato utilizzo che affliggono i sistemi flessibili di tipo tradizionale. In questo caso, tuttavia, a causa della marcata dinamicità del problema, diventa ancor più critico il legame esistente fra politiche implementate per la scalabilità del sistema, parametri operativi di controllo, obiettivi e strategie di mercato adottate.

In questo capitolo, dopo aver analizzato quanto presente in letteratura in merito alle problematiche di scalabilità della capacità, ne verrà fornita una rappresentazione basata sull'applicazione dei principi della System Dynamics. La definizione di differenti parametri di controllo e di performance del sistema, consentiranno di valutare la risposta di un RMS, al variare della politica di scalabilità adottata, allorquando si verificassero specifici scenari di mercato. Un'accurata analisi di sensitività permetterà, infine, di valutare più in profondità l'adeguatezza di ciascuna politica, la robustezza dei risultati ottenuti e la convenienza di eventuali investimenti aggiuntivi miranti ad un incremento del tasso di utilizzazione o della reattività del sistema.

5.1. Scalabilità della capacità di un sistema produttivo: analisi dello stato dell'arte

L'attività di pianificazione della capacità di un sistema produttivo si pone l'obiettivo di (Manne, 1961):

- definire l'utilizzo delle risorse necessarie per realizzare la produzione richiesta, in uno specifico orizzonte temporale;
- valutare l'ammontare degli investimenti necessari per rendere disponibili tali risorse;
- determinare i tempi d'intervento più appropriati.

Il problema è, evidentemente, di cruciale importanza nella pianificazione strategica aziendale e l'influenza di una serie di fattori esogeni ed endogeni¹⁰¹ concorre a renderlo piuttosto complesso da affrontare (Luss, 1982; Cakanyildirim, et al., 1999).

Il termine *scalabilità della capacità* di un sistema produttivo è, invece, riferito alla possibilità di decidere quando, secondo quali modalità e di quanto variare la capacità, affinché questo possa adattarsi ai continui cambiamenti della domanda di mercato (Deif, et al., 2007).

La formulazione del problema dal punto di vista statico¹⁰² riguarda, essenzialmente, l'opportunità di colmare parte del gap esistente fra capacità attuale del sistema e capacità richiesta al sistema stesso, in virtù delle condizioni di mercato esistenti, dei costi di espansione da sostenere e delle economie di scala che è possibile conseguire, senza prendere in considerazione la progressiva variazione dei dati a disposizione nell'orizzonte temporale di riferimento (Manne, 1967). A tal proposito, nel caso in cui la domanda sia supposta nota deterministicamente, il problema è riconducibile ad una ottimizzazione lineare o dinamica, risolvibile analiticamente (Freidenfelds, 1981). Nel caso di andamento

¹⁰¹ Solo per citarne alcuni: dinamicità e la natura stocastica della domanda, effettiva disponibilità della capacità richiesta, tempo necessario per reagire ai cambiamenti, trade-off esistente fra reattività del sistema e costi sostenuti per garantirla.

¹⁰² Storicamente legato al controllo del livello inventariale nel sistema e, quindi, alla scelta della politica ottima di gestione delle scorte (Arrow, et al., 1951).

stocastico della domanda, invece, particolarmente diffuso è il ricorso ad analogie con *moti Browniani* e modellazione secondo *distribuzione di Poisson* (Bean, et al., 1992; Ahmed, et al., 2003) o ad analisi di specifici scenari di mercato (Escudero, et al., 1993; Chen, et al., 2002).

Nel caso di formulazione dinamica del problema, l'orizzonte temporale di riferimento viene generalmente suddiviso in un insieme di sottointervalli caratterizzati da un determinato andamento della domanda (Figura 5.1). Quest'ultima potrebbe essere indipendentemente distribuita nei vari intervalli considerati (Asl, et al., 2003) o presentare caratteristiche di memoria, sicché la domanda in un periodo futuro dipenderebbe, in una certa misura, da quella registrata in un insieme di intervalli precedenti (Stermann, 2000).

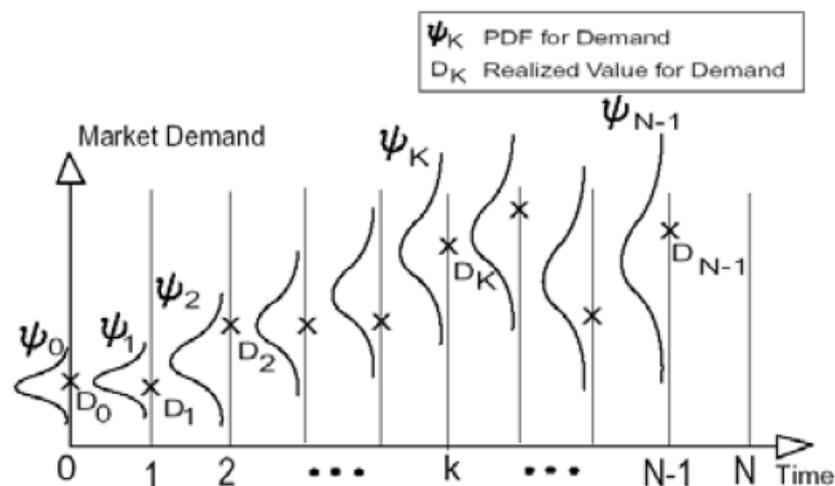


Figura 5.1 – Suddivisione dell'intervallo temporale di riferimento e distribuzione della domanda nel caso di formulazione dinamica del problema della scalabilità della capacità di un sistema produttivo (Asl, et al., 2003)

La maggior parte dei lavori presenti in letteratura prevede, in questo caso, il ricorso ai principi della *teoria del controllo*, attraverso i quali individuare i feedback più appropriati per governare e, successivamente, valutare le performance attese del sistema. Le soluzioni ottenute non necessariamente coincidono con quella ottima nel sottointervallo temporale considerato ma, allo stesso tempo, si dimostrano decisamente più robuste rispetto a variazioni della domanda (Deif, et al., 2006). In (Duffie, et al., 2002), ad esempio, vengono

valutate le performance di un sistema produttivo allorquando la regolazione della capacità venisse effettuata in base al livello di *work-in-process* esistente e in assenza di ritardi nella disponibilità delle macchine. Quest'ultimo aspetto è ulteriormente approfondito in (Kim, et al., 2004), nel caso di una singola stazione di lavoro, ed esteso al caso di più stazioni di lavoro in (Kim, et al., 2005), dove si dimostra che la frequenza delle regolazioni ha impatto positivo sulle performance offerte dal sistema, solo nel caso in cui i ritardi provocati nella disponibilità delle macchine non vadano oltre una specifica soglia. In (Breithaupt, et al., 1999) e (Breithaupt, et al., 2000) il progressivo adattamento della capacità del sistema è ottenuto sfruttando delle *curve di flessibilità* (Figura 5.2), costruite sulla base di quanto esposto in (Nyhuis, et al., 2006) e in grado di collegare il ritardo con il quale si rende nuovamente disponibile il sistema, alla discrepanza esistente fra capacità richiesta e capacità attualmente disponibile. In questo caso, i parametri di performance monitorati sono la dimensione del *backlog* del sistema¹⁰³ e il ritardo con il quale viene completato un ordine rispetto alla data prevista.

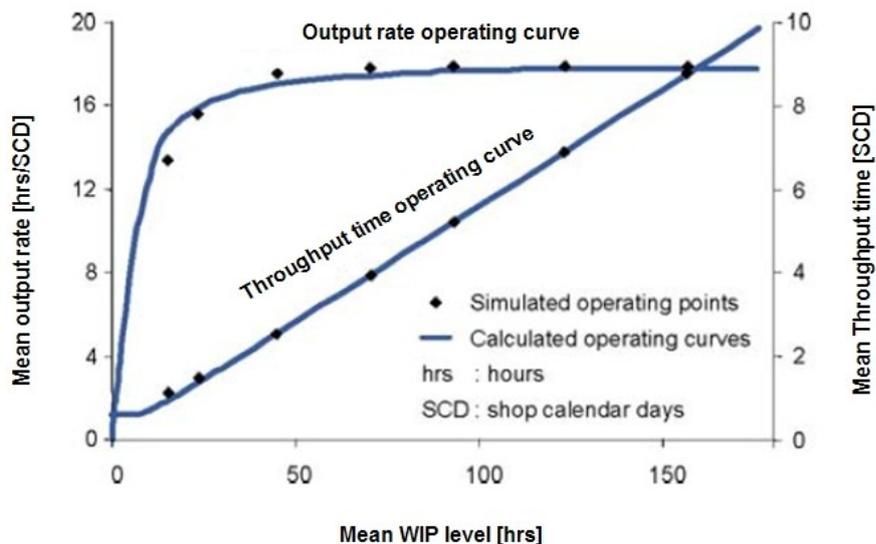


Figura 5.2 – Curva di flessibilità derivata tramite funzione C-norm, $x^c+y^c=1$ (Nyhuis, et al., 2006)

¹⁰³ Numero di ordini in portafoglio che attendono di essere processati.

Un'alternativa alla teoria del controllo è il ricorso alla rappresentazione tramite *System Dynamics* (Forrester, 1961; Stermann, 2000). In questo caso, tuttavia, il problema è spesso esteso all'intera *supply chain*, analizzando vincoli esclusivamente di natura interna (Evans, et al., 1994), confrontando le performance offerte da politiche di gestione tradizionali (Halo, 2000) o puntando all'individuazione del valore iniziale ottimo della capacità di cui deve essere dotata (Goncalves, et al., 2005).

Nel caso più specifico di un FMS, in (Leachman, et al., 1992) e in (Roundy, et al., 2000) si fa ricorso ad una modellazione discreta del problema, considerando non stazionaria la distribuzione della domanda relativa alle differenti famiglie di prodotti da realizzare. Le scelte sono effettuate in base al trade-off esistente fra costi di mancata vendita e costi di investimento necessari per garantire uno specifico valore della capacità installata. In (Liberopoulos, 2002), invece, la capacità del sistema è espressa in termini di tasso di produzione globale, considerando tutte le parti/prodotti da realizzare e tutte le macchine adoperate allo scopo. In questo caso, la scalabilità della capacità è valutata come possibilità di soddisfare la domanda di ciascuna delle parti/prodotti richiesti, noto il range entro il quale può essere fatta variare la capacità di ciascuna delle macchine attualmente a disposizione.

Per quel che concerne i RMS, è innanzitutto necessario constatare che le caratteristiche di cui sono dotati permettono, all'occorrenza, la contrazione oltre che l'espansione della capacità, con conseguente abbattimento dei costi di mancato utilizzo che affliggono i sistemi flessibili di tipo tradizionale. Di fatto, dunque, il ricorso ad un'architettura modulare rende quello della scalabilità della capacità di un RMS un problema più generale di quello affrontato finora, dove la regolazione può avvenire tanto a livello di sistema, quanto a livello della singola postazione di lavoro¹⁰⁴, comportandone un'inevitabile ridefinizione come:

¹⁰⁴ A tal proposito, la gestione dinamica della capacità di un RMS è strettamente correlata alla complessità strutturale ed operativa del sistema (Deif, et al., 2009), misurata in termini di disponibilità e affidabilità delle informazioni necessarie per descriverne e governarne il comportamento.

“...sforzo, espresso in termini di dimensione e frequenza della pianificazione dinamica della capacità, richiesto per decidere quando e di quanto dovrebbe essere scalata la capacità per rispondere alla domanda di mercato, a seguito di perturbazioni indotte da fonti di incertezza interne ed esterne...”
(Deif, et al., 2009).

In (Son, et al., 2001) viene analizzata la possibilità di disporre in parallelo specifiche risorse produttive, al fine di allineare la capacità disponibile di un sistema modulare destinato alla produzione di massa a quella effettivamente richiesta (*HPFL – Homogeneous Paralleling Flow Lines*), considerando l’eventuale insorgere di problematiche di bilanciamento. Modelli basati sui principi della *teoria del controllo* sono rintracciabili in:

- (Asl, et al., 2003), dove viene analizzata l’entità del ritardo con il quale si rende disponibile il sistema a causa dei successivi processi di riconfigurazione;
- (Deif, et al., 2005), dove viene effettuata una programmazione delle attività di riconfigurazione in base ai costi necessari per l’adeguamento della capacità e la domanda del mercato;
- (Deif, et al., 2006), dove viene discussa la progettazione del sistema destinato al controllo della scalabilità della capacità e dove si distingue fra motivi fisici e logici alla base dell’indisponibilità del sistema, tanto in ambienti *make-to-stock* che in quelli *make-to-order*;
- (Deif, et al., 2007), dove viene sviluppato un modello per la gestione dinamica della capacità di un RMS, in cui il coefficiente relativo al guadagno¹⁰⁵ che caratterizza il controller deputato alla scalabilità del sistema viene valutato ricorrendo ad un’ottimizzazione multi-obiettivo.

¹⁰⁵ Nella teoria del *controllo in feedback*, il gap esistente fra valore desiderato della variabile e valore corrente (*errore*) consente di relazionare l’azione di controllo ($u(t)$), all’azione che è necessario compiere sul sistema affinché questo permanga nello stato stazionario iniziale (u_0), tramite la relazione $u(t) = K_c \cdot e(t) + u_0$, dove K_c è il *coefficiente del guadagno del controller*.

In, (Asl, et al., 2002), dopo aver modellato secondo una catena di Markov il sistema produttivo, viene individuata un'area di intervento ottimo sulla base delle informazioni relative all'andamento stocastico della domanda. Infine, in (Deif, et al., 2009), si fa ricorso alla rappresentazione tramite *System Dynamics* per valutare l'influenza delle fonti di complessità operativa aggiuntive sulla pianificazione dinamica della capacità.

5.2. Scalabilità della capacità: formulazione analitica per un RMS¹⁰⁶

Si consideri un generico RMS; il tasso con cui i materiali hanno accesso al sistema, $u(t)$, determina, tramite una relazione supposta di tipo lineare nella Figura 5.3, il livello di produzione, $y(t)$, sotto il vincolo della capacità di cui è attualmente dotato il sistema, $C(t)$.

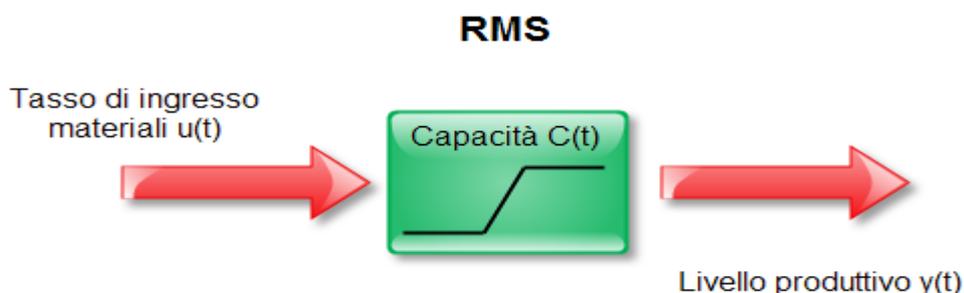


Figura 5.3 – Modello di riferimento per un RMS

Se si suppone che la schedulazione avvenga in tempi trascurabili e che, dunque, se dotato del giusto valore della capacità, il sistema soddisfi immediatamente la domanda proveniente dal mercato, è possibile formulare in termini analitici la relazione di cui sopra:

$$y(t) = \min[C(t), D(t)] \quad (5.1)$$

Le caratteristiche di cui è dotato il sistema consentono, all'occorrenza, di intervenire su $C(t)$ tramite una specifica politica $\Pi_t^{\Delta\alpha}$, riconducibile ad un

¹⁰⁶ Cfr. (Asl, et al., 2003).

insieme di coppie ordinate $\{(\Delta\alpha_i, t_i), i = 0, 1, 2, \dots, n\}$, in cui $\Delta\alpha_i$ rappresenta la variazione del parametro α del sistema su cui si agisce, al tempo t_i , per farne variare la capacità. Se con X_i si indica l'aliquota di capacità aggiuntiva di cui si intende dotare il sistema per far fronte alla domanda $D(t)$, il modello di riferimento per la risoluzione del problema della scalabilità della capacità per un RMS può essere strutturato secondo lo schema di Figura 5.4.

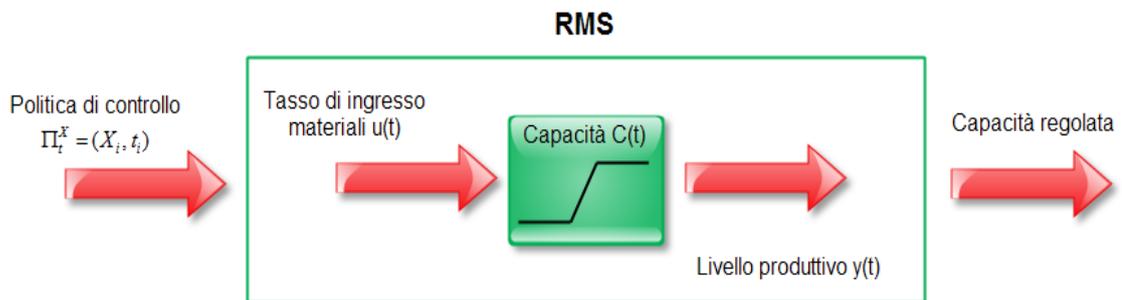


Figura 5.4 - Modello per la scalabilità della capacità in un RMS

Per quanto il sistema consenta, almeno teoricamente, un adattamento continuo alle richieste di mercato, a causa dei costi associati al processo di riconfigurazione, politiche di adattamento progressive, come quella mostrata in Figura 5.5, si dimostrano spesso più efficienti ponendo, d'altro canto, specifiche necessità di ottimizzazione¹⁰⁷.

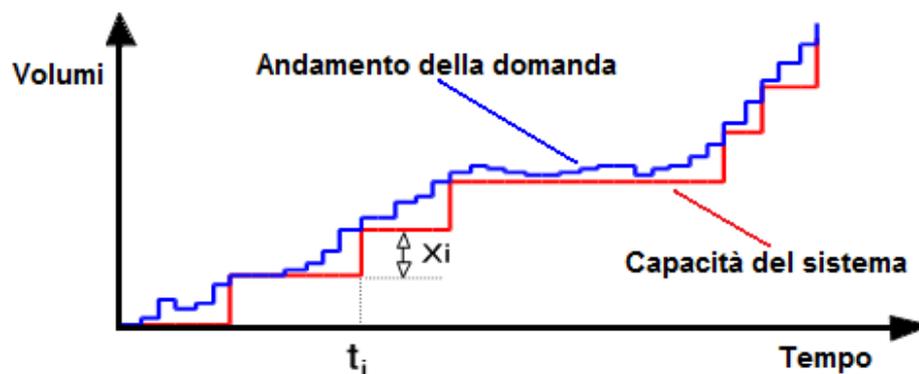


Figura 5.5 – Adattamento progressivo della capacità in un RMS

¹⁰⁷ Per quanto l'osservazione sia assolutamente condivisibile, è altrettanto vero che nel modello, così come in molti altri presenti in letteratura, il valore di X_i viene spesso ricondotto ad un insieme di valori la cui numerosità non è paragonabile alle alternative che si rendono praticamente disponibili nel caso di un RMS, sottostimando, di fatto, la capacità di adattamento del sistema (Deif, et al., 2007).

Il parametro X_i assume per tale ragione valori interni all'insieme $X = \{X^1, X^2, \dots, X^N\}$, detto *Insieme di Scalabilità* del sistema.

Si determina, inoltre, un ritardo temporale (T_{X_i}) tra l'istante in cui si effettua una richiesta di incremento di capacità e il momento in cui tale capacità si rende effettivamente disponibile.

Alla luce di quanto detto, il problema della scalabilità della capacità per un RMS può essere così formulato analiticamente:

data la domanda di mercato $D(t)$ e una funzione di costo $W[C(t), D(t), y(t)]$, si determini la politica ottima Π_t^X che minimizzi $W[C(t), D(t), y(t)]$ nel rispetto dei seguenti vincoli:

$$\begin{cases} y(t) = \min[C(t), D(t)] \\ C(t) = \sum_{i=0}^n [X_i]_X \delta(t - t_i + T_{X_i}) \end{cases} \quad (5.2)$$

dove δ è la funzione *delta di Dirac*.

Se si suppone un andamento deterministico della domanda del tipo $D(t) = gt$ e si considerano nulli i ritardi T_{X_i} , il problema è riconducibile al caso tradizionale di minimizzazione della (5.3) (Manne, 1961):

$$\text{Min}_X W = \frac{A+B \cdot X}{1 - e^{-r \frac{X}{g}}} \quad (5.3)$$

dove:

- si è supposto che i costi che si sostengono per la disponibilità di un certo livello della capacità del sistema siano costituiti da un'aliquota fissa (A) e da un'aliquota direttamente collegata ad eventuali espansioni della stessa ($B \cdot X$);
- r è il costo del denaro, ritenuto costante.

I valori ottimi di X e dell'intervallo di tempo che intercorre fra un incremento e il successivo sono (Freidenfelds, 1981):

$$\Delta t \approx \sqrt{\frac{2A}{Bgr}} \quad X \approx \sqrt{\frac{2Ag}{Br}} \quad (5.4)$$

In Figura 5.6 viene diagrammato l'andamento dei successivi adeguamenti della capacità del sistema alla luce delle (5.4).

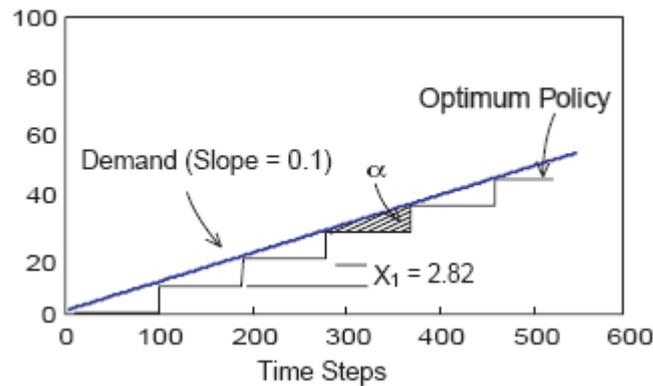


Figura 5.6 - Espansione della capacità secondo la politica ottima di Manne

Se, tuttavia, si verificasse un'improvvisa variazione del tasso della domanda g , o del costo del denaro r , la soluzione proposta potrebbe discostarsi in modo consistente da quella ottima.

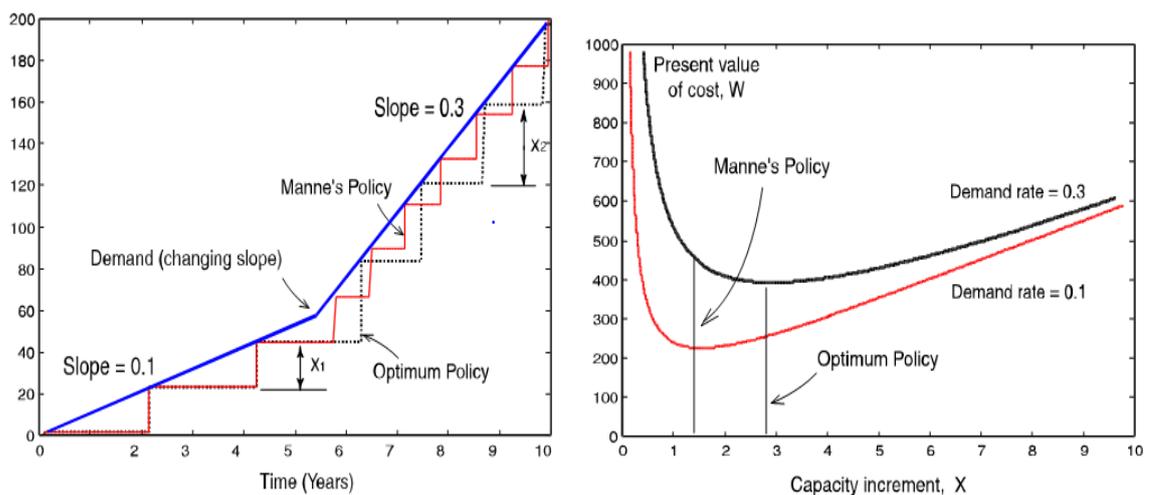


Figura 5.7 – Scostamento della politica di Manne da quella ottima in caso di incremento del tasso di vendita

In effetti, in questo caso, ricorrendo alla teoria del *controllo in feedback* è possibile individuare delle soluzioni che, per quanto solo vicine alla soluzione ottima, si dimostrano estremamente robuste al variare dei parametri citati. Nel caso della Figura 5.8, il controllo è eseguito tramite la (5.5):

$$\Pi_t^X - (X_i, t_i) = \left\{ (X_i, t_i) \middle| X(t_i) = D(t_i) - C(t_i), \int_0^{t_i} [D(t) - C(t)] dt = i \cdot \alpha \right\} \text{ con } i = 1, 2, \dots, n \quad (5.5)$$

dove $\alpha = \frac{1}{i} \int_0^{t_i} [D(t) - C(t)] dt$ è il parametro progettuale per il controllo del sistema.

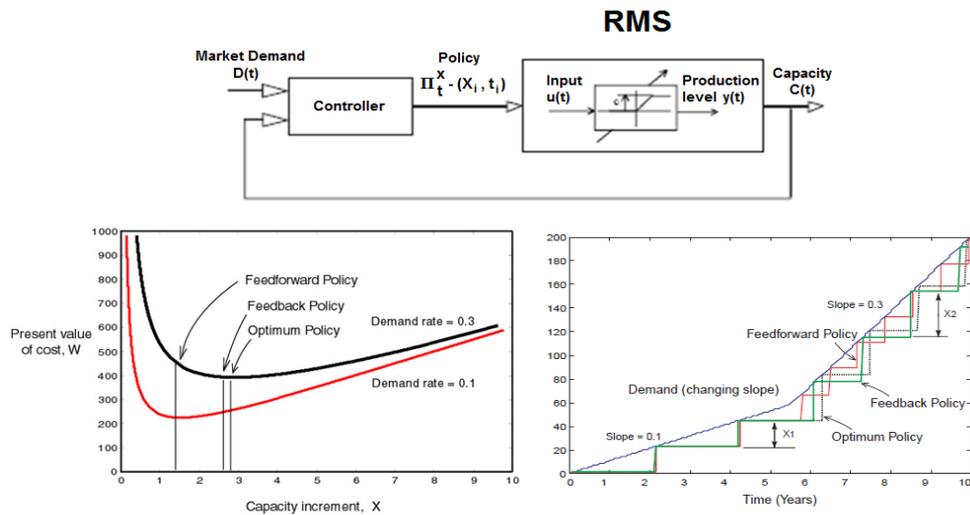


Figura 5.8 – Controllo in feedback della scalabilità della capacità, determinazione dell’incremento ottimo e adattamento progressivo

Tale approccio, inoltre, si dimostra molto più efficiente di quello tradizionale (Freidenfelds, 1980) anche nel caso di domanda distribuita stocasticamente (Figura 5.9).

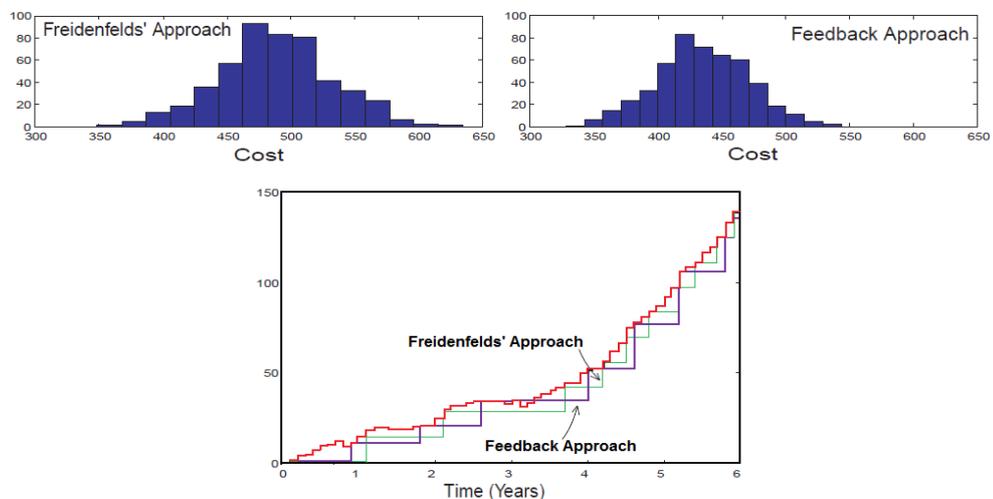


Figura 5.9 – Controllo in feedback della scalabilità della capacità, incremento ottimo e costo cumulato sostenuto nel caso di domanda distribuita stocasticamente

Sebbene i modelli presentati forniscano risultati soddisfacenti in termini di adattamento della capacità alla domanda, non è possibile evincere la dinamica secondo la quale il sistema evolve al mutare delle caratteristiche del mercato, ne tantomeno valutare la risposta del sistema al variare dei parametri operativi che consentono di legare la politica di scalabilità implementata agli obiettivi e alle strategie di mercato dell'azienda. Nei paragrafi successivi, dopo aver accennato alla modellazione tramite *System Dynamics*, verrà proposto un modello che, a valle della definizione di differenti parametri di controllo e di performance, consentirà di valutare la risposta di un RMS, al variare della politica di scalabilità adottata, allorquando si verificassero specifici scenari di mercato.

5.3. Struttura dei modelli di System Dynamics

La *System Dynamics* (SD) può essere ritenuta un metodo di modellazione e simulazione adoperato per l'elaborazione tecnica, la comprensione e la discussione di problematiche complesse. Sviluppata nel 1950 ad opera di J.W. Forrester per favorire la comprensione dei processi industriali, è oggi diffusamente utilizzata per la progettazione e la gestione di sistemi complessi.

Una definizione più formale ed esaustiva, nell'ottica degli obiettivi perseguiti, potrebbe essere la seguente (Forrester, 1996):

“...studio delle caratteristiche delle attività industriali per mostrare come le strutture organizzative, l'amplificazione nelle politiche e i ritardi nelle decisioni e nelle azioni interagiscano per influenzare il successo di un'azienda...”

A parte l'odierno radicamento della SD nelle discipline manageriali, esiste un'omologia di carattere logico tra gli elementi che ne compongono un modello e gli elementi che costituiscono la struttura delle aziende. Tale omologia consiste nel fatto che la logica e i principi che spiegano il comportamento dinamico dei sistemi, si applicano anche alla spiegazione del comportamento delle aziende, qualora queste fossero descritte come sistemi dinamici. Il principio che spiega la

dinamica dei sistemi, il così detto *circuito di retroazione* (o *Feedback Control*, di cui ai paragrafi precedenti), è anche un principio estremamente utile per interpretare la dinamica delle aziende. L'ipotesi fondamentale, quindi, su cui si innesta l'utilizzo dei modelli SD, è che, nella spiegazione dei comportamenti, esista una relazione di isomorfismo tra sistema e azienda che fa in modo che il circuito di retroazione consenta di spiegare il movimento tanto nei sistemi quanto nelle aziende.

Il comportamento osservato di un sistema è generato dall'interazione dello stesso con l'ambiente circostante. Per meglio comprenderne l'evoluzione, i fattori che la influenzano e i nessi fra loro esistenti, è necessario concentrarsi sulla *struttura causale* sottesa al sistema. Una rappresentazione immediata e particolarmente efficace di tale struttura è offerta dai *Diagrammi Causali* (*Causal Loop Diagrams*, Figura 5.10).

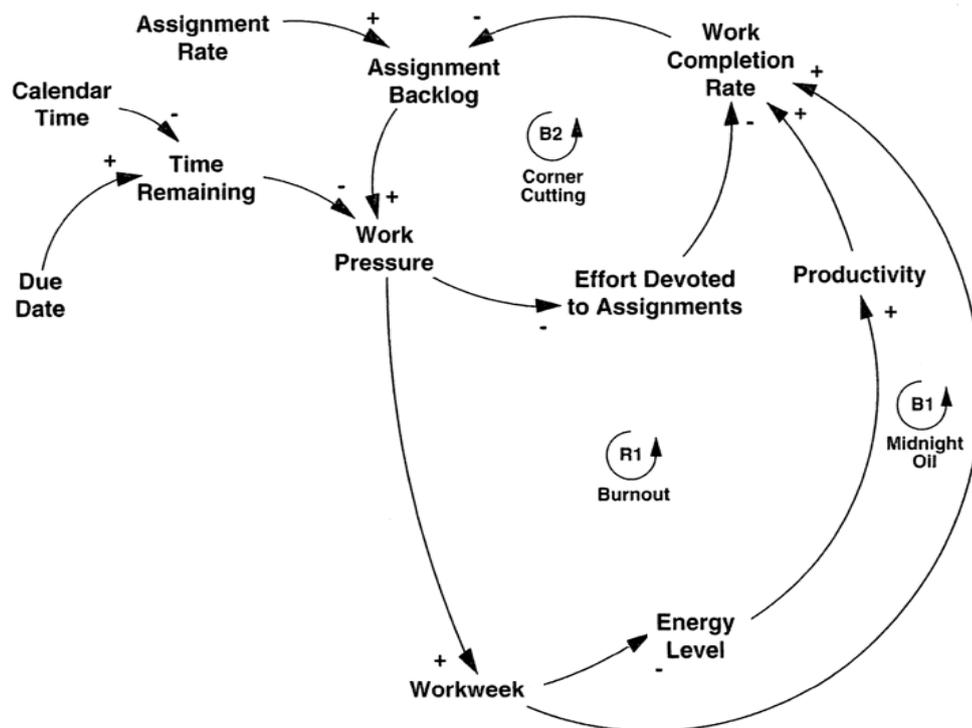


Figura 5.10 – Esempio di mappa causale per l’assegnazione del carico di lavoro ad un operatore (Stermann, 2000)

Questi non sono altro che mappe costituite dall'insieme di variabili di interesse, interconnesse tramite archi orientati, a segnalare l'influenza causale tra le variabili stesse (Stermann, 2000). Più nello specifico, agli archi viene conferita una polarità per esprimere la diretta o inversa proporzionalità per ogni coppia di elementi. La mappa consente di identificare importanti archetipi sistemici che descrivono i comportamenti tipici del sistema e i cicli di feedback che lo governano. Più nello specifico, dalla Figura 5.10 è possibile identificare cicli per i quali le variabili coinvolte amplificano, come in una spirale, il proprio effetto sulla variabile collegata (*Reinforcing Loops, R1*) o cicli per i quali l'influenza di una variabile su un'altra variabile ad essa collegata è tale da generare una variazione in quest'ultima che ha effetto mitigante sulla prima (*Balancing Loops, B1 e B2*).

In realtà, per dare senso compiuto alla relazione descritta in un circuito di feedback e per poterne valutare quantitativamente l'influenza nell'economia del sistema, è necessario ricostruire un ordine temporale, ovvero una dinamica ordinata. Diventa, quindi, implicito e spontaneo pensare che le variabili comprese in un circuito di retroazione si influenzino con un determinato ordine di precedenza, dando così origine ad un fenomeno che si manifesta lungo un asse temporale.

La rappresentazione dei circuiti di retroazione ha senso solo, quindi, a condizione di introdurre la dimensione del tempo nell'analisi. Per farlo, è necessario ridefinire il termine generico *circuito di retroazione* con il termine, più preciso, di *circuito a retroazione di informazione*. Tale termine definisce un sistema per il quale lo stato in cui attualmente si trova fornisce le informazioni che orientano un'azione mirata a variarlo e, quindi, a plasmarne le azioni future (Forrester, 1961). Tale nozione favorisce la comprensione delle modalità secondo le quali le variabili coinvolte si influenzano nel tempo (Figura 5.11): da alcune variabili che rappresentano lo stato del sistema partono delle informazioni (*variabili di livello*), tali informazioni giungono ad altre variabili che hanno il ruolo di retroagire sulle prime cambiando lo stato del sistema e creando le

premesse per un nuovo ciclo di interazione (*variabili di flusso*). Sulla base della distinzione tra i due tipi di variabili, un circuito di retroazione è rappresentato correttamente quando, in una serie di variabili interconnesse in un circuito chiuso, esiste almeno una variabile di livello (Bianchi, 2009).

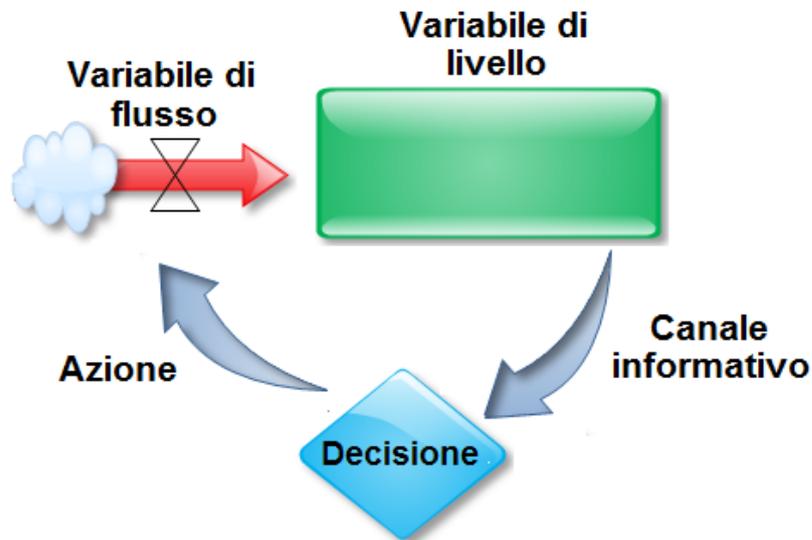


Figura 5.11 – Circuito a retroazione di informazione

La Figura 5.11, quindi, oltre a rappresentare la struttura basilare dei circuiti a retroazione di informazione, suggerisce, sulla scorta di un paragone fluidodinamico, quali sono i quattro elementi fondamentali della struttura di un modello di *System Dynamics* (Stermann, 2000):

- un insieme di *variabili di livello*, rappresentate come contenitori, che descrivono lo stato di un sistema;
- un insieme di *variabili di flusso*, rappresentate come valvole, che riempiono e svuotano le variabili livello cui sono connesse;
- un tessuto di *canali informativi* che trasportano le informazioni dalle variabili di livello alle variabili di flusso;
- un insieme di decisioni o di *funzioni di decisione* che descrivono il modo in cui le informazioni circa lo stato delle variabili di livello vengono utilizzate per azionare le variabili di flusso.

Le definizioni adoperate lasciano intendere che mentre le variabili di livello rappresentano lo stato di un sistema in un determinato istante, indipendentemente dal tempo e da quello che sta avvenendo nel momento in cui si conduce l'osservazione, le variabili di flusso contengono informazioni circa la dinamica del sistema e devono, quindi, essere descritte con riferimento ad un determinato istante. L'equazione che analiticamente fornisce il valore della variabile di livello in ogni istante, sarà:

$$L_t = L_{t_0} + \int_{t_0}^t F \cdot dt \quad (5.6)$$

dove L_t e L_{t_0} rappresentano, rispettivamente, il valore della variabile di livello all'istante t e t_0 e F è il valore istantaneo della variabile di flusso. Il legame esistente fra flusso all'istante t e il valore assunto dalla variabile di livello, rappresenta matematicamente il circuito di retroazione ed è esprimibile come:

$$\frac{dL}{dt} = f(L) \quad (5.7)$$

È importante ricordare che, normalmente, in un modello, esistono più circuiti di retroazione ed un numero imprecisato di variabili di livello e variabili di flusso; i circuiti di retroazione sono poi concatenati poiché ciascuna variabile di flusso, oltre che essere funzione della variabile di livello cui è direttamente connessa, può dipendere anche da altre variabili di livello comprese nel modello.

5.4. Modello logico, analitico e ipotesi di base

Come detto, scopo di questo e dei paragrafi a seguire è quello di fornire una rappresentazione di un RMS utile ad affrontare problemi di pianificazione e gestione della capacità, al variare degli stimoli provenienti dall'ambiente esterno e dei parametri di controllo adoperati.

È bene innanzitutto sottolineare che, a tal proposito, tanto la letteratura incentrata sulle tematiche di *Operations Management*, quanto quella relativa all'applicazione dei principi della *System Dynamics*, supporta il ricorso alla

modellazione continua del problema preso in considerazione (Sethi, et al., 2000; Anderson, et al., 2005).

Lo schema di riferimento per la costruzione del modello logico che successivamente verrà implementato in ambiente software, ricalca, sostanzialmente, quello presentato in Figura 5.12.

A seguito di una variazione della domanda proveniente dal mercato, si determinerà la necessità di adattare la capacità di cui è attualmente dotato il sistema produttivo. Quest'ultimo, essendo provvisto dei fattori abilitanti di tipo logico e di tipo fisico di cui si è detto nei capitoli precedenti, risponde, almeno in linea teorica, in modo estremamente rapido (Koren, et al., 1999).

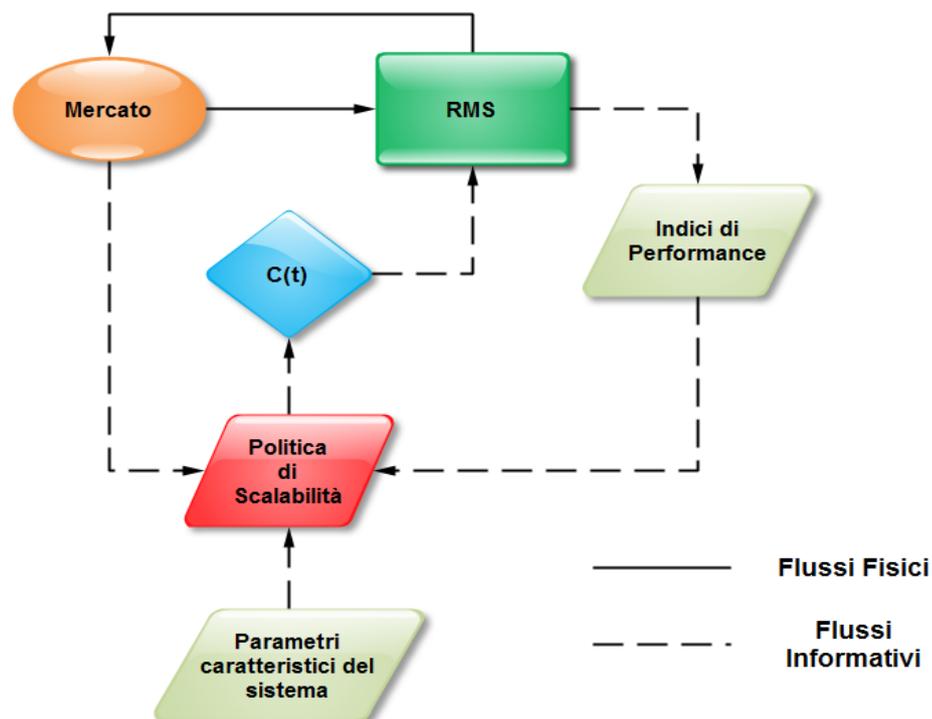


Figura 5.12 – Rappresentazione schematica del processo di adattamento della capacità di un Sistema Riconfigurabile di Produzione

Il processo di adattamento, tuttavia, non è influenzato esclusivamente dal volume della domanda ma anche:

- da una serie di parametri caratteristici del sistema e del processo produttivo, due fra tutti il tasso di utilizzazione delle risorse fisiche e il

tempo intercorrente fra l'istante nel quale si richiede la variazione della capacità del sistema e l'istante nel quale questa si rende effettivamente disponibile (Asl, et al., 2003);

- dagli obiettivi e dalle strategie di mercato adottate, che influenzano gli indici per la valutazione della performance del sistema considerato e, quindi, i parametri per ricalibrare la politica di scalabilità alla luce dei risultati ottenuti (Deif, et al., 2007).

È opportuno precisare che nel progettare il modello si farà specifico riferimento ad un ambiente *make-to-order*. L'estensione a sistemi operanti in ambiente *make-to-stock*, tuttavia, ne prevede una revisione solo parziale e comunque relativa principalmente alla fase di consegna del prodotto al cliente finale (il magazzino) (Stermann, 2000).

La domanda proveniente dal mercato è relativa ad una singola, specifica famiglia di prodotti; questo presuppone che le famiglie siano state progettate secondo i principi di cui al Capitolo IV. Si prescinde, inoltre, da problematiche di sequenziamento: gli ordini vengono processati nella sequenza secondo la quale sono piazzati nell'arco temporale preso in riferimento (*FIFO*). Tali ipotesi semplificative consentono di mettersi al riparo dalle problematiche derivanti dall'individuazione della politica secondo la quale effettuare la scelta fra più famiglie di prodotti e, dunque, consente di bypassare processi di riconfigurazione dovuti ad esigenze funzionali piuttosto che di variazione del volume della domanda. Come si avrà modo di sottolineare all'atto dell'implementazione del modello nel simulatore, tale limitazione non pregiudica i risultati ottenuti: tramite semplici considerazioni il modello è, infatti, estendibile al caso in cui vengano considerate più famiglie di prodotti.

I parametri caratterizzanti il sistema produttivo verranno considerati deterministici. Quest'ipotesi, per quanto semplificativa, è coerente con quanto proposto in letteratura ed è giustificata dalla necessità di ottenere il giusto compromesso fra complessità operativa registrata nell'intervallo temporale di

pianificazione e controllabilità del processo di adattamento della capacità (Deif, et al., 2009).

Sempre in quest’ottica, non sono stati fatte considerazioni circa i tempi occorrenti al sistema per raggiungere condizioni di regime, a valle di una eventuale riconfigurazione (tempi di *ramp-up* nulli).

5.1.1 Modello logico

Il modello logico di riferimento che verrà considerato, trae spunto da quanto detto nel paragrafo precedente ed è riconducibile al modello generale proposto in (Stermann, 2000), relativamente alla rappresentazione della *supply chain* e alla gestione delle giacenze inventariali.

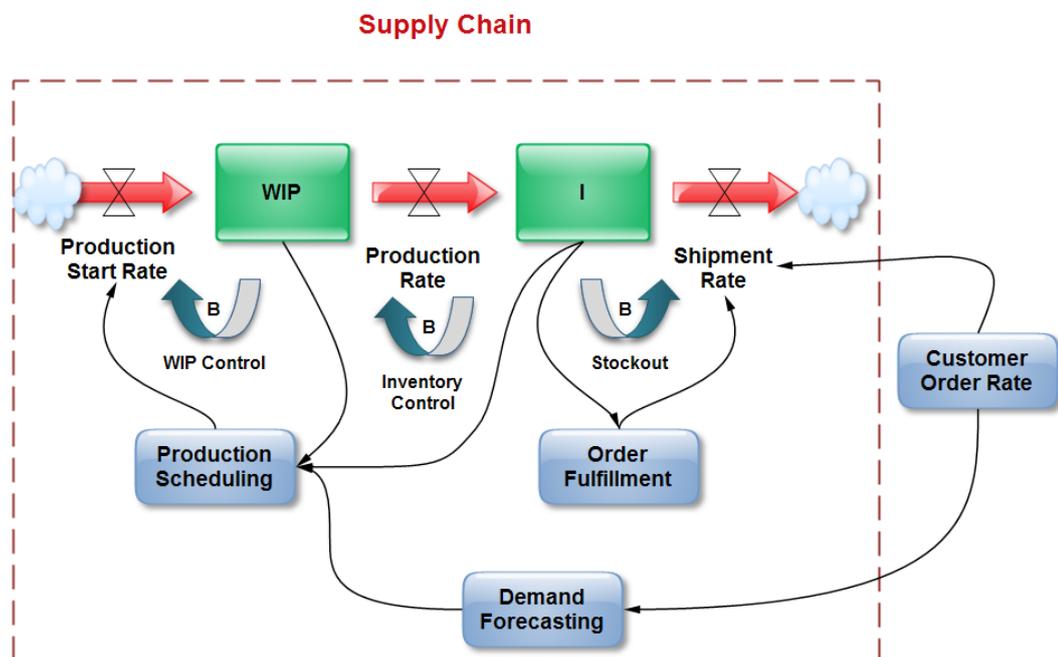


Figura 5.13 – Modello logico per la gestione delle giacenze inventariali in una supply chain (Stermann, 2000)

Nella Figura 5.14, oltre a considerare i tassi che caratterizzano un comune processo produttivo, sono riportati il flusso dei materiali che attraversano il sistema e i principali flussi informativi utili agli scopi proposti.

Più nello specifico, vengono monitorati, al trascorrere del tempo, tre parametri principali: il livello di *work-in-process* esistente nel sistema, il livello

- *Controllo I.* La seconda politica è basata sul controllo del livello inventariale del magazzino prodotti finiti, strutturata in modo da poter prendere in considerazione anche la propensione al rischio dell'azienda (Serman, 2000). In questo caso, definito un valore desiderabile del livello inventariale, la capacità del sistema verrà scalata al fine di adeguarne il livello attualmente esistente a quello desiderato;
- *Caccia.* La terza politica si basa su strategie di caccia della domanda. In questo caso il tasso di produzione iniziale del sistema viene uguagliato al tasso di ordinazione dei clienti e il meccanismo di scalabilità della capacità s'innescerà solo in corrispondenza di variazioni della domanda.

Sebbene non si faccia esplicito riferimento ai costi associati all'implementazione di ciascuna delle politiche proposte, il confronto permetterà di mettere in luce l'andamento dei fattori cui sono legati le principali aliquote che concorrono alla definizione del costo di produzione globale.

La materia prima per la realizzazione dei prodotti appartenenti alla famiglia presa in considerazione verrà ritenuta sempre disponibile e consegnata non appena richiesta. In sostanza, è stata volutamente trascurata la fase di approvvigionamento dei materiali.

Per quel che concerne la domanda proveniente dal mercato, si è preferito far ricorso all'analisi di scenari predefiniti. Tale scelta è giustificabile se si tiene presente che lo scopo è quello di effettuare un confronto fra le tre politiche di cui sopra ed evidenziare le condizioni operative e di mercato per le quali una risulta preferibile all'altra. D'altra parte gli andamenti presi in considerazione (*Scenario I* - Incremento a gradino, *Scenario II* - Andamento ciclico, *Scenario III* - Impulso) consentono la raccolta di informazioni di base che risulteranno utili anche in caso di scenari più complessi e non previsti a priori. Tuttavia, la parte del modello destinata a caratterizzare la domanda verrà progettata in modo da:

- poter sottoporre il sistema a stimoli esterni di tipo arbitrario, incorporando termini di memoria relativi all'andamento della domanda in un numero predefinito di periodi passati;
- poter prevedere un'influenza specifica delle performance offerte dal sistema sull'andamento futuro del mercato. Tale fattore, sebbene non direttamente considerato nelle analisi proposte, si rivela cruciale per una stima dei costi sostenuti più affidabile.

Si supponrà, almeno inizialmente, che il cliente sia disposto ad aspettare tutto il tempo necessario affinché il sistema possa processare l'ordine piazzato. Tale ipotesi, giustificata dall'impossibilità nell'approccio proposto di gestire eccezioni nella coda degli ordini, si riflette principalmente sulla parte del modello destinata alla gestione del *backlog*. Quest'ultimo, a seconda degli scenari analizzati e in assenza di vincoli esterni aggiuntivi, potrebbe assumere dimensione qualsiasi, condizione che, per quanto accettabile in un'analisi puramente teorica, risulta priva di riscontro in casi reali.

Infine, nell'implementazione del modello in ambiente software, bisognerà tener presente che:

- il tasso di produzione, oltre che dalla capacità di cui il sistema è dotato, dipende dal coefficiente di utilizzo dello stesso e dal tempo unitario di fabbricazione;
- il tasso al quale i prodotti vengono effettivamente consegnati al cliente, dipendono dal confronto fra un ipotetico valore desiderato, costruito sulla base degli ordini attualmente in coda al sistema, e il massimo valore che è possibile conseguire, costruito sulla scorta delle giacenze inventariali disponibili e del tempo minimo necessario per il soddisfacimento della richiesta.

5.1.2 Modello analitico

La nomenclatura relativa alle variabili adoperate nella progettazione analitica del modello è la seguente¹⁰⁹:

- $C(t)$: livello della capacità di cui il sistema è dotato all'istante t ;
- $B(t)$: livello del *backlog* all'istante t , ovvero numero di ordini in coda al sistema in attesa di essere processati;
- $I(t)$: livello inventariale del magazzino prodotti finiti all'istante t ;
- $WIP(t)$: livello del *WIP* circolante nel sistema all'istante t ;
- $BKO(t)$: volume totale degli ordini non soddisfatti fino all'istante t , assegnate le caratteristiche del sistema;
- $PR(t)$: tasso di produzione all'istante t ;
- $PSR(t)$: tasso iniziale di produzione all'istante t . Viene posto pari al tasso con il quale vengono piazzati gli ordini nel tempo t ;
- $COR(t)$: tasso con il quale il consumatore piazza gli ordini all'istante t ;
- $OR(t)$: tasso di ordinazione all'istante t . È una variabile d'appoggio per la definizione del livello del *backlog* esistente nel sistema in un determinato istante. È il flusso informativo rappresentativo del tasso al quale i prodotti entrano nel sistema ed è posto pari a $CO(t)$;
- $OFR(t)$: Tasso di soddisfacimento degli ordini all'istante t . È una variabile d'appoggio per la definizione del livello del *backlog* esistente nel sistema in un determinato istante t . È il flusso informativo rappresentativo del tasso al quale i prodotti lasciano il sistema;
- $TRT(t)$: Tempo di risposta del sistema (*Target Responsiveness Time*). Rappresenta l'intervallo di tempo intercorrente tra il piazzamento e l'effettiva ricezione degli ordini. Quanto più tale intervallo è ristretto, tanto più il sistema si dimostra pronto a cogliere le opportunità offerte dal mercato;

¹⁰⁹ La trattazione analitica proposta è coerente con quanto riportato in (Stermann, 2000) e (ElMaraghy, et al., 2007).

- $DSR(t)$: Tasso di consegne desiderato all'istante t , alla luce del numero di ordini in coda al sistema allo stesso istante;
- $ShR(t)$: Tasso di consegna effettivo all'istante t . Rappresenta il tasso dei prodotti che fisicamente lasciano il sistema;
- $MSR(t)$: Tasso massimo di consegna all'istante t , alla luce dell'attuale livello inventariale esistente nel magazzino prodotti finiti;
- $MOPT$: Tempo minimo di processamento di un ordine;
- SSC : Scorta di sicurezza. È una misura della propensione al rischio dell'azienda. Piuttosto che essere espressa in termini di unità fisicamente presenti in magazzino è, per esigenze di compatibilità delle unità di misura adoperate nel modello, il periodo di tempo in cui è garantita la copertura da inaspettate variazioni della domanda. Questo si rifletterà sulla necessità di disporre di uno specifico buffer di prodotti finiti. Al crescere di tale valore crescono i costi di mantenimento ma anche il livello di servizio garantito al cliente;
- DIC : Copertura inventariale desiderata. Anche in questo caso si tratta del tempo di copertura garantito dal livello inventariale attualmente esistente per assicurare spedizioni al tasso atteso;
- IAT : Tempo per la regolazione del livello inventariale. È un indice di reattività del sistema produttivo e rappresenta il tempo necessario per reagire alla discrepanza esistente tra il livello inventariale attualmente esistente nel magazzino prodotti finiti e quello desiderato;
- $DI(t)$: Livello inventariale desiderato all'istante t . Funzione del valore attuale della domanda e del valore della copertura inventariale desiderata;
- $AI(t)$: Tasso al quale viene effettuata, all'istante t , la regolazione dell'inventario alla luce del livello inventariale desiderato allo stesso istante;

- $DWIP(t)$: Livello di *work-in-process* desiderato all'istante t . Funzione del tasso al quale vengono realizzati i prodotti e del tempo unitario di produzione;
- OBL : Valore limite imposto al *backlog* di sistema, qualora esistesse;
- U : Coefficiente di utilizzazione delle risorse del sistema;
- MLT : *Lead Time* di fabbricazione. È il tempo necessario per processare i prodotti;
- W_i : variabile ausiliaria adoperata per “pesare” l'importanza relativa del livello inventariale attualmente esistente nel prendere decisioni circa la scalabilità della capacità del sistema;
- W_p : variabile ausiliaria adoperata per “pesare” l'importanza relativa del valore attuale della domanda nel prendere decisioni circa la scalabilità della capacità del sistema;
- $RC(t)$: Capacità richiesta all'istante t al sistema produttivo alla luce della politica di gestione adottata;
- SDT : *Scaling Delay Time*, ovvero lasso temporale necessario per scalare la capacità del sistema. In tale intervallo, a seconda delle operazioni fisicamente realizzate sul sistema, potrebbe rendersi o meno necessaria la sospensione delle attività produttive;
- $SR(t)$: Tasso di scalabilità del sistema all'istante t , alla luce dell'entità della variazione del volume produttivo richiesta e del tempo occorrente per realizzarla;
- MUT : Tempo unitario di produzione. Adoperato al fine di garantire la consistenza dal punto di vista dimensionale nel passaggio da tasso di produzione a prodotti finiti in ingresso al magazzino;
- $INPUT(t)$: Fattore adoperato per la manipolazione, istante per istante, dell'andamento di base della domanda di mercato;
- $INCOR$: Andamento di base della domanda di mercato.

5.1.2.a Pianificazione e controllo della capacità del sistema

Le decisioni circa la scalabilità della capacità sono controllate attraverso il tasso di scalabilità del sistema:

$$\frac{dC}{dt} = SR(t) \quad (5.8)$$

dove:

$$SR(t) = \frac{C(t) - RC(t)}{SDT} \quad (5.9)$$

La capacità richiesta è funzione della strategia aziendale ed è per questo espressa come somma di tre termini, ciascuno relativo ad una specifica politica di pianificazione e controllo:

$$RC(t) = \left[(W_p * PSR(t)) + (W_i * AI(t)) + \left((1 - W_p - W_i) * \frac{WIP(t)}{MLT} \right) \right] * MUT \quad (5.10)$$

dove $0 \leq W_p \leq 1$ e $W_p + W_i \leq 1$.

Sebbene W_p e W_i , così come definiti, consentano di prendere in considerazione più aliquote contemporaneamente (*strategie ibride*), si è preferito analizzare i casi in cui il peso totale fosse spostato su uno solo dei due coefficienti. Tali impostazione è giustificata dal fatto che nella pratica aziendale, a causa dell'evidente incremento dello sforzo richiesto, difficilmente viene effettuata una pianificazione della capacità basata sul controllo contemporaneo del *WIP*, del livello inventariale e della domanda. Piuttosto, in specifiche situazioni (operazioni di marketing, esigenze operazionali straordinarie), potrebbe verificarsi una ritaratura del processo, spostando l'attenzione da una variabile all'altra.

In definitiva, è stato previsto il ricorso alle seguenti politiche di pianificazione e controllo della capacità del sistema riconfigurabile:

- politica basata sull'inseguimento della domanda. In questo caso si verifica $PSR(t) = COR(t)$ e $W_p = 1$, il sistema reagisce adattando esattamente la propria capacità alla domanda proveniente dal mercato;

- politica basata sul controllo del livello inventariale esistente nel magazzino prodotti finiti. È ottenuta ponendo $W_i = 1$, il sistema reagisce adattando la propria capacità esclusivamente in funzione del gap esistente fra livello inventariale desiderato e livello inventariale attuale. La variabile $AI(t)$ è quella che consente la regolazione del sistema;
- politica basata sul controllo del livello di WIP . È ottenuta ponendo $W_p = W_i = 0$, il sistema reagisce adattando la propria capacità in modo che il livello di WIP ¹¹⁰ rimanga costante nel tempo.

5.1.2.b Controllo del livello inventariale

La variazione del livello inventariale nel magazzino prodotti finiti è esprimibile come:

$$\frac{dl}{dt} = PR(t) - ShR(t) \quad (5.11)$$

Il controllo del livello delle giacenze nel magazzino prodotti finiti si basa, tuttavia, sulla valutazione della discrepanza esistente fra un valore desiderato e quanto attualmente disponibile:

$$AI(t) = \frac{DI(t) - I(t)}{IAT} \quad (5.12)$$

dove il valore desiderato del livello inventariale è:

$$DI(t) = COR(t) \cdot DIC \quad (5.13)$$

e il termine relativo alla copertura desiderata è:

$$DIC = MOPT + SSC \quad (5.14)$$

Quest'ultimo termine si compone anch'esso di due aliquote: la prima affinché il produttore possa garantirsi la copertura inventariale necessaria in funzione della domanda prevista, la seconda, relativa al conseguimento di un adeguato livello di servizio in caso di variazioni non previste a priori.

¹¹⁰ La variazione del livello di WIP circolante nel sistema è calcolata adattando la *legge di Little* secondo la seguente espressione $WIP = RC \times MLT$ (Bertsimas, et al., 1995).

È doveroso sottolineare che il termine $AI(t)$ risente della reattività del sistema e cioè del valore assunto dalla variabile IAT . Se al sistema è richiesto di adeguare velocemente il valore del livello inventariale (IAT piccolo), verosimilmente, dovrà essere proporzionalmente rapida la variazione della capacità di cui il sistema si dota.

5.1.2.c Controllo del livello del work-in-process

Il livello di WIP circolante all'interno del sistema è dato dalla differenza nel tempo fra il tasso di produzione iniziale e quello attuale:

$$\frac{dWIP}{dt} = PSR(t) - PR(t) \quad (5.15)$$

Se si suppone che inizialmente il sistema sia dotato della capacità necessaria per soddisfare la domanda proveniente dal mercato, è possibile porre:

$$PSR(t) = COR(t) \quad (5.16)$$

Il tasso di produzione è legato alla capacità di cui si dota il sistema, scalata di un fattore di utilizzazione per tenere conto delle sue reali condizioni di impiego:

$$PR(t) = \frac{C(t)*U}{MUT} \quad (5.17)$$

Il valore di U , date le caratteristiche con le quali è progettato il sistema, dovrebbe attestarsi su valori sufficientemente alti (90% ÷ 95%), indipendentemente dalla configurazione adottata (Koren, 2003; Deif, et al., 2009).

5.1.2.d Domanda del mercato

Come detto in precedenza, si è proceduto modellando la domanda del mercato nel modo più generale possibile, così da poter ampliare, all'occorrenza, il ventaglio degli scenari nei quali testare il sistema.

Formalmente la variabile $COR(t)$ è definita come prodotto di due aliquote:

- $INCOR$, termine di riferimento, fissato a priori e invariante;

- $INPUT(t)$, termine variabile dalla cui regolazione è possibile modellare la funzione rappresentativa della domanda.

La seconda aliquota, più nello specifico, racchiude in sé un insieme di fattori, ciascuno in grado di cogliere le singole componenti che potrebbero eventualmente costituire la domanda¹¹¹:

$$\begin{aligned}
 INPUT = & \\
 & 1 + STEP(STEP_ - HEIGHT, STEP_ - TIME) + ((PULSE_QUANTITY) / \\
 & (TIME_STEP)) \cdot PULSE((TIME_STEP) / (1, PULSE_ - TIME, 0)) + \\
 & RAMP(RAMP(RAMP_ - SLOPE, RAMP_ - START_TIME) - RAMP(RAMP_ - \\
 & SLOPE, RAMP_ - END_TIME)) + SINE_AMP \cdot SIN(2 \cdot 3,14159 \cdot TIME / \\
 & (SINE_PER)) + STEP(1, NOISE_START_TIME) \cdot PINK_NOISE \quad (5.18)
 \end{aligned}$$

La terminologia adottata nella (5.18) è tipica dell'ambiente software adoperato per effettuare le simulazioni, nel quale vengono messe a disposizione alcune funzioni di *Test Input*:

- *Pulse (volume, first pulse, interval)* - Genera un impulso di una certa dimensione (*volume*). Il software consente di specificare l'istante in cui tale impulso si deve presentare (*first pulse*), così come l'eventuale intervallo tra due impulsi successivi (*interval*). È necessario sottolineare che, a partire dall'istante specificato, si presenterà un impulso di altezza pari al volume specifico; quest'ultimo è fornito dal rapporto tra il *volume* e il *DT* impostato per la regolazione del tempo di sistema;
- *Ramp (slope, time)* - Genera un input linearmente crescente o decrescente con una certa pendenza (*slope*) a partire da un determinato istante (*time*);
- *Step (height, time)* - Genera un gradino di una certa ampiezza (*height*) a partire da un determinato istante di tempo (*time*);

¹¹¹ In questo modo sarà possibile prendere in considerazione anche eventuali componenti stocastiche.

- *SIN* (radians) - Adoperato nella forma più complessa $SINE_AMP \cdot SIN(2 \cdot 3,14159 \cdot TIME/SINE_PER)$ genera una fluttuazione sinusoidale di una certa ampiezza (*SINE_AMP*) e periodo (*SINE_PER*).

Se la regolazione avviene in modo da rendere nullo il contributo dei parametri costituenti il termine *INPUT*, la domanda sarà costituita dal solo termine costante favorendo la valutazione delle condizioni di equilibrio necessarie per l’inizializzazione del modello software.

All’interno della (5.18) è inoltre presente il termine *PINK_NOISE*¹¹², attraverso il quale è stato possibile modellare la domanda grazie ai tradizionali valori caratteristici (media e varianza), collegandola, nel contempo, alla sua storia passata tramite un coefficiente di correlazione. La formulazione matematica del termine deriva dalle seguenti:

$$Pink\ Noise(t) = Change\ in\ Pink\ Noise - Pink\ Noise_0 \quad (5.19)$$

$$Change\ in\ Pink\ Noise = \frac{Pink\ Noise(t) - White\ Noise(t)}{CT} \quad (5.20)$$

dove *CT* è il tempo di correlazione che cattura il livello d’inerzia che affligge il processo preso in considerazione.

Il termine *White Noise* (*t*) può essere generato a partire da una distribuzione normale o da una distribuzione uniforme nell’intervallo [-0.5, 0.5]:

¹¹² Nella teoria dei segnali, un *rumore bianco* è caratterizzato da potenza del segnale ugualmente distribuita al variare della frequenza. Il nome attribuitogli deriva dal fatto che una radiazione elettromagnetica di ugual spettro, emessa nella banda del visibile, apparirebbe all’occhio umano come luce bianca. Dal punto di vista statistico, un *rumore bianco* è una distribuzione caratterizzata da valori istantanei privi di correlazione.

Un *rumore rosa* o *rumore Flicker*, è un rumore caratterizzato da componenti a bassa frequenza con potenza più significativa rispetto a quella delle componenti in alta frequenza. Dal punto di vista statistico è legato al verificarsi di *effetti di memoria* che influenzano l’andamento di una qualsiasi variabile. In letteratura, è stato dimostrato più volte che le funzioni di autocorrelazione tipiche delle serie temporali economiche (serie relativa ai prezzi delle azioni, serie relativa all’andamento del *PIL*), non decadano in maniera esponenziale come ci si aspetterebbe se il processo di generazione della serie fossero semplici *processi autoregressivi* (Baillie, 1996). Piuttosto, queste si muovono verso un limite asintotico inferiore che, per quanto basso, è diverso da zero, ad indicare che gli eventi accaduti in un passato più o meno recente, continuano ad avere una certa influenza sui prezzi attuali o sui tassi di produzione (Granger, et al., 1996; Gontis, et al., 2007).

$$White\ Noise(t) = AD + \left[SD^2 \cdot \frac{(2 - (DT/CT))}{(DT/CT)} \right]^{0.5} \cdot Normal(0, 1, Seed) \quad (5.21)$$

dove:

- $AD(t)$ rappresenta la domanda media in t ;
- SD è la deviazione standard per la distribuzione della domanda;
- DT è il time step;
- $Seed$ è il seme per la generazione casuale delle variazioni della domanda stocastica;

oppure:

$$White\ Noise = AD + SD \cdot \left[(24 \cdot CT/DT)^{0.5} \right] \cdot Uniform(-0.5, 0.5, Seed) \quad (5.22)$$

dove:

- $Uniform(Min, Max, Seed)$ è una funzione in grado di generare una sequenza di valori estratti da una distribuzione uniforme nell'intervallo $[Min, Max]$;
- $Seed$, è il termine per l'inizializzazione del processo di estrazione della sequenza di valori;
- il termine $(24 \cdot CT/DT)^{0.5}$ è detto *fattore di scala*; questo interviene correggendo l'ampiezza del termine *white noise* in modo che la deviazione standard del *pink noise* in uscita uguali il valore specificato;

5.1.2.e Soddisfacimento della domanda del mercato

Il grado con il quale il sistema riesce a soddisfare gli ordini provenienti dai consumatori è regolato dalla variabile $OFR(t)$:

$$OFR(t) = ShR(t) \quad (5.23)$$

dove il tasso di consegna $ShR(t)$, nel caso di aziende *make-to-order* è esprimibile come¹¹³:

$$ShR(t) = \min(DSR(t), MSR(t)) \quad (5.24)$$

Tale espressione deriva da considerazioni circa le modalità secondo le quali si attiva il processo di produzione. In questo caso, infatti, l'azienda avrà interesse a consegnare solo ciò che viene effettivamente richiesto dal mercato o ciò che può consegnare al mercato (Figura 5.15).

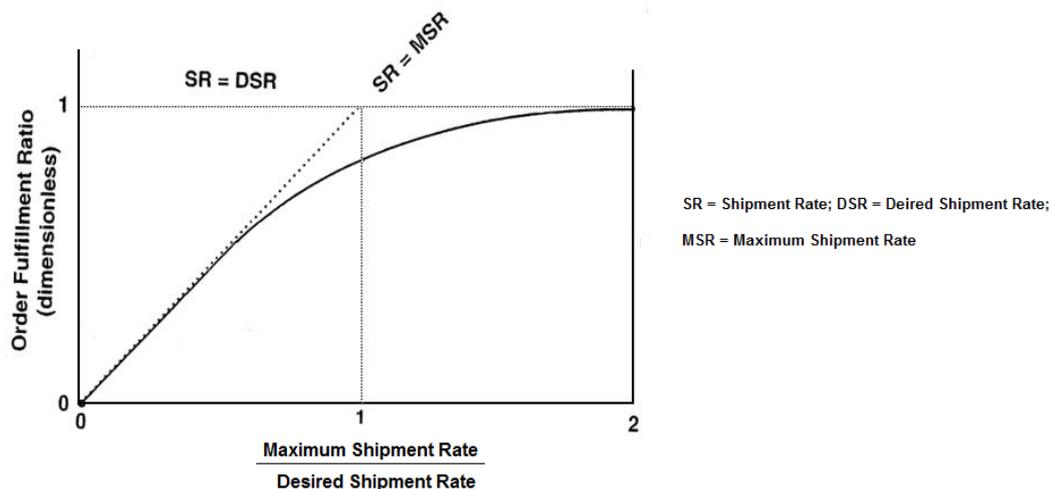


Figura 5.15 – Andamento del tasso di soddisfacimento degli ordini in funzione delle giacenze inventariali disponibili (Stermann, 2000)

Il tasso di consegna desiderato può essere calcolato in funzione del *backlog* all'istante t e del tempo di risposta di riferimento che il sistema è in grado di garantire:

$$DSR(t) = \frac{B(t)}{TRT} \quad (5.25)$$

Nei RMS, il termine TRT assumere valori bassi poiché il sistema è specificatamente progettato per rispondere repentinamente ai cambiamenti che lo

¹¹³ Nel caso di aziende operanti secondo logica *make-to-stock* è necessario considerare il massimo fra i due. L'azienda avrà, infatti, interesse a consegnare quanto più rapidamente possibile tutto ciò che ha attualmente a disposizione. Tale considerazione consente di adattare rapidamente il modello adoperato al caso di aziende che producono per il magazzino se al posto delle politiche di pianificazione e controllo della capacità adoperate, si definiscono quelle che meglio si adattano al *replenishment* dei magazzini.

interessano (Deif, et al., 2009). Inoltre, la variazione del livello del *backlog* è data da:

$$\frac{dB}{dt} = OR(t) - OFR(t) \quad (5.26)$$

con

$$OR(t) = COR(t) \quad (5.27)$$

Il valore massimo del tasso di consegne che il sistema è in grado di garantire è, invece, evidentemente legato alle disponibilità del prodotto finito in magazzino:

$$MSR(t) = \frac{I(t)}{MOPT} \quad (5.28)$$

5.2 Creazione del modello

Il modello da analizzare è stato ricostruito tramite il software¹¹⁴ *iThink*[®]. Più in particolare, si è fatto ricorso a quattro sottomodelli che fossero in grado di gestire, rispettivamente (Figura 5.16):

- la generazione della domanda e l'evoluzione del mercato;
- il processo di adattamento della capacità del sistema produttivo;
- il processo produttivo vero e proprio comprensivo della fase di consegna al cliente;
- gli ordini in coda al sistema e quelli andati persi.

Appare doveroso sottolineare che il software adoperato consente solo ed esclusivamente la verifica della congruità delle unità di misura adottate nella costruzione del modello. Sebbene non sia messa a disposizione dell'utente una vera e propria funzione di *debug*, la verifica di congruenza permette, in qualche

¹¹⁴ È stata adoperata la versione 9.0.1 del software, disponibile all'indirizzo: <http://www.iseesystems.com/software/Business/IthinkSoftware.aspx>. Allo stesso indirizzo sono disponibili diversi tutorial per la creazione e compilazione di modelli di *System Dynamics*. Infine, all'indirizzo <http://introduction-to-systems-thinking-with-it.software.informer.com/> è disponibile una guida multimediale all'intero pacchetto software.

modo, di assicurare la correttezza dei collegamenti adoperati e le assunzioni alla base della definizione delle singole variabili. A tal proposito c'è anche da sottolineare che il software “guida” nella definizione delle variabili (Figura 5.20) e avverte l'utente in caso dovessero determinarsi condizioni di “loop”, e quindi di indeterminazione, nella definizione delle relazioni che legano le variabili di stato nelle condizioni di equilibrio.

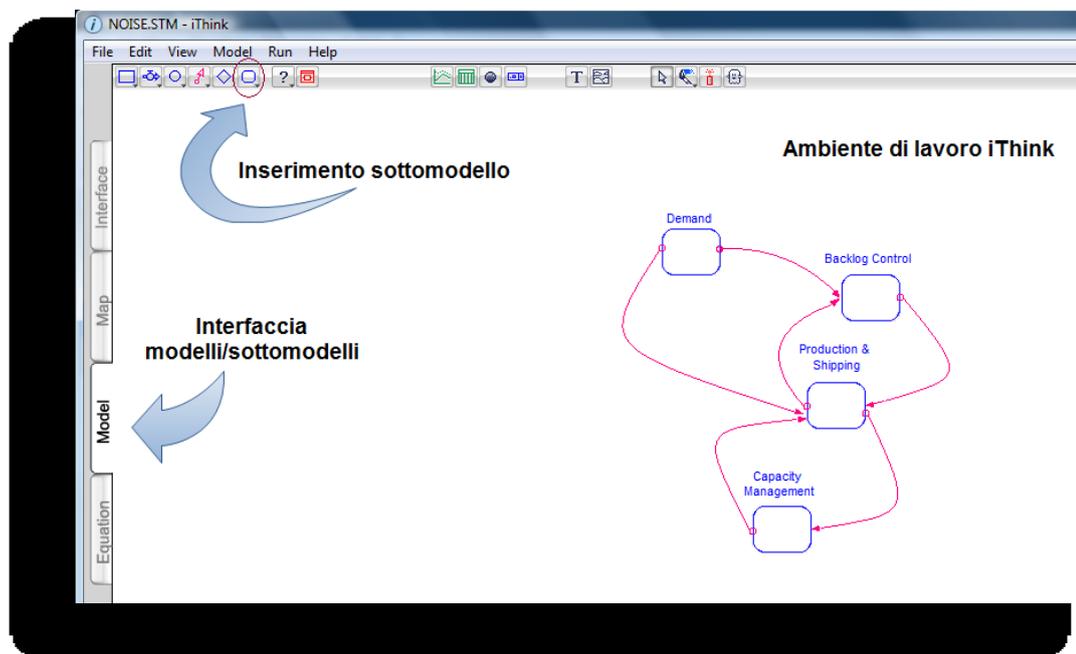


Figura 5.16 – Creazione dei moduli costituenti il modello in ambiente iThink

Nel modulo relativo alla generazione della domanda (Figura 5.17) è possibile individuare l'unica variabile di livello (*PINK NOISE*), responsabile della determinazione della variabile d'appoggio *INPUT* che, associata alla variabile *INITIAL COR*, concorre alla determinazione della domanda istante per istante. La variabile di flusso *CHANGE PINK NOISE*, analiticamente definita secondo quanto detto precedentemente, è responsabile delle variazioni nella variabile di livello.

Dalla Figura 5.17 è inoltre evidente il ricorso a variabili ausiliarie di tipo “slider”. Queste consentiranno, nell'ambiente “INTERFACCIA” del software, una più rapida variazione dei parametri costituenti la variabile d'appoggio *INPUT* (Figura 5.18).

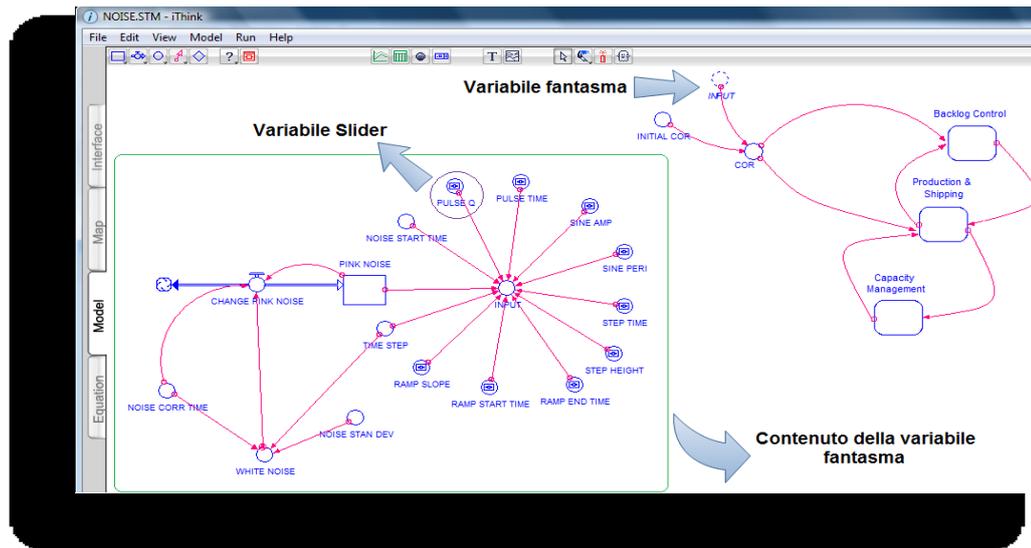


Figura 5.17 – Esplosione del modulo relativo alla generazione della domanda

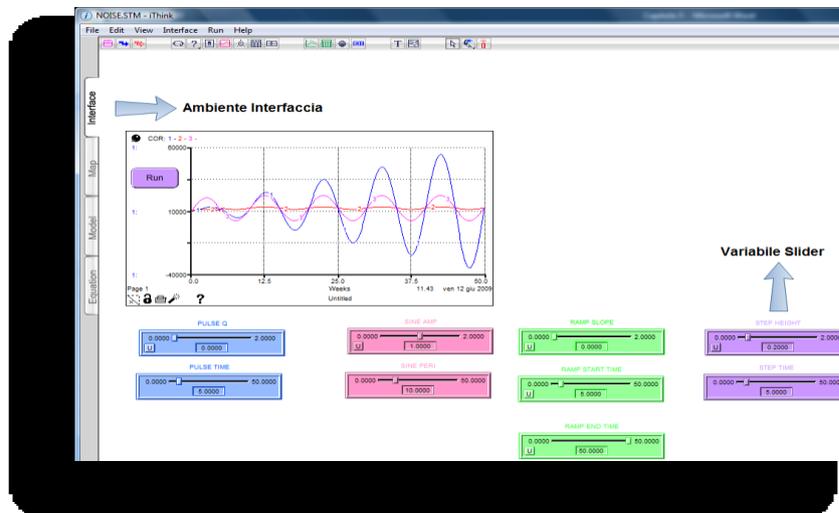


Figura 5.18 – Aspetto delle variabili che consentono il controllo del parametro INPUT nell’ambiente interfaccia di iThink

Per quel che concerne il modulo relativo alla fase di produzione (Figura 5.19) e consegna dei prodotti, sono state adoperate due variabili di livello per poter monitorare il *WIP* circolante nel sistema e le giacenze del prodotto finito (*I*). Non è presente un magazzino materie prime così come d’altra parte anticipato nel Paragrafo 5.1.1. Le variabili ausiliarie *DI* (*Desired Inventory*) e *DWIP* (*Desired Work-In-Process*) consentiranno, come meglio chiarito successivamente, l’inizializzazione del sistema in condizioni di equilibrio.

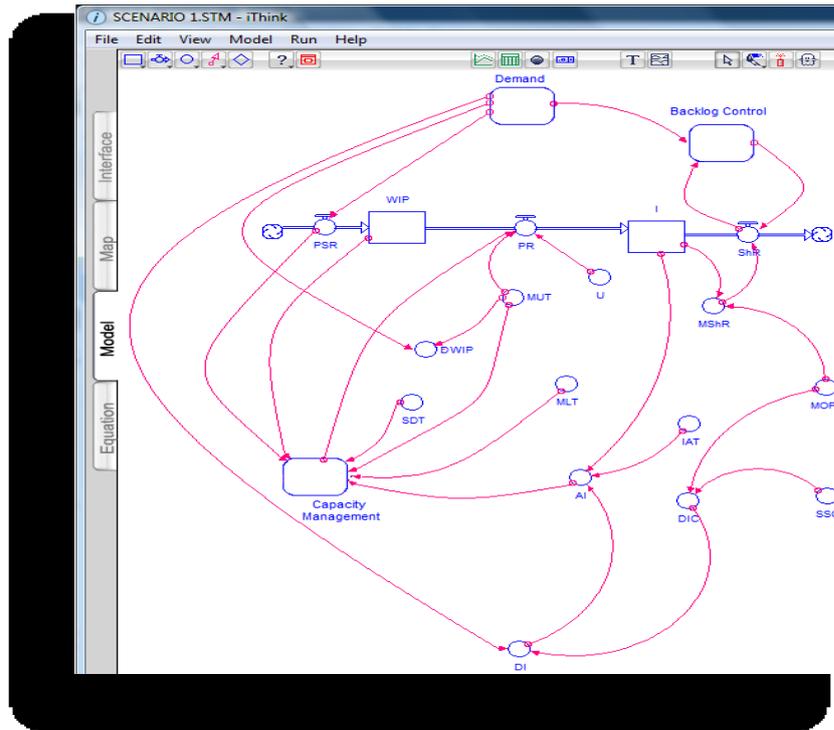


Figura 5.19 – Esplosione del modulo relativo al processo produttivo e alla consegna del prodotto al cliente

In Figura 5.20, invece, viene mostrata la procedura secondo la quale definire la variabile di flusso $ShR(t)$ (*Shipping Rate*), come funzione del livello inventariale attualmente disponibile e del numero di ordini in coda al sistema.

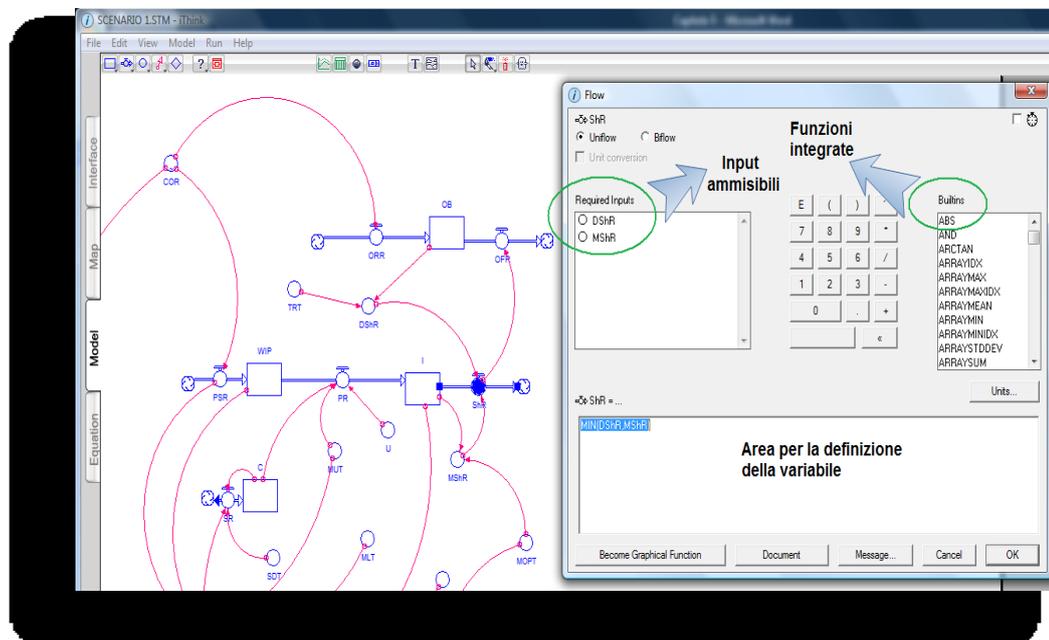


Figura 5.20 – Definizione della variabile di flusso $ShR(t)$

Il modulo per la gestione della scalabilità del RMS è rappresentato in Figura 5.21. In questo caso la variabile RC (*Required Capacity*) permette la scelta della politica da adoperare, impostando i valori assunti dalle variabili ausiliarie W_p e W_i , e consente la regolazione della variabile di livello C (*Capacity*), tramite la variabile di flusso SR (*Scaling Rate*). Quest'ultima, affinché possa assumere anche valori negativi, è stata modellata ricorrendo ad una rappresentazione biflusso¹¹⁵. I valori negativi consentiranno, qualora fosse necessario, la contrazione della capacità di cui il sistema è dotato, garantendo valori elevati del coefficiente di utilizzazione delle risorse.

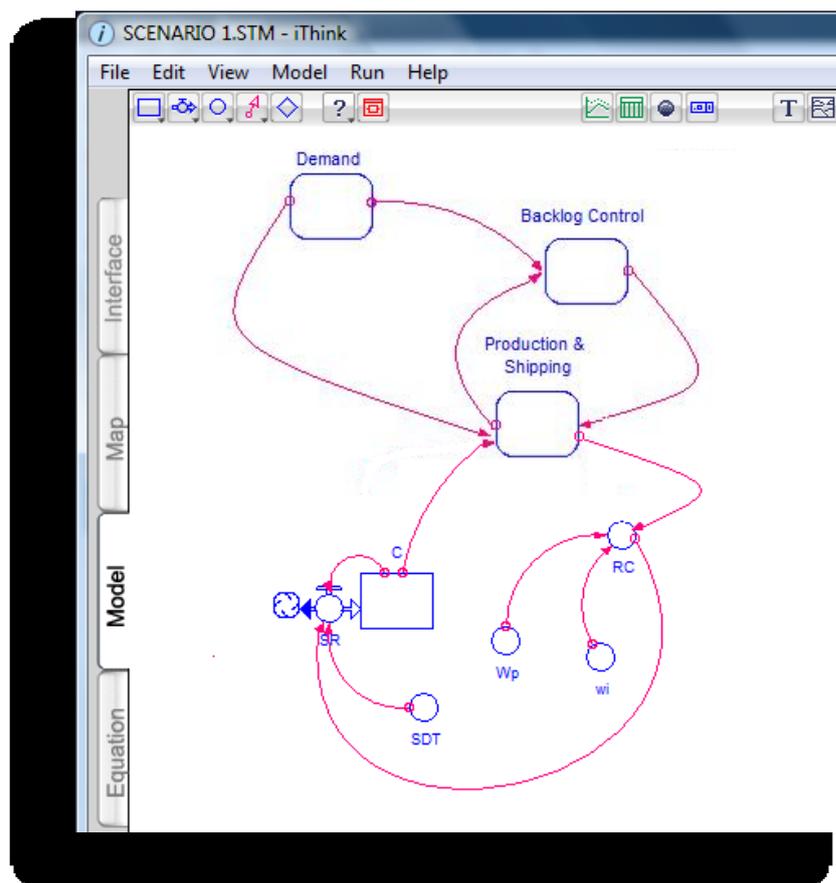


Figura 5.21 – Esplosione del modulo relativo alla gestione della capacità del RMS

¹¹⁵ Il software adoperato modella, per default, le variabili di flusso come variabili unidirezionali e non negative. Per rendere ammissibili valori negativi è necessario, dunque, agire esplicitamente sulla variabile. La direzione negativa del flusso sarà in questo caso rappresentata da una freccia con riempimento nero. Preme, inoltre, sottolineare che nel caso specifico la variabile $SR(t)$ è collegata ad un serbatoio di capacità, in grado di assorbire l'eventuale riflusso senza modificare il valore assunto dalle altre variabili di livello presenti nel modello e quindi lo stato del sistema.

Infine, in Figura 5.22 è rappresentato il modulo che consente il controllo degli ordini in coda al sistema (*backlog*) e di quelli andati persi (*backorders*). La presenza della variabile ausiliaria *OBL* è giustificata dal fatto che il software, quantomeno nella versione adoperata, non consente di limitare superiormente una variabile di livello. Per tale motivo sarà necessario confrontare il valore assunto dalla variabile in questione con quello di una variabile d'appoggio tarata sul valore limite desiderato. È necessario inoltre sottolineare che, con la tecnica di simulazione adottata, non è possibile “etichettare” un'entità, il che si traduce nell'impossibilità di stabilire delle condizioni di *time-out* secondo le quali far fuoriuscire un'entità dalla coda o imporre, nell'ambito dello stesso flusso¹¹⁶, priorità sugli ordini da processare.

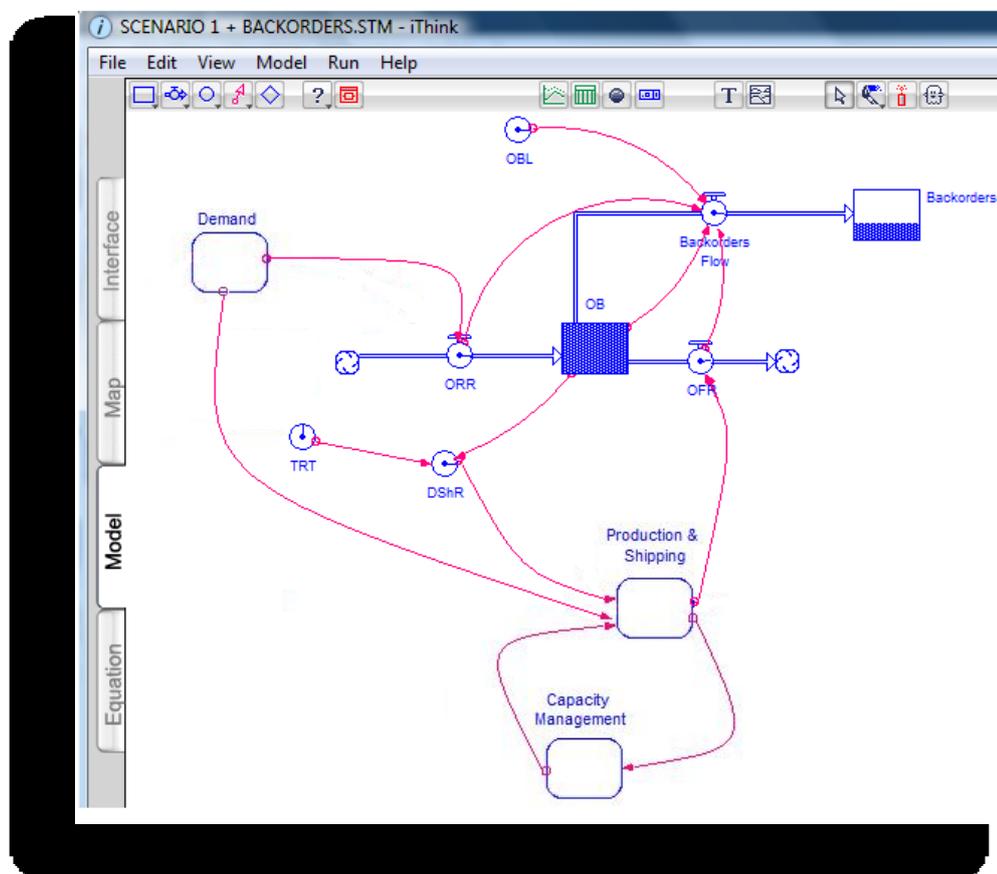


Figura 5.22 – Esplosione del modulo relativo al controllo del backlog e dei backorders

¹¹⁶ È tuttavia possibile impostare delle regole di priorità fra flussi convergenti in uno stesso serbatoio o divergenti verso un altro serbatoio e quindi consentire ad una “tipologia di entità” di affluire o defluire con una certa precedenza e secondo specifici tassi.

5.2.1 Inizializzazione del modello

Diversi parametri caratterizzanti il sistema produttivo verranno ritenuti noti a priori e costanti nel modello; solo successivamente, per alcuni, si renderà necessaria l'individuazione di un intervallo di variabilità all'interno del quale valutare in modo più approfondito il comportamento del RMS.

Analizzando quanto presente in letteratura¹¹⁷ è stato possibile ricavare i valori riportati in Tabella 5-1, relativi ad aziende operanti nel settore dell'elettronica di consumo. Tale tipologia di azienda ben si adatta al contesto considerato, sia per quel che concerne le specifiche del prodotto e del processo produttivo (prodotti modulari, flessibilità richiesta alle risorse fisiche, possibilità di sfruttare economie di scopo oltre che di scala), sia per quel che concerne le problematiche che lo affliggono (impatto dell'innovazione tecnologica sul prodotto e sul processo produttivo, mercati altamente concorrenziali e segmentati).

Tabella 5-1 - Valori dei parametri adoperati nel modello *iThink*[®]

PARAMETRI	VALORE	UNITÀ
TRT	2	Settimane
MLT	4	Settimane
SDT ¹¹⁸	2	Settimane
IAT	4	Settimane
MOPT	1	Settimane
SSC	1	Settimane
U	90%	
MUT	1	Settimane

¹¹⁷ Si veda a tal proposito (ElMaraghy, et al., 2007).

¹¹⁸ Aver ipotizzato un valore costante per *SDT* non lede alla genericità della trattazione visto che è verosimile che il tempo necessario per fermare la linea, scaricarne la capacità e successivamente riportarla a regime, siano elevati rispetto al tempo richiesto per installare le unità modulari che consentono il cambio della capacità. Tuttavia, alla luce dell'importanza assunta nei sistemi considerati, il parametro *SDT* sarà oggetto di specifiche analisi di sensitività

Affinché i risultati forniti dal simulatore non risentano delle condizioni iniziali in cui si trova il sistema, il modello verrà inizializzato all'equilibrio. Questo garantisce che una variazione delle variabili di stato del sistema sia dovuta esclusivamente ad una perturbazione delle condizioni ambientali in cui lo stesso si trova ad operare. In particolare, un sistema si dice in equilibrio quando (Stermann, 2000):

- tutti i flussi in ingresso e in uscita dalle variabili di livello sono nulli (*equilibrio statico*);
- le variabili di livello si assestano su un valore costante grazie all'uguaglianza tra flussi in ingresso e flussi in uscita (*equilibrio dinamico*).

Le condizioni da imporre sono differenti nell'uno e nell'altro caso ed è evidente che nell'analizzare la dinamica di sistemi complessi sia necessario fare riferimento a condizioni del secondo tipo. A tal proposito, è opportuno inizializzare le variabili di livello tramite relazioni fra i parametri del modello piuttosto che attraverso valori specifici¹¹⁹; in quest'ultimo caso, infatti, una perturbazione che interessi un qualsiasi parametro del sistema potrebbe richiedere la definizione di nuove condizioni di equilibrio (Coyle, 1996; Sterman, 2000).

Nel caso in esame, fissato uno specifico valore della domanda di mercato, affinché il modello possa ritenersi in condizioni di equilibrio deve verificarsi:

¹¹⁹ Alcuni modelli potrebbero essere caratterizzati dalla presenza di *condizioni di equilibrio simultanee* o potrebbero non essere inizializzabili in condizioni di equilibrio, perlomeno per come sono state qui definite. Questo si verifica soprattutto nel caso di modelli particolarmente complessi (si pensi a quelli riferiti alle previsioni dei mercati o legati a processi comportamentali dell'uomo), dove l'evoluzione di ciascuna delle parti costituenti il sistema influenza, contemporaneamente, il comportamento di più parti dello stesso. In questo caso potrebbe rivelarsi utile inizializzare ciascuno dei moduli componenti il sistema in condizioni di equilibrio locale o inizializzare il modello in condizioni stazionarie. Solo in ultima istanza il modello potrebbe essere oggetto di un processo di ottimizzazione iniziale secondo il quale le variabili di stato verrebbero inizializzate minimizzando una specifica funzione obiettivo, per poi lasciare che il sistema si evolva sottoposto agli stimoli esterni oggetto di interesse (Stermann, 2000).

$$\left\{ \begin{array}{l} PSR = PR = ShR \\ ORR = OFR^{120} \end{array} \right. \quad (5.29)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} WIP = DWIP \\ I = DI \\ C = RC \\ OB = TRT * COR \end{array} \right.$$

dove il primo gruppo di relazioni assicura le condizioni di equilibrio e il secondo garantisce delle condizioni di bilanciamento delle variabili di livello.

A conferma della bontà delle (5.29), in Figura 5.23 sono raffigurati gli andamenti delle variabili di interesse, simulati nell’arco di 100 settimane ed avendo posto $COR = 10.000$.

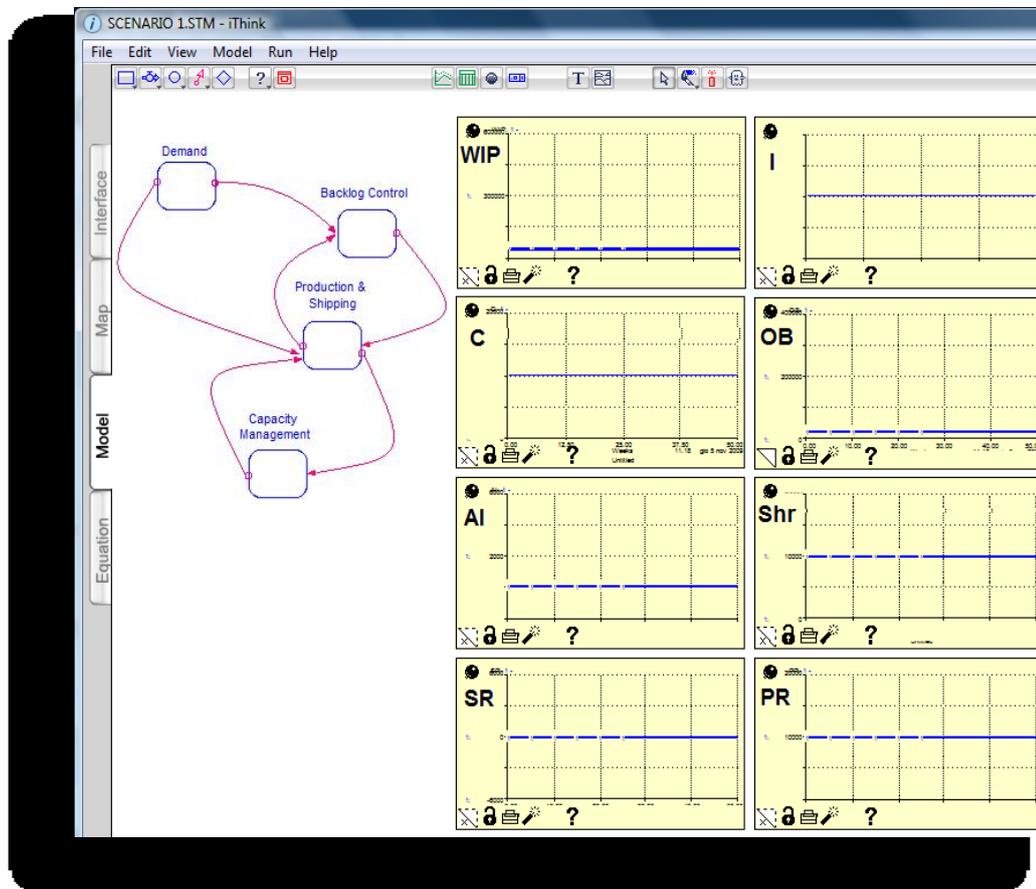


Figura 5.23 – Verifica delle condizioni di equilibrio imposte nel modello

¹²⁰ Tale relazione è, per come è progettato il modello, automaticamente verificata se è verificata la prima.

Per quanto riguarda il processo di simulazione vero e proprio, è stato fissato un orizzonte temporale di riferimento pari a 50 settimane. Tale lasso temporale rappresenta un giusto compromesso fra tempo richiesto per effettuare le simulazioni e necessità legate all'affidabilità dei risultati forniti dal simulatore. D'altra parte, come si avrà modo di osservare allorquando verranno proposti i risultati ottenuti, l'intervallo è sufficiente¹²¹ esteso sia per consentire la stabilizzazione delle variabili di livello, sia per interpretarne il comportamento nel caso in cui tale eventualità non dovesse verificarsi.

È stato inoltre necessario indicare la costante temporale cui il software dovrà far riferimento per simulare il trascorrere del tempo (DT) e il metodo di integrazione adottato per calcolare i valori assunti dalle variabili presenti nel modello (Figura 5.24).

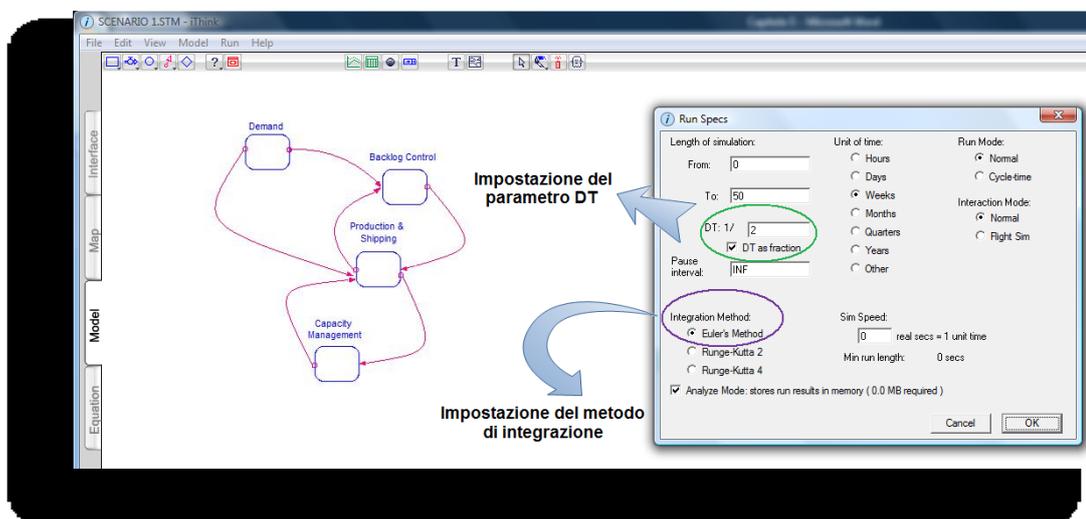


Figura 5.24 – Impostazione del parametro che regola lo scorrimento del tempo e del metodo di integrazione adottato¹²²

¹²¹ In realtà, nel caso di domanda variabile periodicamente, l'intervallo temporale di riferimento verrà esteso a 90 settimane qualora fosse utilizzata una politica di caccia della domanda.

¹²² La finestra in questione è accessibile tramite il menu *Run*, situato nella barra dei comandi principali del software, alla voce *Run Specs*. Si tenga presente che il parametro in questione, giacché rappresenta il più piccolo intervallo di tempo all'interno del quale è possibile verificare un cambiamento di stato del sistema, influenza anche il numero di volte che viene effettuata la correzione dei valori assunti dalle variabili nell'unità di tempo, con conseguente incremento del tempo necessario per lo svolgimento delle simulazioni.

Per quel che concerne il primo punto, si è fatto riferimento a quanto suggerito nella documentazione tecnica allegata al software¹²³. Più precisamente, è stato preso in considerazione uno degli scenari analizzati (*domanda a gradino*) e, adoperando lo stesso metodo di integrazione, sono stati registrati i valori delle variabili di interesse per ciascuna delle tre politiche di riferimento in corrispondenza dei valori $DT = 1$ e $DT = 0,5$ (*Test del dimezzamento*). I risultati numerici ottenuti nei due casi differiscono, mediamente, dell'ordine dell'1%, mentre non sono apprezzabili variazioni nei diagrammi rappresentativi dell'andamento nel tempo delle variabili di interesse. Questo ha consentito di impostare per gli altri scenari di riferimento $DT = 1$.

Aver impostato il parametro di riferimento temporale su un valore unitario ha consentito il ricorso al *Metodo di Integrazione di Eulero*. Metodi di integrazione più raffinati (*Metodo di Runge-Kutta*) sono infatti giustificabili solo allorquando fosse necessario adoperare valori di DT prossimi a 0,25, per i quali il *Metodo di Eulero* potrebbe comportare errori di integrazione più consistenti¹²⁴ (Volino, et al., 2001).

5.3 Analisi del modello

Gli scenari di interesse, il cui andamento è illustrato in Figura 5.25, e le politiche di scalabilità della capacità confrontate, saranno nel seguito così denominati:

- *Scenario I* - Incremento della domanda a gradino ($\Delta COR = +20\%$ rispetto al valore iniziale posto pari a 10000 unità/settimana, a partire dalla decima settimana);

¹²³ Accessibile tramite il menu *Help*, situato nella barra dei comandi principali del software.

¹²⁴ A titolo di esempio, nel caso si ricorra al *Metodo di Eulero*, il valore di una qualsiasi variabile di livello è calcolato come:

$$Stock_t = Stock_{t-dt} + \Delta Stock \quad \text{e} \quad \Delta Stock = dt * flow;$$

mentre, nel caso si ricorra al *Metodo di Runge-Kutta* del secondo ordine, sarà:

$$Stock_t = Stock_{t-dt} + \Delta Stock \quad \text{e} \quad \Delta Stock = 1/2 * (F_1 + F_2);$$

dove:

$$F_1 = dt * f(t, x) \text{ (flusso calcolato con il Metodo di Eulero);}$$

$$F_2 = dt * f(t+dt, x + F_1).$$

- *Scenario II* - Andamento ciclico della domanda ($\Delta COR = \pm 20\%$ rispetto al valore iniziale posto pari a 10000 unità/settimana, a partire dalla decima settimana);
- *Scenario III* – Domanda con impulso ($\Delta COR = +20\%$ rispetto al valore iniziale posto pari a 10000 unità/settimana, in corrispondenza della decima settimana);
- *Politica 1* - Regolazione in base al *WIP*;
- *Politica 2* - Regolazione in base al livello inventariale *I*;
- *Politica 3* - Regolazione in base alla domanda.

L'intervallo temporale di riferimento è fissato pari a 50 settimane. Inoltre, per una rappresentazione più efficace, si è preferito esportare in appositi fogli Excel i risultati forniti di volta in volta dal simulatore, affinché potessero essere successivamente adoperati come base dati per la costruzione dei relativi diagrammi¹²⁵.

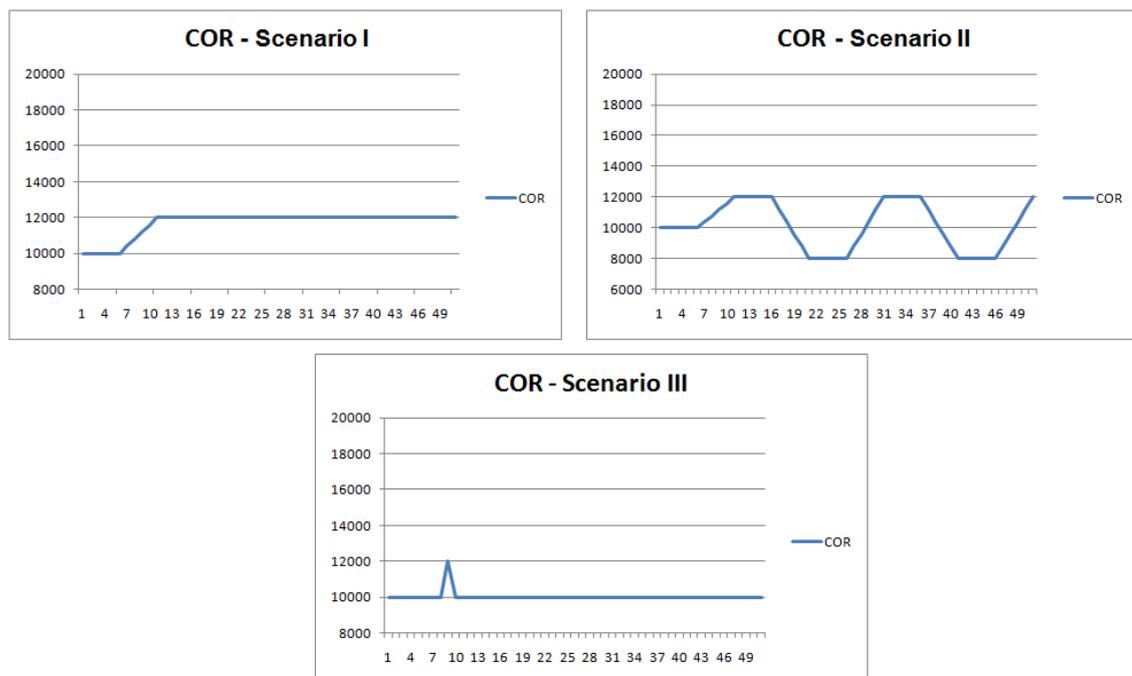


Figura 5.25 – Andamento della domanda nell’arco temporale di riferimento

¹²⁵ Per l’esportazione dei risultati in specifici formati, è necessario accedere alla voce *Export Data* tramite il menu *Edit* situato nella barra dei comandi principali del software. Per la costruzione dei diagrammi i è stato adoperato *Microsoft® Excel 2007*.

5.3.1 Analisi dei risultati – Scenario I

In Figura 5.26 sono riportati gli andamenti, sostanzialmente speculari, della variabile di livello $C(t)$ e della variabile di flusso $PR(t)$ garantiti dalle politiche oggetto di confronto. Per quanto sia auspicabile il raggiungimento di valori quanto più prossimi a ciò che è effettivamente richiesto dal mercato, al fine di:

- minimizzare il tempo entro il quale gli ordini in coda al sistema sono serviti, nel caso in cui non esistano vincoli sulle dimensioni della coda in questione;
- minimizzare il numero di ordini che non possono essere confermati, a causa della saturazione della disponibilità del sistema in un prefissato orizzonte temporale (*backlog limitato*);

è altrettanto verosimile ritenere che l'entità della riconfigurazione, e quindi il costo ad essa associato, sia proporzionale all'incremento di capacità richiesto.

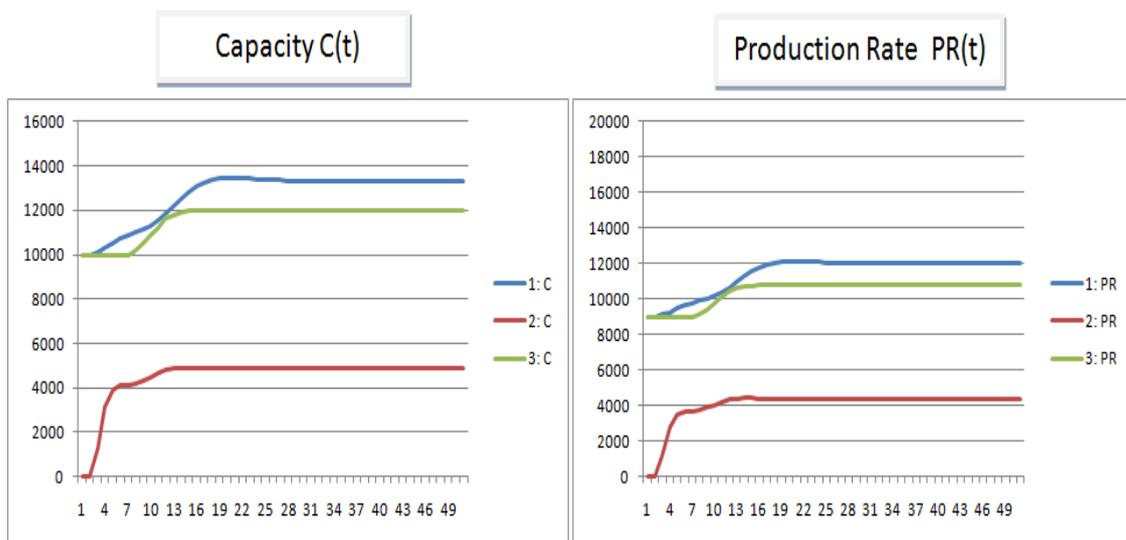


Figura 5.26 – Andamento della variabile di livello Capacità e della variabile di flusso Tasso di Produzione

A tal proposito, la *Politica 3*, come era lecito attendersi, consente il conseguimento di un valore della capacità di cui dotare il sistema in linea con le richieste del mercato. Per mantenere costante il livello di *WIP* circolante nel sistema (*Politica 1*) è necessario raggiungere valori della capacità installata

superiori, rispetto al caso precedente, di circa l'11%, mentre la riduzione della differenza fra il livello inventariale effettivamente registrato nel magazzino prodotti finiti e quello desiderato (*Politica 2*), necessita di un incremento della capacità inferiore di circa il 60%. Si noti inoltre che la stabilizzazione di $C(t)$ si registra, nel caso della *Politica 1*, in tempi più consistenti (settimana 28, +40% rispetto alla *Politica 3*).

Tali risultati, tuttavia, diventano significativi solo se letti alla luce dell'andamento della variabile di flusso *Scaling Rate*. In questo caso, è necessario sottolineare come sia rilevante l'andamento della variabile piuttosto che i valori raggiunti in termini assoluti; è dalla regolarità dell'andamento¹²⁶, infatti, che si traggono informazioni aggiuntive circa gli sforzi necessari per portare a termine il processo di riconfigurazione (Deif, et al., 2006). Dall'andamento riportato in Figura 5.27 appare evidente come, in corrispondenza della *Politica 2*, a causa della repentina riduzione del livello inventariale registrata e del tempo necessario a compensarla (Figura 5.31), sia necessaria una variazione consistente e prematura della capacità attuale del sistema.

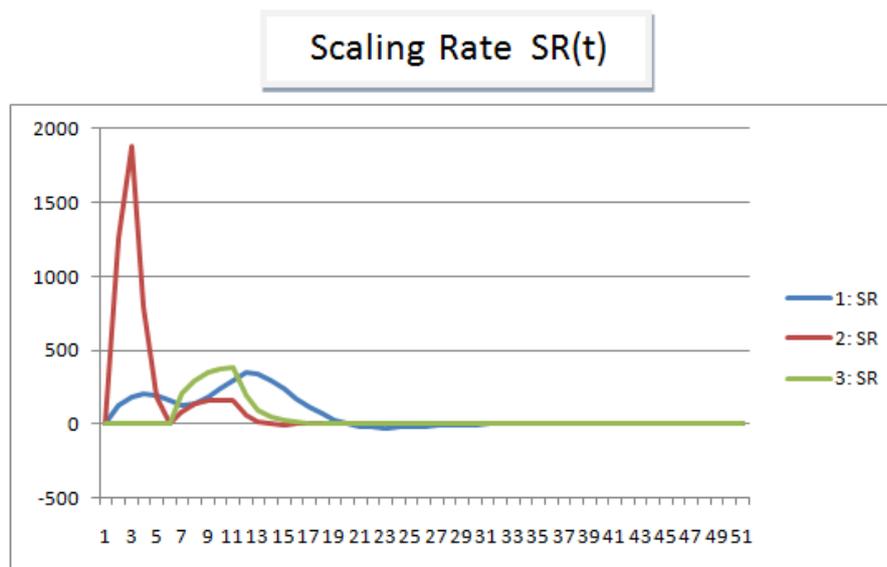


Figura 5.27 – Andamento della variabile di flusso *Scaling Rate*

¹²⁶ In termini di numero di picchi registrati nell'orizzonte temporale di riferimento e di consistenza della pendenza delle curve rappresentative.

La *Politica 3* presenta l'intervallo di assestamento della variabile più breve (13 settimane), la regolazione avviene in un'unica soluzione, con andamento più repentino a valle del raggiungimento del valore massimo. È a tale politica, dunque, che è associato il minor sforzo relativamente alla fase di riconfigurazione del sistema. Per quel che concerne la *Politica 1*, invece, sebbene necessiti di un arco temporale più consistente (23 settimane) per il raggiungimento del valore target della capacità, presenta una fase di regolazione piuttosto regolare dal punto di vista dinamico e sicuramente preferibile rispetto a quella mostrata dalla *Politica 2*.

L'analisi congiunta del volume degli ordini in attesa di essere processati e del tasso di consegna garantito al cliente è di particolare interesse nella valutazione della performance di un RMS. In questo modo, infatti, è possibile acquisire importanti indicazioni circa la capacità del sistema di soddisfare con prontezza il mercato. Prima di prendere in considerazione i risultati ottenuti, è necessario sottolineare che nelle simulazioni si è preferito, almeno inizialmente, non limitare superiormente il valore assunto dalla variabile. D'altra parte, l'interazione con il modulo relativo alle fasi di produzione e consegna, è guidata dall'andamento di $OB(t)$ solo fintantoché è $DSR(t) < MSR(t)$, limite oltre il quale è la giacenza inventariale a regolare la fase di consegna. Dalla Figura 5.28 si evince la scarsa sensibilità della *Politica 2* al mercato. Questa presenta andamento della variabile crescente non solo in corrispondenza dell'intervallo temporale in cui si verifica la variazione della domanda, ma anche nella fase di stabilizzazione della stessa sul nuovo valore di riferimento. La regolazione della capacità in base alle giacenze inventariali non consente, evidentemente, il conseguimento di valori del tasso di consegna dei prodotti compatibili con le richieste del mercato (Figura 5.29).

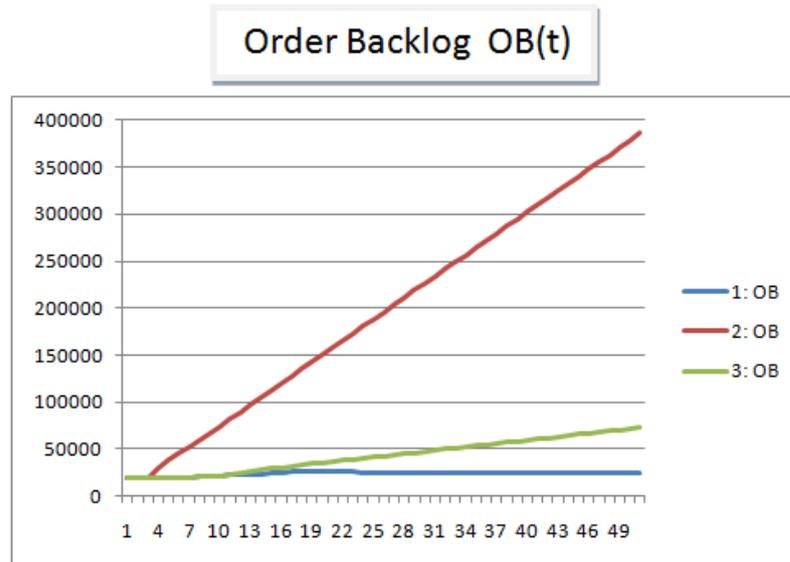


Figura 5.28 – Andamento della variabile di livello Order Backlog



Figura 5.29 – Andamento del tasso di consegna al cliente nel tempo

Comportamento simile è mostrato dalla *Politica 3*, sebbene con una diversa distribuzione temporale e con crescita della variabile molto più contenuta nel tempo (Figura 5.30). Al contrario di quanto ci si potesse aspettare, quindi, una politica di scalabilità basata semplicemente sulla ricerca della domanda non garantisce il risultato per il quale è progettata. Per quanto il valore finale sul quale si assesta l'incremento del *backlog* sia influenzato dal coefficiente di utilizzazione del sistema, il valore di picco raggiunto da $\Delta OB(t)$ (2.155 pz/sett)

mette in luce alcune difficoltà nel garantire rapidamente tassi di consegna adeguati. Al contrario, il tasso di consegna che la *Politica 1* è in grado di garantire, fa sì che:

- il volume degli ordini in attesa di essere processati rimanga, istante per istante, al di sotto di quello relativo alle politiche precedenti;
- si verifichi la stabilizzazione nel tempo della variabile $OB(t)$;
- a seguito della stabilizzazione della domanda venga recuperato tutto il volume degli ordini lasciato in arretrato.

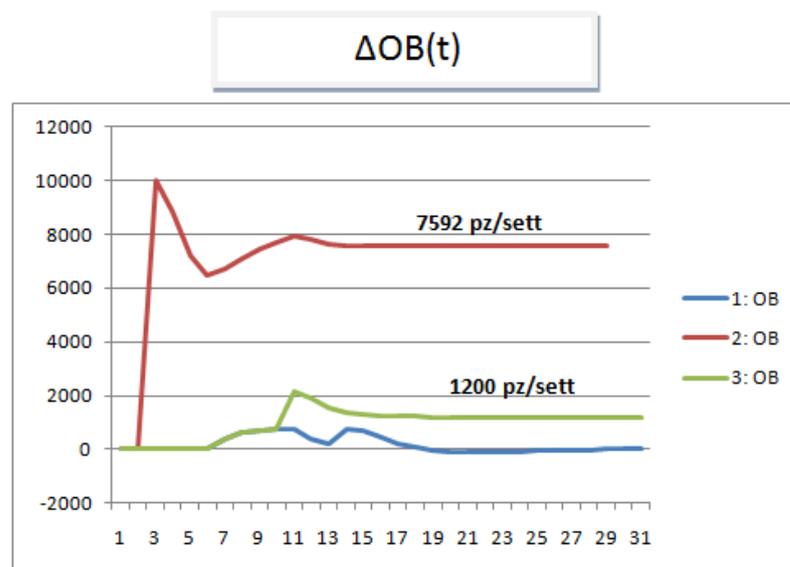


Figura 5.30 – Incremento del livello di Backlog nel tempo

Relativamente all'andamento delle giacenze di prodotto finito, ci sono innanzitutto da ricordare l'esigenze relative al trade-off esistente fra stabilità del sistema e costi derivanti dalla variazione del livello inventariale a seguito dell'aggiunta di capacità al sistema. Se da un lato, infatti, sono auspicabili livelli inventariali sufficienti a far fronte ad eventualità non espressamente previste, dall'altro si verificherà un inevitabile aggravio dei costi di mantenimento. A tal proposito, in corrispondenza della *Politica 2*, viene raggiunto in tempi estremamente rapidi (3 settimane) il minimo assoluto delle giacenze esistenti nel sistema, che finiranno, in ogni caso, per assestarsi su valori più bassi rispetto a quelli registrati adoperando le altre politiche (Figura 5.31). Tale andamento è

giustificabile se si tiene conto che l'inerzia con la quale il sistema colma la differenza fra livello inventariale desiderato e livello inventariale attualmente esistente (*IAT*), e conseguentemente la reattività con la quale viene regolata la capacità, è tale da non consentire una compensazione meno brusca di quella evidenziata.



Figura 5.31 – Andamento della variabile di livello Inventory

La stabilità del sistema viene ripristinata, a parità di altre condizioni, per livelli inventariali superiori nella *Politica 1* piuttosto che nel caso della *Politica 3* (+11%). Nel primo caso, inoltre, il meccanismo di regolazione consente di attingere al magazzino prodotti finiti in modo più parsimonioso, garantendo margini di sicurezza rispetto a variazioni non previste più consistenti, ma anche segnando maggiori irregolarità (Tabella 5-2).

Tabella 5-2 - Valori di $PR(t)$, $ShR(t)$ e intervallo temporale di inversione relativi alla Politica 1

Settimana	$PR(t)$	$ShR(t)$	Settimana	$PR(t)$	$ShR(t)$	Settimana	$PR(t)$	$ShR(t)$
1	9000	10000	18	12091	12031	35	11997	11996
2	9000	10000	19	12118	12091	36	11998	11997
3	9113	10000	20	12121	12118	37	11999	11998
4	9281	10000	21	12109	12121	38	12000	11999
5	9465	10000	22	12090	12109	39	12000	12000
6	9638	10000	23	12068	12090	40	12001	12000
7	9785	10000	24	12047	12068	41	12001	12001
8	9899	10200	25	12029	12047	42	12001	12001
9	10025	10500	26	12014	12029	43	12001	12001
10	10190	10850	27	12004	12014	44	12000	12001
11	10404	11225	28	11997	12004	45	12000	12000
12	10670	11613	29	11993	11997	46	12000	12000
13	10982	11806	30	11992	11993	47	12000	12000
14	11288	11259	31	11992	11992	48	12000	12000
15	11556	11288	32	11993	11992	49	12000	12000
16	11769	11556	33	11994	11993	50	12000	12000
17	11926	11769	34	11996	11994			

Alla luce di quanto detto finora, appare scontato l'andamento che contraddistingue la variabile *Adjustment for Inventory* relativamente alla *Politica 2* (Figura 5.32); così come immaginabili a priori potevano essere le necessità di regolazione più consistenti, e in tempi più contenuti, che avrebbero caratterizzato la *Politica 3* se confrontate con quelle registrate in corrispondenza della *Politica 1*.



Figura 5.32 – Andamento della variabile ausiliaria *Adjustment for Inventory*

Coerentemente con l'obiettivo per la quale è progettata, la *Politica 1* è caratterizzata da un andamento del *work-in-process* estremamente stabile al trascorrere del tempo, oltre che da valori della variabile particolarmente contenuti (Figura 5.33). Sebbene gli andamenti rispecchino quanto visto a proposito della variabile $OB(t)$ e confermino quindi le problematiche già evidenziate dalla politica basata sul controllo delle giacenze inventariali, c'è da registrare il comportamento più omogeneo nella fase di regolazione del *WIP* esibito dalla *Politica 3*.

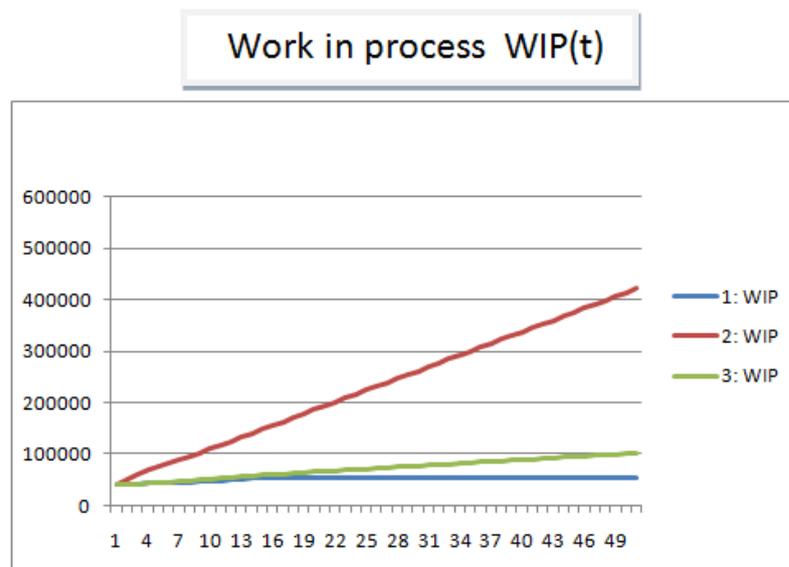


Figura 5.33 – Andamento della variabile di flusso *WIP*

La discrepanza esistente fra periodi successivi nella prima parte dell'intervallo di osservazione, dov'è $COR = 10.000$ pz/sett, è verosimilmente dovuta al valore assunto dal coefficiente di utilizzazione del sistema ($U = 98\%$).

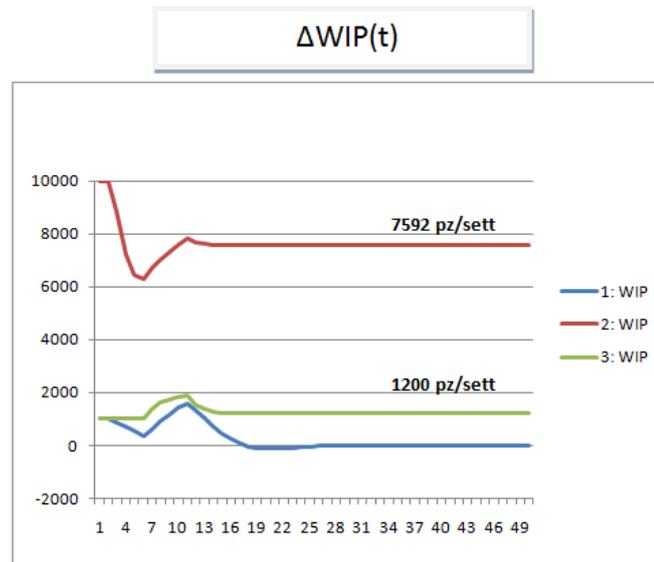


Figura 5.34 – Incremento del livello di WIP circolante nel sistema nel passaggio da un periodo al successivo

Riassumendo, nello scenario analizzato:

- la *Politica 1*, sebbene sia caratterizzata da una regolazione della capacità più complessa e ne fornisca valori più elevati, offre performance elevate in termini di stabilità dinamica, reattività e soddisfacimento delle richieste del cliente;
- la *Politica 2* ha fornito risultati poco soddisfacenti, soprattutto per quel che riguarda il controllo del livello inventariale del magazzino prodotti finiti. I risultati sorprendono soprattutto se si osserva che la politica in questione regola la capacità del RMS controllando la differenza fra livello inventariale effettivo e quello desiderato. Poco significativo è, infatti, il risultato in termini di giacenza finale registrata alla luce dell'andamento irregolare della variabile $AI(t)$, vera responsabile del processo di regolazione. In definitiva, l'instabilità che caratterizza tale politica di regolazione della capacità, si ripercuote negativamente sul profitto atteso e sulle performance del sistema;
- la *Politica 3* fornisce performance soddisfacenti per quanto riguarda i costi di scalabilità della capacità ed esibisce comportamento dinamico sufficientemente regolare. Tuttavia, la semplice regolazione in base alla

domanda non fornisce al sistema le caratteristiche di reattività attese essendo, verosimilmente, influenzata più che negli altri casi dal coefficiente di utilizzazione del sistema.

5.3.1.a Analisi di sensitività per la Politica 2

I risultati ottenuti hanno dimostrato che incentrare la gestione della capacità di un RMS su una politica basata esclusivamente sul controllo del livello inventariale, si rivela una scelta incapace di fornire risposte adeguate in uno scenario in cui si registri un incremento stabile della domanda. Al fine di verificare tale conclusione, si è proceduto all'analisi del comportamento del sistema in corrispondenza di una variazione del tempo necessario per l'adeguamento del livello inventariale (*IAT*) e/o del tempo necessario affinché il nuovo valore della capacità si renda disponibile (*SDT*), ferme restando le caratteristiche dello scenario di riferimento e le altre variabili che concorrono alla definizione del modello.

Prima di analizzare più nel dettaglio alcuni dei risultati conseguiti¹²⁷, preme sottolineare che, in generale, l'efficienza della politica risulta influenzata in modo molto più evidente da una variazione del parametro *IAT*, che non da una proporzionale variazione del parametro *SDT*. Un incremento della reattività del sistema nella regolazione del livello inventariare consente, dunque, il conseguimento di risultati che risentono molto poco di un eventuale incremento dell'intervallo temporale necessario per rendere disponibile la capacità richiesta.

Più nello specifico, nel caso della capacità, il decremento dell'indice *IAT* da 4 a 3 settimane consente di ottenere un incremento della capacità di cui è mediamente dotato il sistema del 26,15%, contro l'1,69% consentito da un proporzionale decremento di *SDT* (Figura 5.35).

¹²⁷ I diagrammi riportati nel seguito non prendono in considerazione i casi per i quali non si siano registrate variazioni significative al variare di *SDT* e *AI*. Nel caso della variabile di livello *C(t)*, ad esempio, il valore minimo assunto rimane stabile sul valore 0.

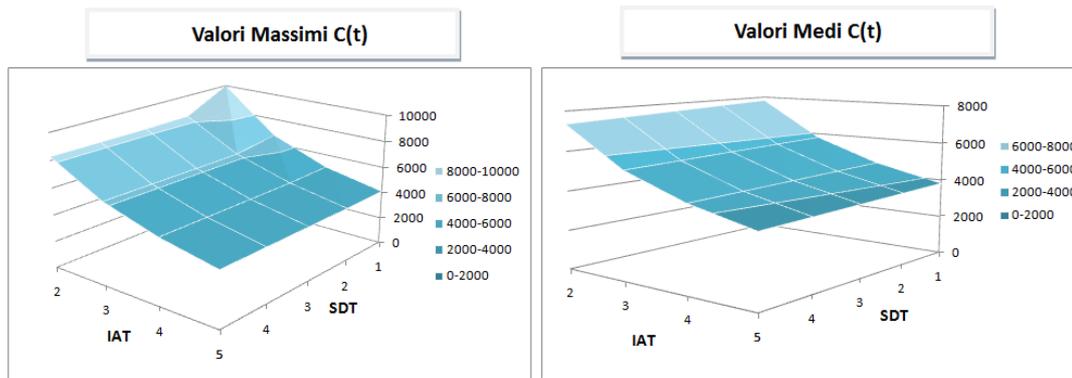


Figura 5.35 – Andamento del valore massimo e del valore medio assunti dalla variabile di livello $C(t)$ al variare di IAT e SDT

L'incremento della capacità del sistema, tuttavia, avviene a scapito della prestazione dinamica del sistema. Al decrescere del tempo di reazione, cresce l'ampiezza e il numero delle oscillazioni che caratterizzano il parametro $SR(t)$ e diviene, quindi, proporzionalmente più consistente lo sforzo compiuto per scalare la capacità del sistema (Figura 5.36, Figura 5.37-a).

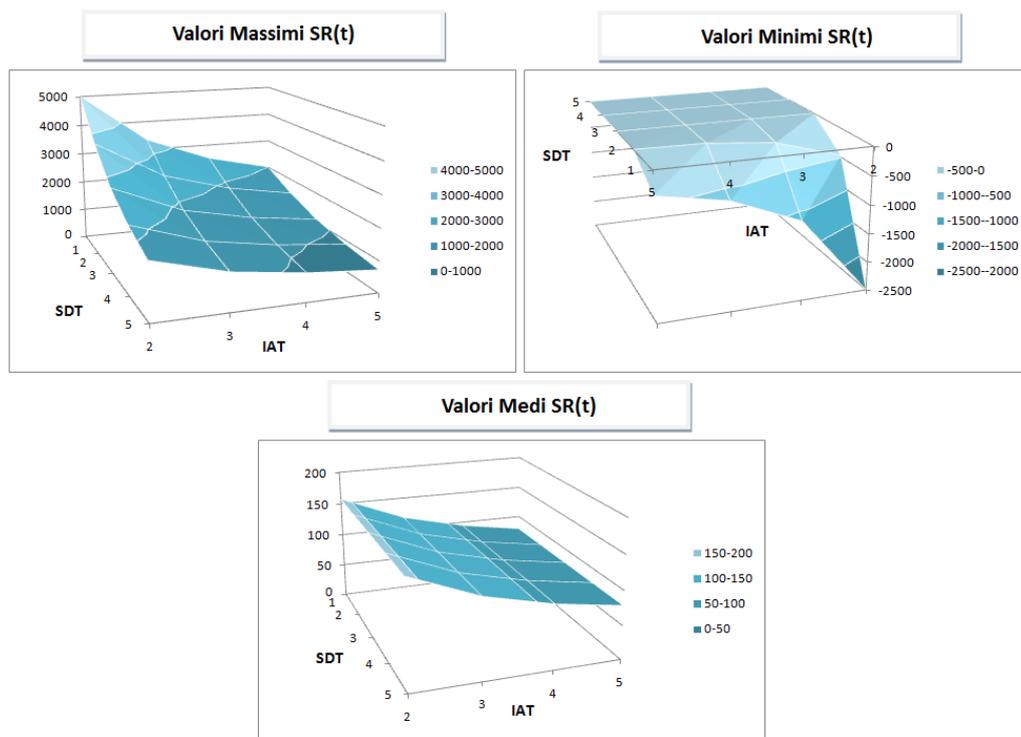


Figura 5.36 – Andamento del valore massimo, del valore minimo e del valore medio assunti dalla variabile di flusso $SR(t)$ al variare di IAT e SDT

Se dunque fosse possibile contrarre il valore assunto dal parametro potrebbe, al limite, essere desiderabile un incremento di SDT vista l'influenza minima sul valore assunto da $C(t)$ e la capacità di rendere il processo di regolazione più omogeneo nel tempo (Figura 5.37-b).

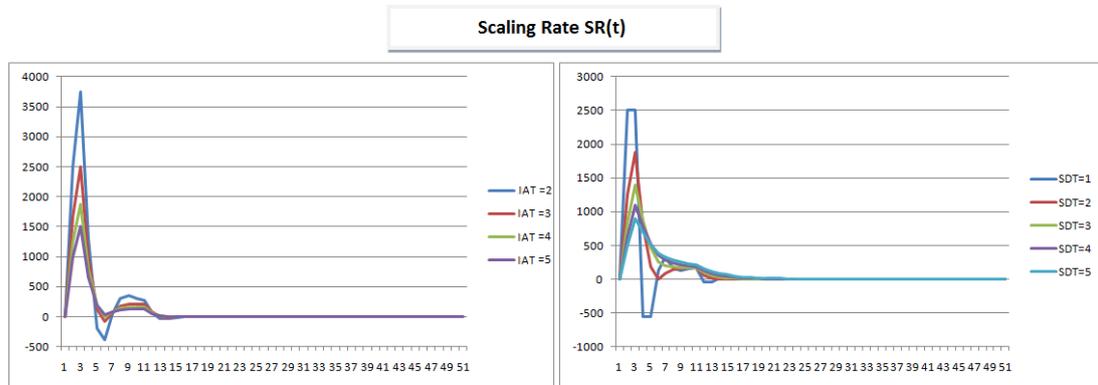


Figura 5.37 – Andamento del valore assunto dalla variabile di flusso $SR(t)$ nel caso in cui sia a) $SDT=2$, b) $IAT=3$

L'effetto di un decremento del valore di IAT è palese anche sulla capacità che il sistema mostra nel gestire gli ordini in attesa di essere processati (Figura 5.38, -13,38% nel caso di decremento di IAT da 4 a 3 settimane per $SDT = 2$, nell'orizzonte temporale di riferimento; -1,26% nel caso di decremento di SDT da 3 a 2 settimane per $IAT = 3$, nell'orizzonte temporale di riferimento) e nel servire il mercato (Figura 5.39, +23,69% nel caso di decremento di IAT da 4 a 3 settimane per $SDT = 2$, con livello di servizio che passa da $LS = 37,3\%$ a $LS = 46,2\%$; +1,57% nel caso di decremento di SDT da 3 a 2 settimane per $IAT = 3$).

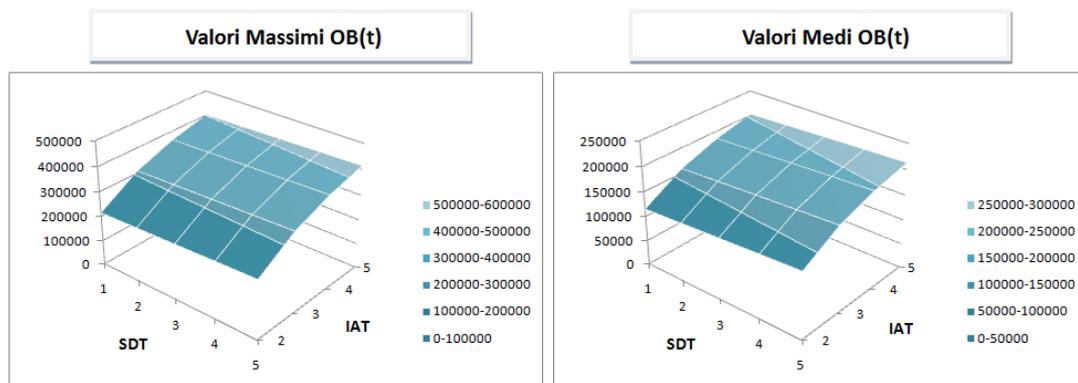


Figura 5.38 – Andamento del valore massimo e del valore medio assunti dalla variabile di livello $OB(t)$ al variare di IAT e SDT

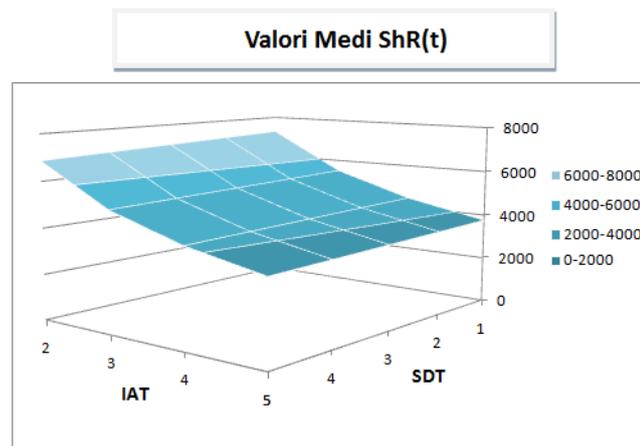


Figura 5.39 – Andamento del valore medio assunto dalla variabile di flusso $ShR(t)$ al variare di IAT e SDT

Il rovescio della medaglia è però rappresentato da un incremento del valor medio delle giacenze di prodotti finiti (+22,4% nel caso di decremento di IAT da 4 a 3 settimane per $SDT = 2$), per quanto ne resti stabile il valore massimo e si abbia una riempimento più rapido del magazzino a valle dell'annullamento delle scorte, il che diminuisce la probabilità di stock-out (Figura 5.40, Figura 5.41).

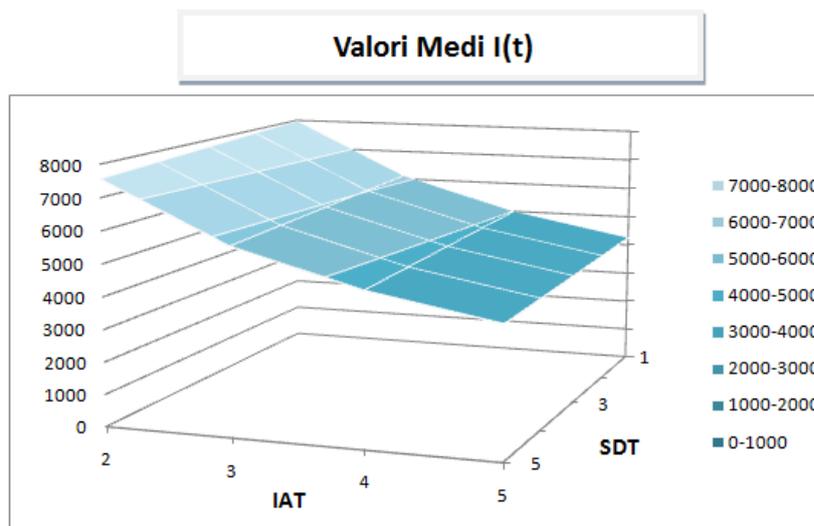


Figura 5.40 – Andamento del valore medio assunto dalla variabile di livello $I(t)$ al variare di IAT e SDT

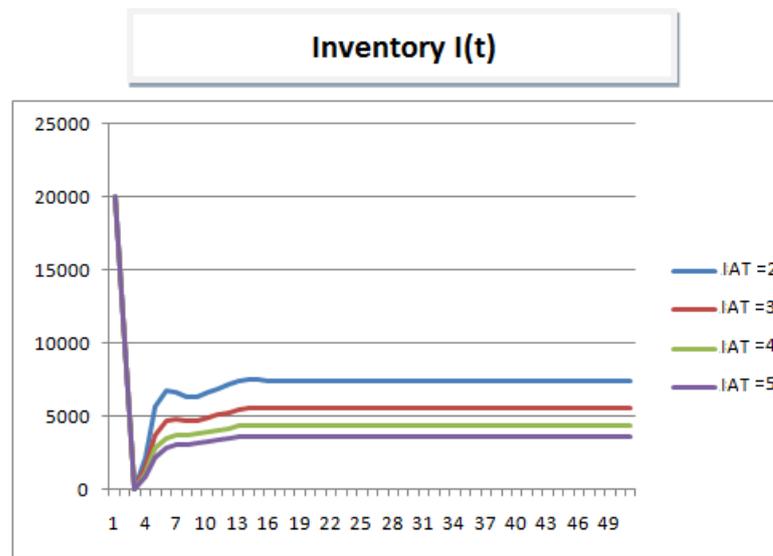


Figura 5.41 – Andamento delle giacenze inventariali in corrispondenza di $SDT=2$ e al variare del parametro IAT

Infine, il decremento di IAT , per quanto non consenta la stabilizzazione del parametro $WIP(t)$ permette, quantomeno, una sostanziosa diminuzione del suo valor medio (Figura 5.42, -11,79% nel caso di decremento di IAT da 4 a 3 settimane per $SDT = 2$).

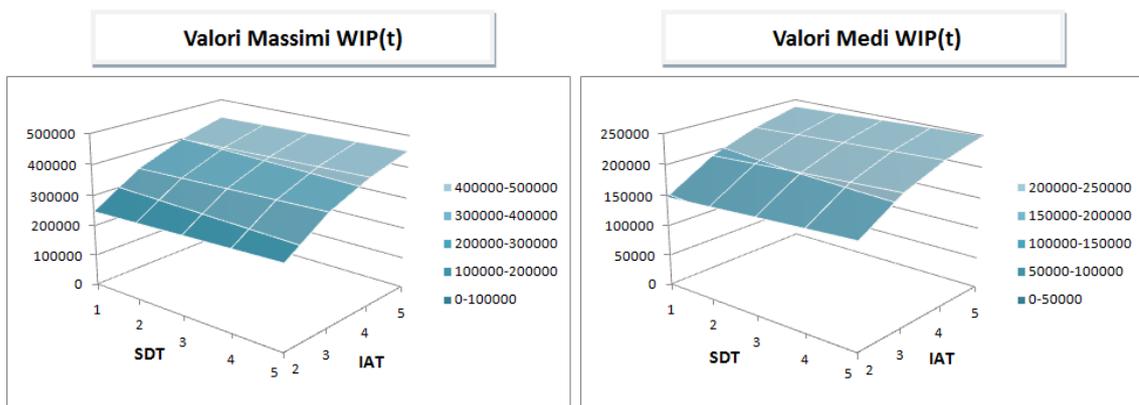


Figura 5.42 – Andamento del valore massimo e del valore medio assunti dalla variabile di livello $WIP(t)$ al variare di IAT e SDT

Alla luce dell'analisi di sensitività svolta, in definitiva, la *Politica 2*, per quanto consenta il conseguimento di risultati più soddisfacenti al diminuire del valore assunto dal parametro IAT , non permette di raggiungere valori elevati del

livello di servizio, ne tanto meno il contenimento del backlog di sistema (Figura 5.43), risultando inadeguata per gli scopi prefissati.

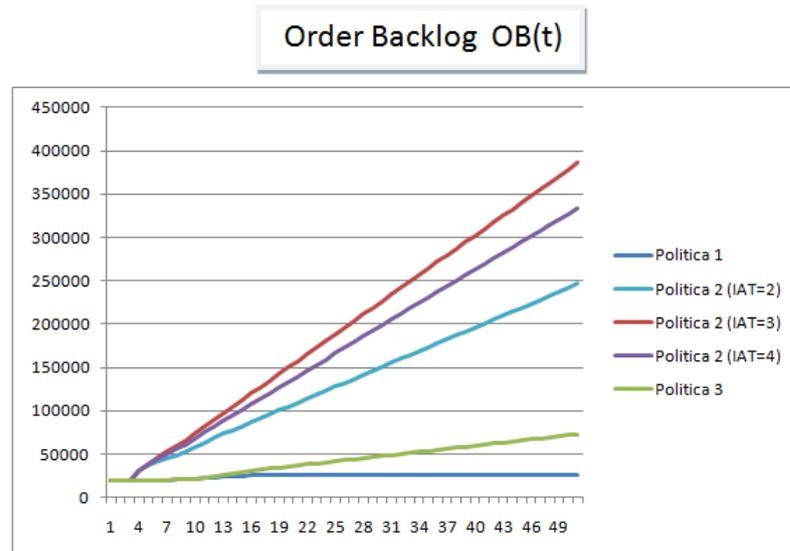


Figura 5.43 – *Andamento del valore assunto dalla variabile di livello $OB(t)$ al variare della politica di controllo adottata e per $SDT=2$*

5.3.1.b Analisi di sensitività per variazioni dei parametri U e SDT

Le performance della politica basata sul controllo del *work-in-process* circolante nel sistema e di quella basata sulla caccia del mercato dipendono, verosimilmente, dal coefficiente di utilizzazione del sistema e dal lasso di tempo intercorrente fra l'istante nel quale viene richiesto un incremento della capacità e quello in cui tal incremento si rende effettivamente disponibile. Al fine di verificare quantitativamente l'influenza di tali parametri sui risultati ottenuti è stato valutato il comportamento del sistema per $U \in [0,84; 0,98]$, con $\Delta U = 0,2$, e $SDT \in [1; 5]$, con $\Delta SDT = 1$.

Il valore massimo e il valore minimo assunto dalle giacenze inventariali, influenzano l'entità degli investimenti in spazi che saranno adoperati per l'immagazzinamento dei prodotti finiti, oltre che il loro coefficiente di utilizzazione; è in funzione del valor medio assunto dalle giacenze, invece, che è possibile valutare i costi di mantenimento a scorta nell'orizzonte temporale di riferimento. A tal proposito, una volta fissata la politica di scalabilità, mentre al

variare dei parametri di interesse non si registrano variazioni nei valori massimi della giacenza ($I = 20.000$), la Figura 5.44 e la Figura 5.45 forniscono indicazioni circa le variazioni dei valori minimi e di quelli medi.

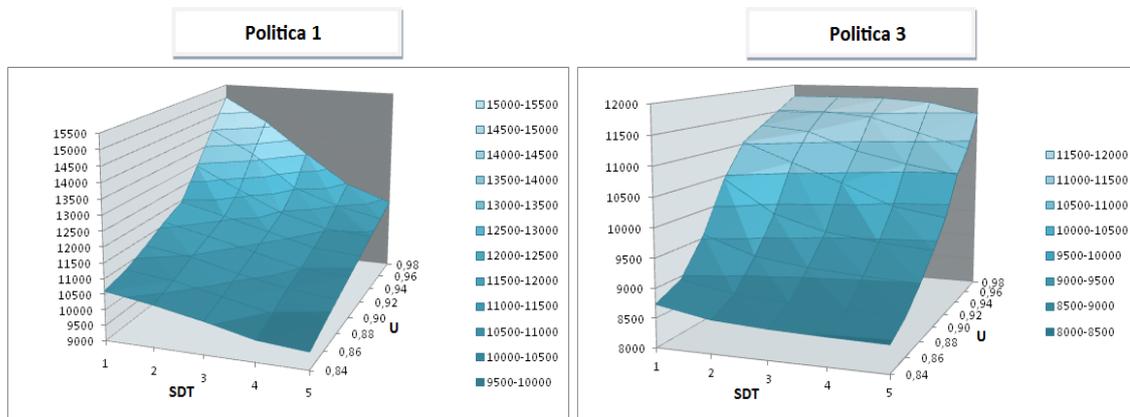


Figura 5.44 – Distribuzione dei valori minimi delle giacenze inventariali al variare della politica di scalabilità adottata

Indipendentemente dalla politica adottata, si osserva un incremento del valore minimo e del valore medio di I al decrescere di SDT e al crescere di U . Il risultato era immaginabile alla luce dell'accresciuta capacità del sistema nel fornire risposte sempre più adeguate alla variazione di domanda registrata nello scenario, grazie ad una migliore reattività o al miglior utilizzo delle risorse a disposizione. Tale incremento è, naturalmente, da interpretare positivamente solo alla luce di un corrispettivo incremento degli ordini soddisfatti che consenta, quanto meno, il riassorbimento dei costi di giacenza aggiuntivi.

È interessante notare che, nel caso della *Politica 1*, allorquando il coefficiente di utilizzazione del sistema oltrepassa il 92%, si registra, indipendentemente dal valore assunto dal parametro SDT , un incremento percentuale delle giacenze rispetto al periodo precedente molto più consistente (Tabella 5-3). Un comportamento analogo è mostrato dalla *Politica 3* in corrispondenza di un valore di U superiore al 96%, per valori di SDT minori di 4 settimane o nel caso di decremento di SDT per valori di U superiori al 94%.

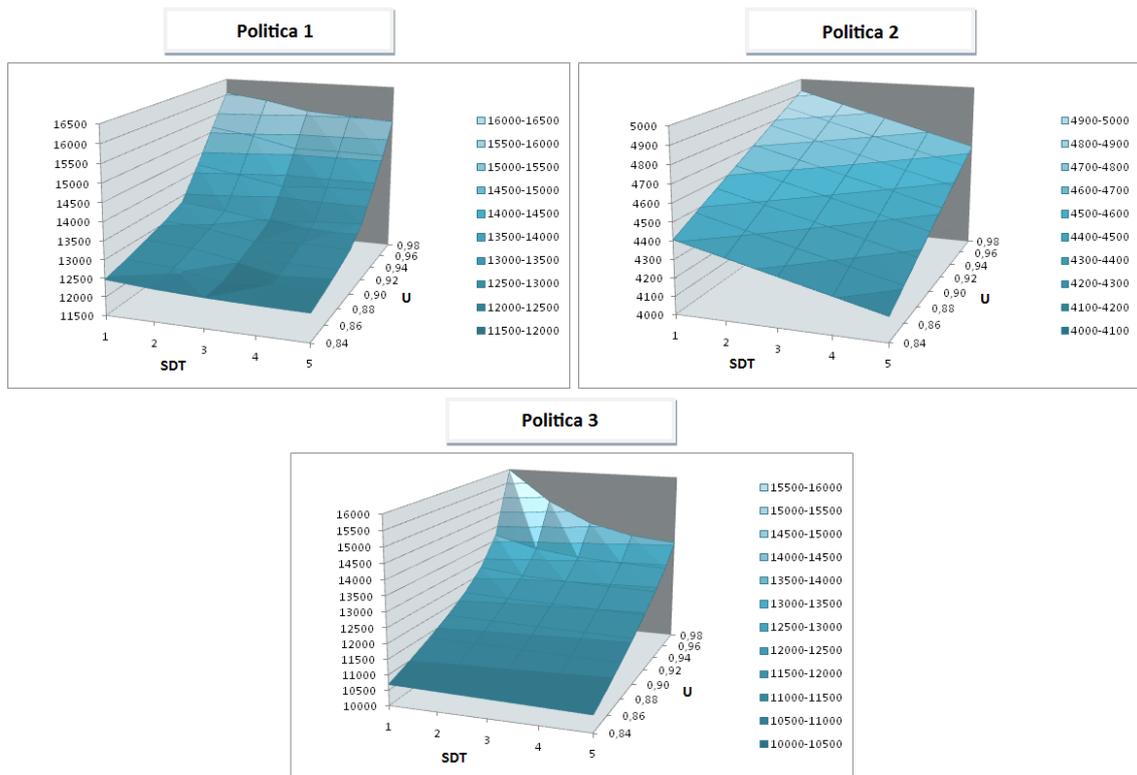


Figura 5.45 – Distribuzione dei valori medi delle giacenze inventariali al variare della politica di scalabilità adottata

Tabella 5-3 - Incremento percentuale del valor medio della giacenza al crescere del fattore U, fissato il coefficiente SDT, per la Politica 1

		U						
		0,86	0,88	0,90	0,92	0,94	0,96	0,98
SDT	1	1,40%	1,51%	1,64%	1,93%	6,68%	6,70%	6,04%
	2	1,39%	1,50%	1,61%	1,72%	6,16%	6,95%	6,26%
	3	0,08%	1,51%	1,65%	1,88%	5,96%	6,65%	6,65%
	4	1,20%	1,40%	1,56%	2,33%	5,47%	6,01%	5,99%
	5	1,14%	1,34%	1,53%	3,07%	5,16%	5,69%	5,62%

Tabella 5-4 - Incremento percentuale del valor medio della giacenza al crescere del fattore U, fissato il coefficiente SDT, per la Politica 3

		U						
		0,86	0,88	0,90	0,92	0,94	0,96	0,98
SDT	1	2,90%	3,08%	3,35%	3,78%	4,85%	7,33%	16,78%
	2	2,91%	3,07%	3,25%	3,57%	4,05%	5,57%	11,81%
	3	2,91%	3,08%	3,23%	3,49%	3,84%	4,59%	7,84%
	4	2,91%	3,08%	3,23%	3,44%	3,78%	4,25%	5,73%
	5	2,91%	3,08%	3,23%	3,43%	3,72%	4,10%	5,03%

Tabella 5-5 - Incremento percentuale del valor medio della giacenza al decrescere del fattore SDT, fissato il coefficiente U, per la Politica 3

		U							
		0,84	0,86	0,88	0,90	0,92	0,94	0,96	0,98
SDT	1	0,31%	0,31%	0,31%	0,41%	0,61%	1,38%	3,07%	7,66%
	2	0,31%	0,31%	0,31%	0,33%	0,40%	0,61%	1,55%	5,29%
	3	0,31%	0,31%	0,31%	0,31%	0,36%	0,42%	0,74%	2,75%
	4	0,31%	0,31%	0,31%	0,31%	0,32%	0,38%	0,52%	1,19%

Una valida interpretazione di tali risultati può essere fornita alla luce dell'andamento del *backlog* di sistema.

La Figura 5.46 e la Figura 5.47 forniscono, rispettivamente, indicazioni circa l'eventuale presenza di periodi in cui il sistema, per la politica di scalabilità adottata, non riesce a garantire un incremento della produzione proporzionale al corrispettivo incremento nel tasso di domanda e circa il miglioramento delle performance dal lato cliente¹²⁸.

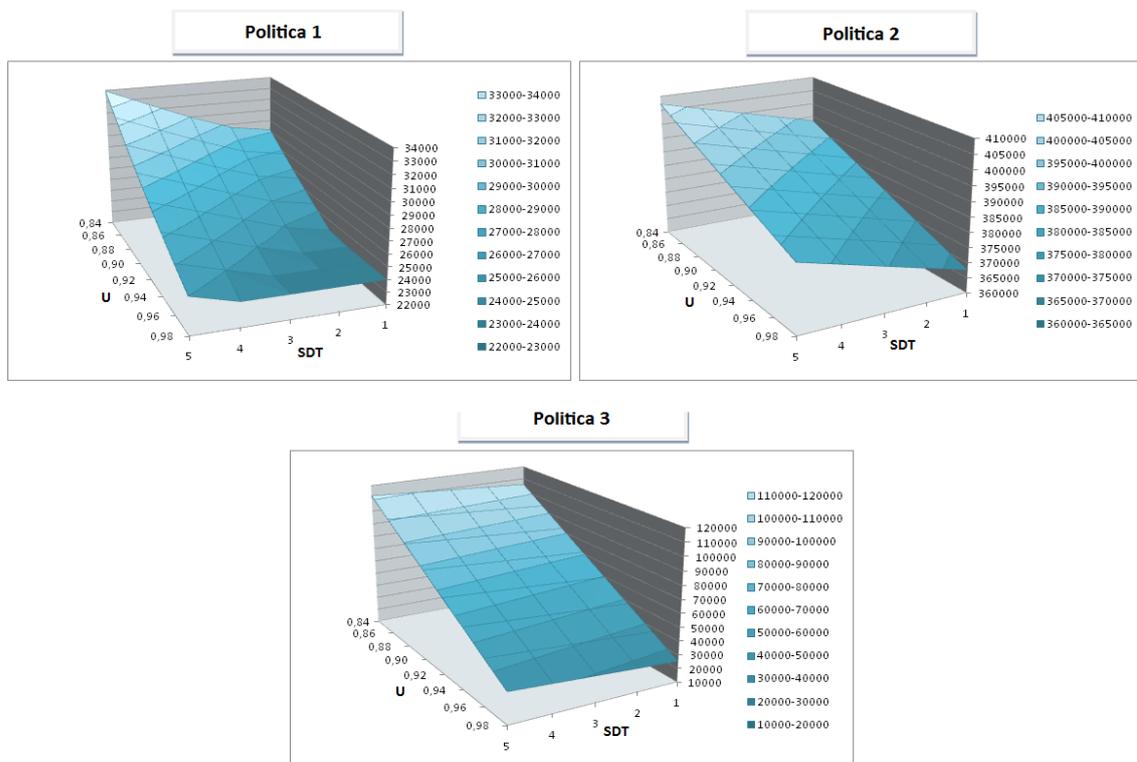


Figura 5.46 – Distribuzione dei valori massimi del backlog di sistema al variare della politica di scalabilità adottata

¹²⁸ Il valore minimo di $OB(t)$ è pari a 20.000 pezzi, indipendentemente dai valori assunti da SDT e U.

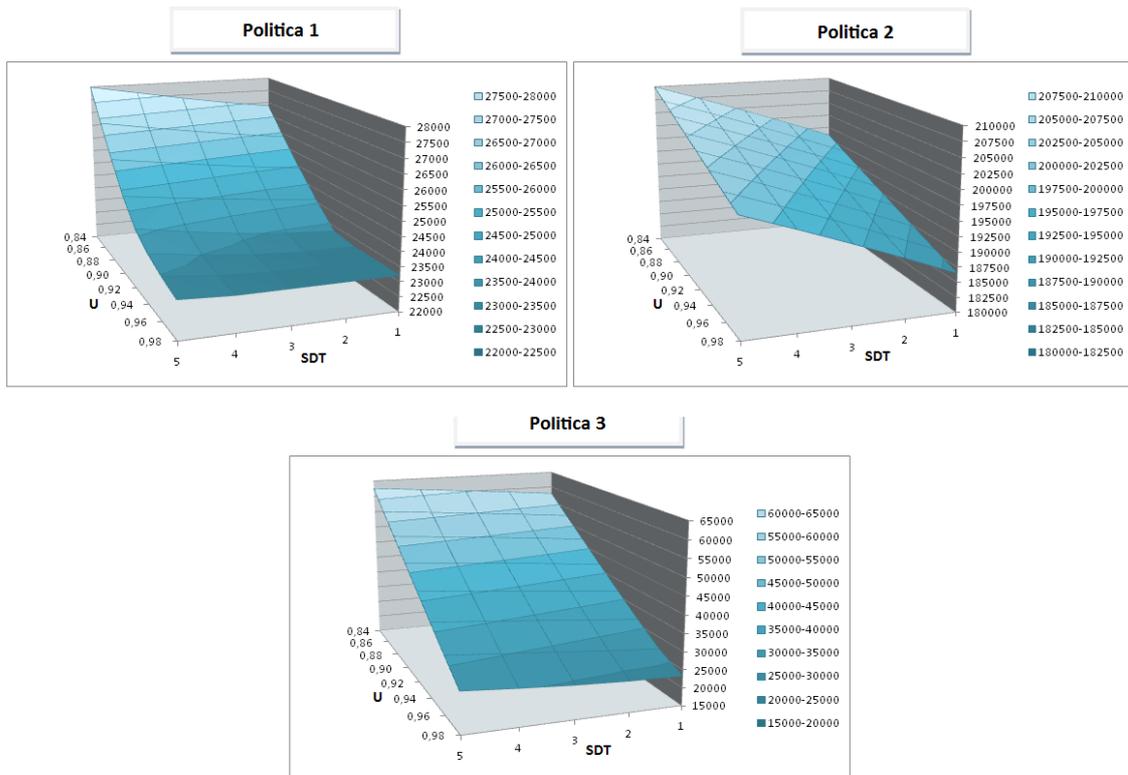


Figura 5.47 – Distribuzione dei valori medi del backlog di sistema al variare della politica di scalabilità adottata

Dalla Tabella 5-6 è evidente che per valori del coefficiente di utilizzazione superiori al 92%, nel caso si adotti la *Politica 1*, la diminuzione della dimensione media della coda al sistema è contenuta se paragonata a quella ottenuta nel caso di valori di U meno consistenti; tale risultato è tanto più evidente quanto più SDT è basso. In altre parole, l'incremento del tasso di produzione, mette a disposizione un numero più consistente di prodotti da consegnare al cliente e consente di far fronte all'inerzia mostrata dal sistema nell'adeguamento della capacità. Per valori di U superiori al 92%, tuttavia, l'eccesso di capacità di cui, in ogni caso, si dota il sistema per mantenere il *work-in-process* sui livelli desiderati (Figura 5.48), trasforma tale effetto benefico nell'incremento di giacenze di cui si è detto in precedenza, spostando, di fatto, il collo di bottiglia alla fase di consegna al cliente.

Tabella 5-6 - Decremento percentuale del valor medio del backlog di sistema al crescere del fattore U , fissato il coefficiente SDT , per la Politica 1

		U						
		0,86	0,88	0,90	0,92	0,94	0,96	0,98
SDT	1	-3,68%	-3,57%	-3,44%	-3,22%	-0,43%	0,00%	0,00%
	2	-3,75%	-3,65%	-3,54%	-3,41%	-0,85%	0,00%	0,00%
	3	-3,85%	-3,73%	-3,61%	-3,43%	-1,16%	-0,41%	0,00%
	4	-3,95%	-3,81%	-3,69%	-3,24%	-1,41%	-0,77%	-0,42%
	5	-4,01%	-3,89%	-3,76%	-2,92%	-1,64%	-1,03%	-0,73%

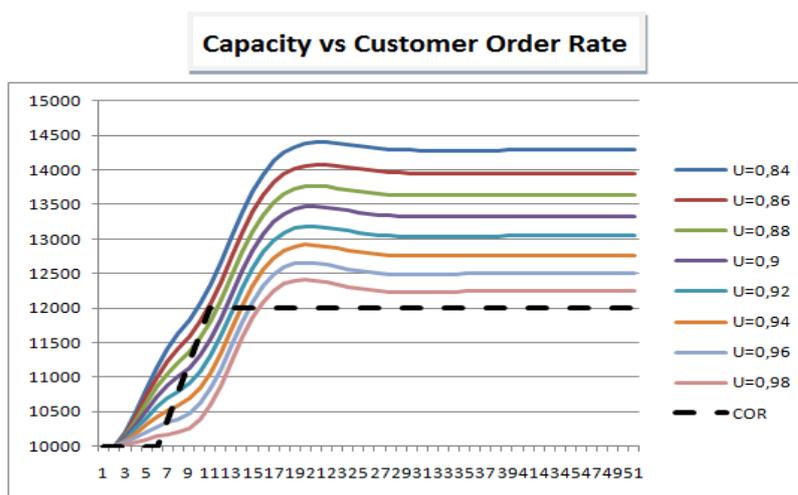


Figura 5.48 – Andamento della variabile di livello $C(t)$, al variare del coefficiente U , per la Politica 1

Nel caso della *Politica 3*, $OB(t)$ presenta decremento percentuale sempre crescente al crescere di U ¹²⁹ (Tabella 5-7) o di SDT (Tabella 5-8). In questo caso, infatti, al contrario di quanto accade per la *Politica 1*, il sistema non si dotata di capacità in eccesso rispetto alla domanda; un incremento del coefficiente di utilizzazione o una diminuzione di SDT contribuiscono, in ogni caso, al miglioramento della performance aziendale in termini di volume di prodotti mediamente consegnati¹³⁰ e di prontezza nella risposta alle variazioni di mercato.

¹²⁹ Ad eccezione di un incremento dal valore $U = 0,96$ a quello $U = 0,98$, per valori di SDT inferiori a 3 settimane. In questi casi, infatti, la reattività del sistema rende praticamente sovrapponibili gli andamenti di $C(t)$ e $COR(t)$, mitigando l'effetto di un ulteriore incremento di U .

¹³⁰ Grazie all'incremento di $PR(t)$.

Tabella 5-7 - Decremento percentuale del valor medio del backlog di sistema al crescere del fattore U , fissato il coefficiente SDT , per la Politica 3

		U						
		0,86	0,88	0,90	0,92	0,94	0,96	0,98
SDT	1	-9,29%	-10,19%	-11,26%	-12,53%	-13,93%	-15,08%	-12,66%
	2	-9,04%	-9,88%	-10,90%	-12,13%	-13,61%	-15,11%	-14,67%
	3	-8,81%	-9,61%	-10,57%	-11,73%	-13,14%	-14,80%	-15,82%
	4	-8,60%	-9,36%	-10,27%	-11,36%	-12,69%	-14,31%	-16,00%
	5	-8,41%	-9,13%	-9,99%	-11,03%	-12,28%	-13,82%	-15,60%

Tabella 5-8 - Decremento percentuale del valor medio del backlog di sistema al decrescere del fattore SDT , fissato il coefficiente U , per la Politica 3

		U							
		0,84	0,86	0,88	0,90	0,92	0,94	0,96	0,98
SDT	1	-2,18%	-2,45%	-2,78%	-3,16%	-3,61%	-3,98%	-3,95%	-1,69%
	2	-2,02%	-2,27%	-2,57%	-2,93%	-3,37%	-3,89%	-4,23%	-2,92%
	3	-1,88%	-2,10%	-2,37%	-2,70%	-3,10%	-3,61%	-4,16%	-3,96%
	4	-1,74%	-1,94%	-2,19%	-2,49%	-2,85%	-3,30%	-3,85%	-4,31%

Il fatto che decrementi più consistenti si ottengano in corrispondenza di un incremento di U , si spiega tenendo presente che una diminuzione di SDT provoca un incremento della capacità del sistema nell'intervallo di tempo in cui la domanda cresce verso il nuovo valore di riferimento (Figura 5.49). Tale incremento, pur trasformandosi in un proporzionale aumento del tasso di produzione, non consente il sostenimento della domanda con efficienza paragonabile a quella che è possibile conseguire con un incremento del tasso di utilizzazione del sistema (Figura 5.50).

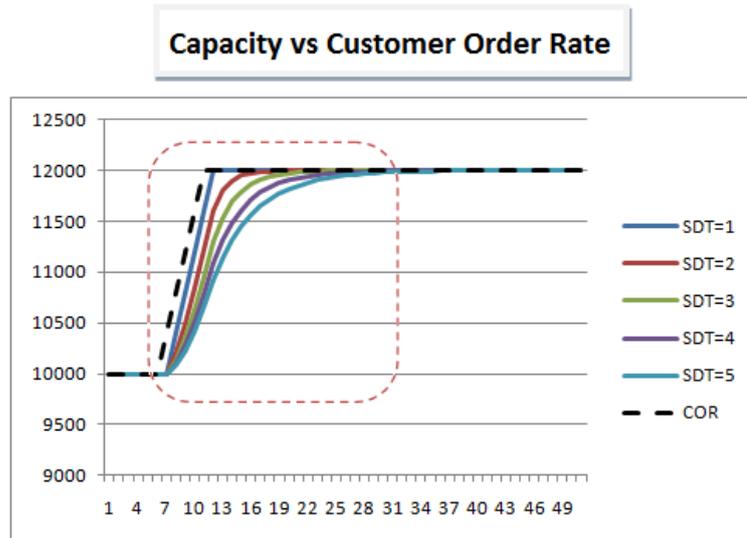


Figura 5.49 – Miglioramento della capacità del sistema per un decremento del coefficiente SDT , per $U = 0,9$ (Politica 3)

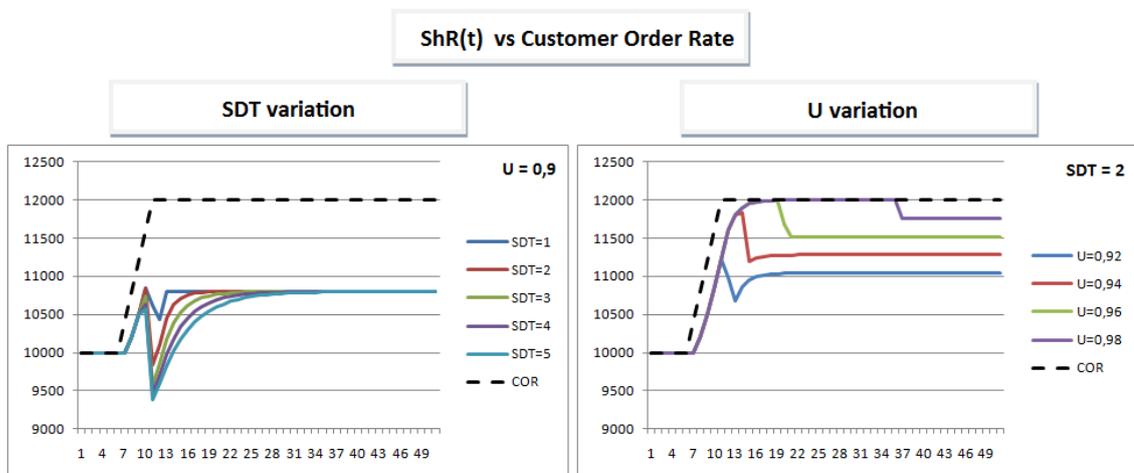


Figura 5.50 – Andamento del tasso di consegna al cliente per un decremento del coefficiente SDT e per un incremento del coefficiente U (Politica 3)

Il decremento della variazione percentuale del *backlog* di sistema, per elevati valori di U e SDT , così come i corrispettivi incrementi della variazione delle giacenze medie di prodotto finito, sono sostanzialmente dovuti alla vicendevole compensazione degli effetti di cui si è detto. In questo caso, tuttavia, al contrario di quanto accaduto nel caso della *Politica 1*, l'incremento del livello inventariale è funzionale al conseguimento di livelli di servizio più elevati e questo giustifica una successiva verifica della convenienza economica di eventuali investimenti destinati all'incremento dell'efficienza del sistema o della sua reattività.

Al valore massimo del *work-in-process* circolante nel sistema sono legate problematiche di organizzazione degli spazi di lavoro e il dimensionamento di eventuali buffer interoperazionali da realizzare; conoscendone il valor medio è possibile, invece, effettuare una stima dei costi di mantenimento da sostenere nell’orizzonte temporale di riferimento. Indipendentemente dai valori numerici registrati¹³¹, nel caso della *Politica 3*, un incremento del tasso di utilizzazione si rivela molto più efficace di una contrazione di *SDT*, tanto nel contenimento dei picchi (Figura 5.51), quanto nella diminuzione del valor medio del *WIP* (Figura 5.52); la diminuzione è, invece, simile nel caso si adotti *la Politica 1* ma solo per quel che concerne il contenimento dei valori massimi. In ogni caso, gli andamenti sono ampiamente giustificati alla luce delle considerazioni riportate in precedenza.

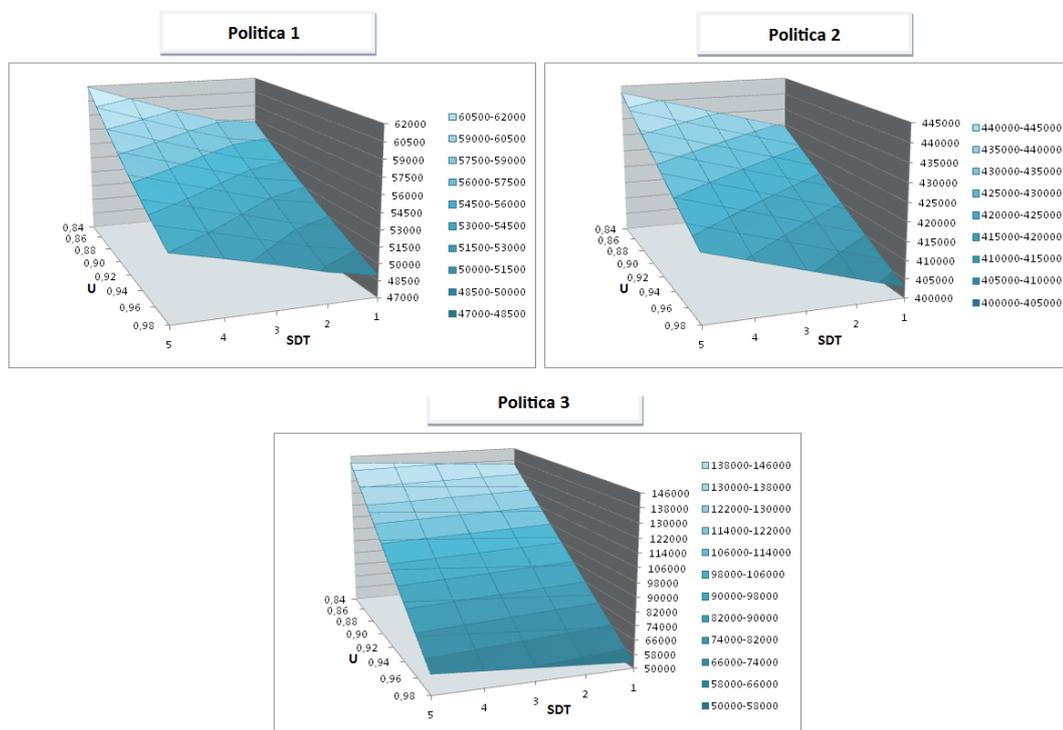


Figura 5.51 – Distribuzione dei valori massimi del *WIP* circolante nel sistema al variare della politica di scalabilità adottata

¹³¹ Il valore minimo del *WIP* è pari a 40.000 pezzi, indipendentemente dai valori assunti da *SDT* e *U*.

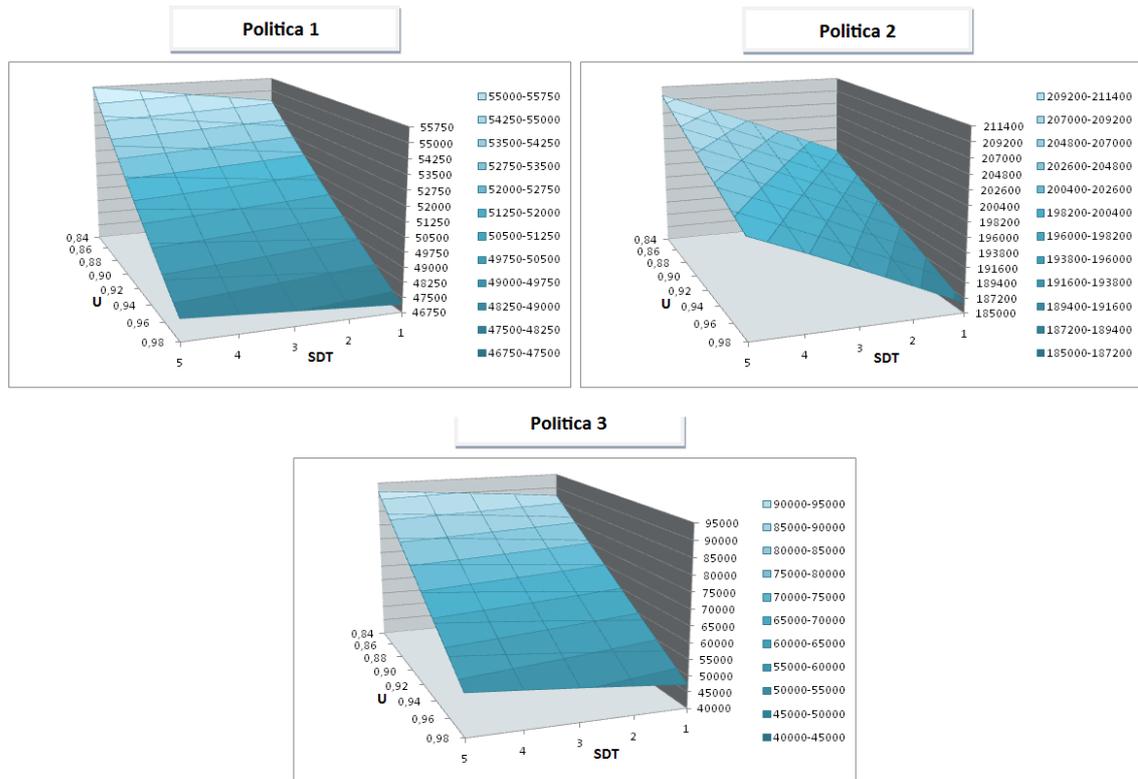


Figura 5.52 – Distribuzione dei valori medi del WIP circolante nel sistema al variare della politica di scalabilità adottata

5.3.2 Analisi dei risultati – Scenario II

In Figura 5.53 sono riportati gli andamenti, anche in questo caso praticamente speculari, della variabile di livello $C(t)$ e della variabile di flusso $PR(t)$ garantiti dalle politiche oggetto di confronto. Rispetto allo scenario precedente, non si evincono particolari considerazioni dall'andamento registrato in corrispondenza dell'adozione della *Politica 2*, se non quella che l'oscillazione della capacità è più che dimezzata rispetto a quella mostrata dal mercato (-58%). Com'era lecito attendersi, ancora una volta, la *Politica 3* è quella che fornisce un valore della capacità da installare che più da vicino ricalca l'andamento del mercato¹³². Comportamento dinamico simile è esibito dalla *Politica 1*, sebbene:

- la variazione della capacità sia anticipata nel tempo;
- il conseguimento del valore massimo sia traslato nel tempo;

¹³² In questo caso è forse più palese l'effetto della variabile *SDT* che determina, rispetto all'andamento del mercato, una traslazione del diagramma della capacità di 2 settimane.

- l'ampiezza dell'oscillazione sia superiore di circa il 17% rispetto al caso di regolazione in base alla domanda del mercato, prefigurando costi di adattamento più consistenti.

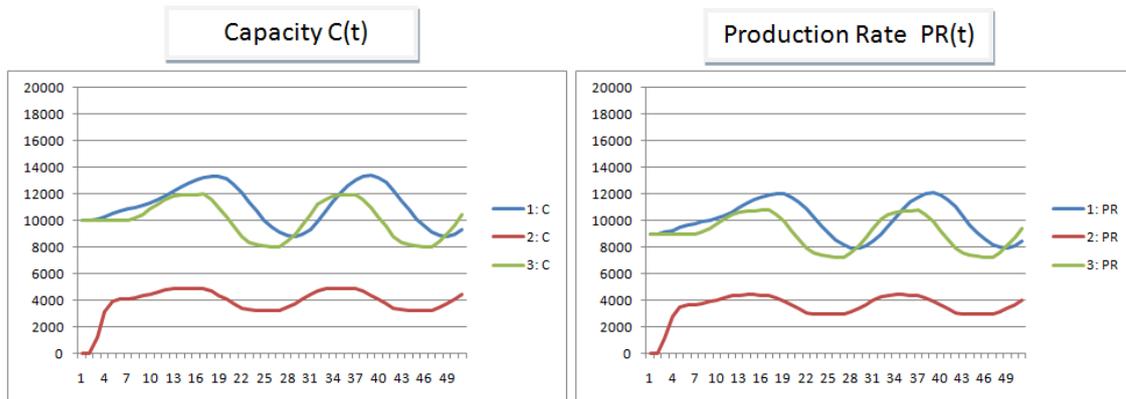


Figura 5.53 – Andamento della variabile di livello Capacità e della variabile di flusso Tasso di Produzione

Lo sforzo da associare al processo di riconfigurazione è però, come già detto, complessivamente valutabile solo tenendo conto dell'andamento mostrato dalla variabile $SR(t)$. Il comportamento del sistema, qualora regolato dalla *Politica 2* o dalla *Politica 3*, è equivalente a quello mostrato in caso di domanda a gradino fino alla settimana 17, mentre nel caso di regolazione tramite *Politica 3* l'equivalenza si estende fino alla settimana 19 (Figura 5.54). Superato l'arco temporale di cui si è detto, il sistema reagisce alla contrazione della domanda di mercato facendo registrare valori negativi della variabile $SR(t)$. La regolazione avviene in modo simile nel caso della *Politica 2* e della *Politica 3*, sebbene sia evidente la differenza nell'ampiezza di oscillazione, circostanza d'altronde immaginabile a causa della più contenuta variazione della capacità. La *Politica 1* fornisce una regolazione senza dubbio più omogenea che nei casi precedenti ma, soprattutto, l'ampiezza dell'oscillazione è praticamente identica a quella mostrata dalla *Politica 3* (-3,1%). Questo lascia immaginare che, a parità di sforzo sostenuto, una politica basata sul controllo del *WIP* consenta maggiori margini nella regolazione della capacità.

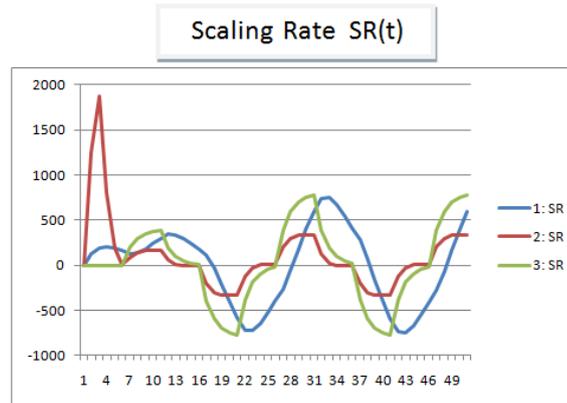


Figura 5.54 – Andamento della variabile di flusso Scaling Rate

La *Politica 2*, inoltre, continua a mostrare scarsa reattività nel soddisfacimento delle richieste di mercato (Figura 5.55, Figura 5.56). L'oscillazione più contenuta registrata nel tasso di consegna, più che sinonimo di comportamento dinamico regolare, è l'effetto della rigidità dei vincoli sulle giacenze imposti dalla politica al sistema. La *Politica 1* continua a garantire tassi di consegna più elevati sebbene, in questo caso, siano presenti irregolarità più evidenti rispetto alla *Politica 3*, in cui, tuttavia, il volume di ordini in coda al sistema è più elevato a causa dell'influenza esercitata dal coefficiente U .

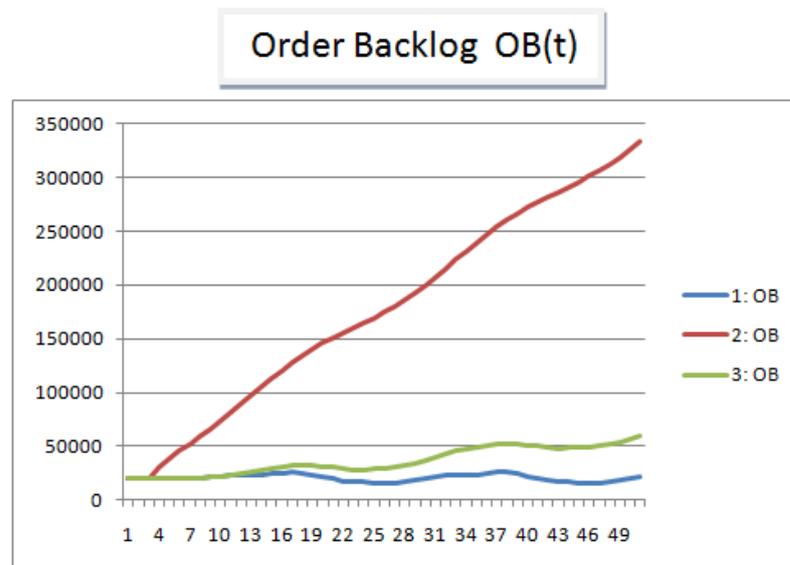


Figura 5.55 – Andamento della variabile di livello Order Backlog

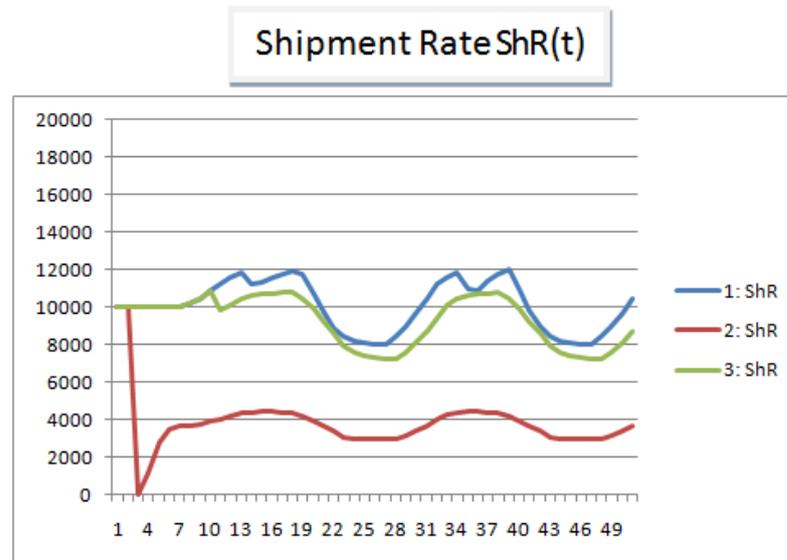


Figura 5.56 – Andamento del tasso di consegna al cliente nel tempo

Considerazioni più interessanti riguardano, tuttavia, il confronto fra i comportamenti mostrati dalle politiche nei due scenari proposti. Analizzando la variazione di ordini in coda al sistema nel passaggio fra i due scenari, si mostra ancor più evidente la differente reattività nel soddisfare il mercato mostrata dalla *Politica 1* e dalla *Politica 3* (Figura 5.57). Nel caso della *Politica 2*, nel periodo di contrazione della domanda, si osserva un incremento consistente del valore di $\Delta OB(t)$; tale valore rimane pressoché invariato allorquando la domanda di mercato si riallinea ai valori massimi¹³³, per poi ricominciare a crescere in corrispondenza della seconda depressione. Nel caso delle altre due politiche, invece, si assiste ad un andamento marcatamente ondulatorio di tale differenza, con:

- valori negativi di $\Delta OB(t)$ in alcuni periodi dell'orizzonte temporale di riferimento, qualora si adottasse la *Politica 1*;
- valore di $\Delta OB(t)$ crescente nel caso si adottasse la *Politica 3*.

¹³³ La contrazione massima rispetto all'ultimo valore di $OB(t)$ registrato prima che se ne verifichi la diminuzione è ~ 4%.

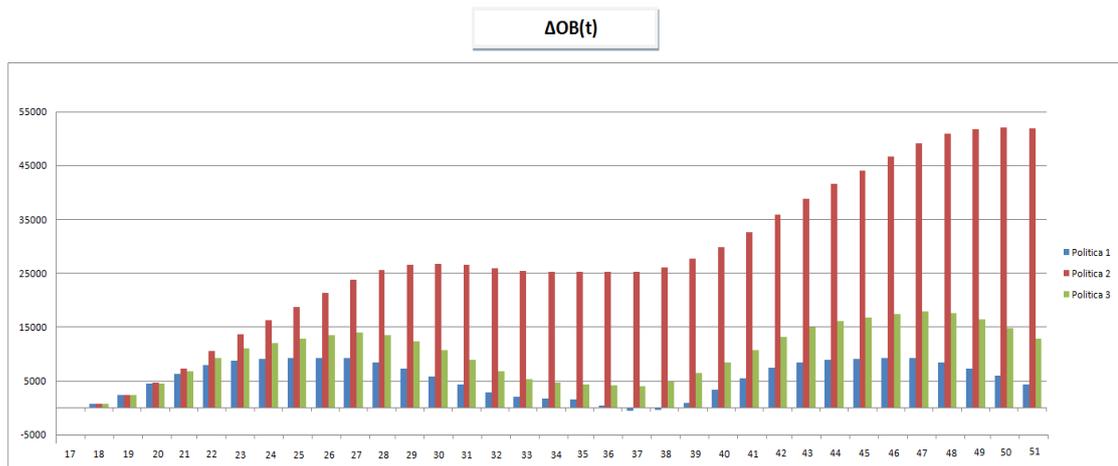


Figura 5.57 – Variazione degli ordini in coda al sistema nel passaggio dallo Scenario I allo Scenario II

Alla luce di quanto riportato nella Figura 5.58 e nella Figura 5.59, la *Politica 2*, per quanto consenta il conseguimento dei minimi livelli inventariali, è caratterizzata, ancora una volta, da un comportamento dinamico assolutamente insoddisfacente vista la strategia di controllo su cui è basata. La presenza di un punto in cui le giacenze raggiungono valore nullo, inoltre, spinge il sistema verso condizioni potenzialmente critiche in presenza di perturbazioni della domanda non previste a priori e determina, in ogni caso, l'esigenza di ulteriori approfondimenti. Per quel che concerne le altre due politiche:

- in corrispondenza della *Politica 1*, il livello inventariale oscilla intorno ad un valor medio di circa 16.400 pz/sett, con un ampiezza pari a $\pm 33,6\%$;
- in corrispondenza della *Politica 3*, il livello inventariale oscilla intorno ad un valor medio di circa 9.000 pz/sett, con un ampiezza pari a $\pm 19,8\%$.

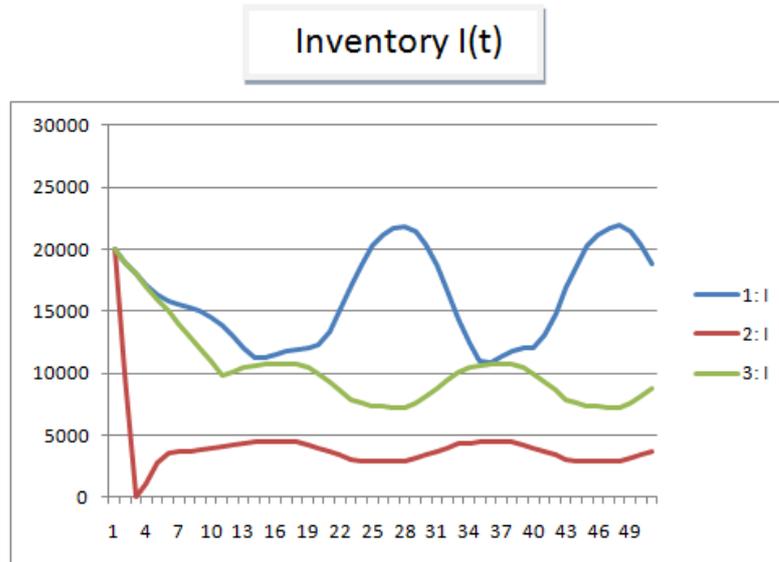


Figura 5.58 – Andamento della variabile di livello Inventory

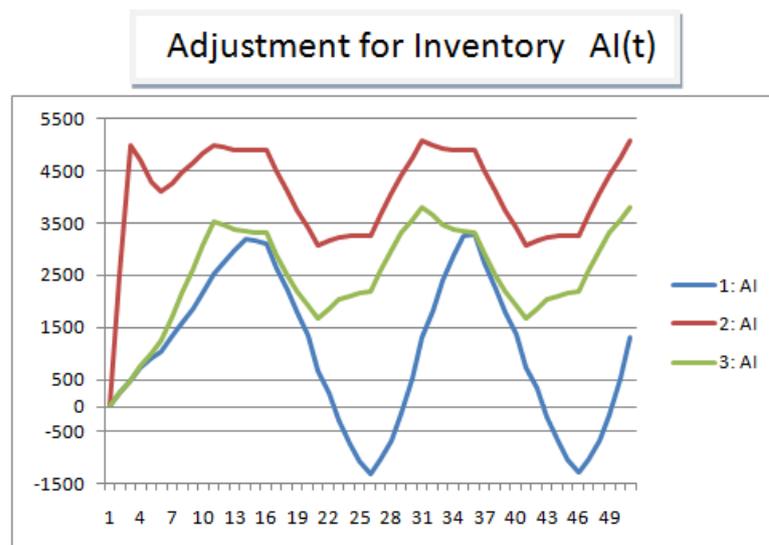


Figura 5.59 – Andamento della variabile ausiliaria Adjustment for Inventory

Nel caso di andamento ciclico del mercato, dunque, la performance offerta dalla *Politica 1* è profondamente differente da quella offerta dalla *Politica 3*. Le ragioni di tale discrepanza, risiedono nelle differenti modalità con le quali le due politiche guidano il sistema al prelievo dal magazzino prodotti finiti (Figura 5.60). Il meccanismo di regolazione della capacità in base al valore assunto dal *WIP* circolante, forza, nella fase di depressione del mercato, valori della capacità del sistema, e quindi del tasso di produzione, più consistenti del

tasso di consegna che è necessario garantire al cliente. La giacenza in eccesso viene, tuttavia, riassorbita nella fase di ripresa del mercato dove il tasso di produzione garantito non è in grado di sostenere la richiesta di mercato. Il livello inventariale, dunque, oscilla al di sopra del valore finale conseguito nel caso dello *Scenario I*. Situazione diametralmente opposta si verifica in caso di regolazione della capacità in base alla domanda. In questo caso, il sistema sfrutta le giacenze esistenti per compensare il valore più basso del tasso di produzione nelle fasi di contrazione del mercato, salvo ripristinare il livello inventariale iniziale nelle fasi di ripresa del mercato con un valore del tasso di produzione superiore al tasso di consegna richiesto. Il livello inventariale, dunque, oscilla al di sotto del valore finale fatto registrare nel caso dello *Scenario I*, con evidenti vantaggi economici rispetto a quanto accade considerando la *Politica 1*.

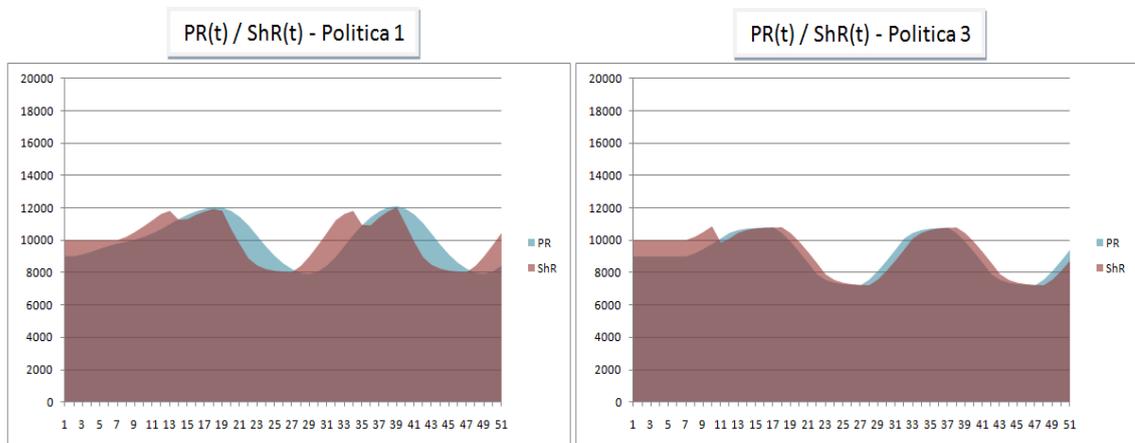


Figura 5.60 – Discrepanza temporale fra tasso di produzione del RMS e tasso al quale i prodotti vengono richiesti dal mercato, nel caso di regolazione in base al *WIP* o alla domanda

Dall'andamento del *WIP* circolante nel sistema non possono essere tratte indicazioni particolari rispetto a quanto già detto relativamente allo *Scenario I* (Figura 5.60).

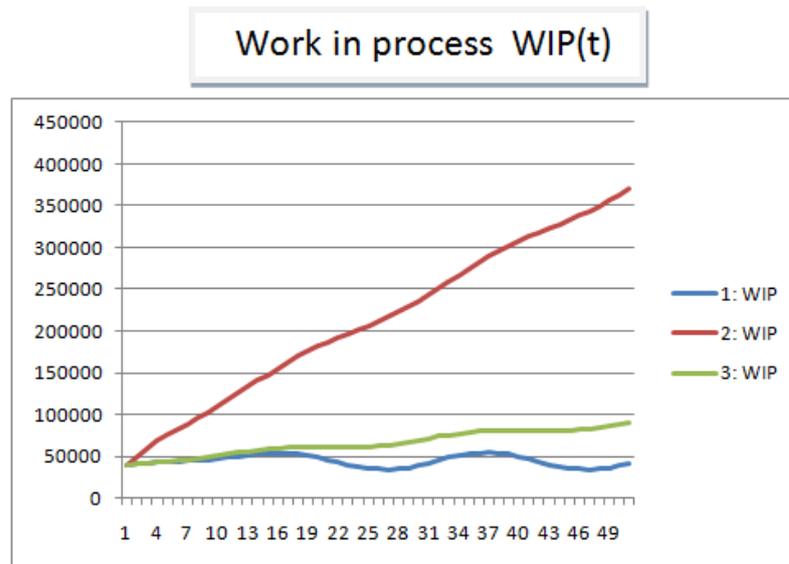


Figura 5.61 – Andamento della variabile di livello WIP

Piuttosto, è interessante esaminare le modalità con le quali il WIP varia rispetto a quanto accaduto nel periodo precedente, almeno per quel che concerne la *Politica 1* che dovrebbe offrire le migliori performance da questo punto di vista (Figura 5.62). A seguito della fluttuazione della domanda, nello specifico, si registra una contrazione massima del WIP del 7,44% (Periodo 20 → Periodo 21) e un incremento massimo del 8,46% (Periodo 30 → Periodo 21). Se il volume totale del WIP fornisce indicazioni circa l'entità del capitale immobilizzato in termini di risorse circolanti nel sistema, l'entità delle variazioni in questione dovrebbe far riflettere circa i costi sostenuti per garantire lo spazio necessario al materiale circolante nel sistema e quelli che si sosterebbero nel momento in cui questi non venissero più adeguatamente sfruttati.

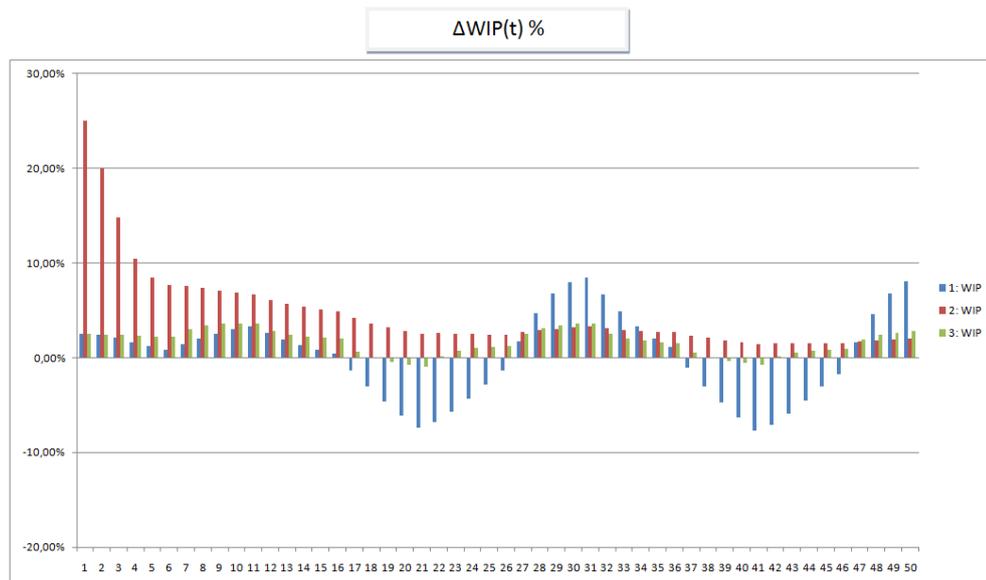


Figura 5.62 – Incremento percentuale del livello di WIP circolante nel sistema nel passaggio da un periodo al successivo

Riassumendo, nello scenario analizzato:

- la *Politica 1*, pur continuando a garantire le migliori performance in termini di soddisfacimento delle richieste del mercato e buona reattività, presenta, a differenza del caso precedente, comportamento dinamico particolarmente irregolare, soprattutto per quel che concerne la fase di consegna al cliente. Le modalità con le quali avviene il prelievo dei prodotti finiti dal magazzino, inoltre, comportano un consistente incremento dei costi di giacenza. Infine, le considerazioni circa le oscillazioni del *WIP* rendono particolarmente critiche le problematiche concernenti l'utilizzazione degli spazi di lavoro a disposizione;
- la *Politica 2* continua a mostrare comportamento poco soddisfacente tanto in termini di reattività mostrata dal sistema, tanto in termini di performance offerte. L'oscillazione più contenuta registrata nel tasso di consegna, più che sinonimo di comportamento dinamico regolare, è l'effetto della rigidità dei vincoli sulle giacenze imposti dalla politica al sistema;

- la *Politica 3* consente un consistente abbattimento dei costi associati al processo di scalabilità della capacità e di mantenimento dei prodotti finiti in magazzino. Rimane, in ogni caso, l'inadeguatezza delle risposte fornite in termini di soddisfacimento della domanda di mercato.

5.3.2.a Alcune considerazioni aggiuntive in merito all'andamento della variabile $OB(t)$

L'analisi fin qui condotta, soprattutto relativamente al soddisfacimento delle richieste del cliente, può essere resa ancor più efficace introducendo un ulteriore variabile di livello che consenta di prendere in considerazione gli ordini che il sistema non è stato in grado di soddisfare fino ad un determinato istante (*backorders*).

Tenendo presente che la tecnica di modellazione adoperata, come già detto in precedenza, non consente di entrare nel dettaglio di problematiche operative quali la definizione di politiche per il controllo delle entità in coda al sistema, il flusso *Backorders Flow* è stato progettato in modo da risultare non nullo qualora il livello del *backlog* del sistema superi una soglia prefissata (*OBL*). È verosimile ipotizzare, infatti, che al crescere della dimensione della coda al sistema diventi proporzionalmente meno probabile riuscire a far fronte alle commesse giunte per ultime cui si dovrà necessariamente rinunciare.

Per quanto alcune considerazioni possano risultare scontate perché ricavabili dall'andamento di $OB(t)$, l'introduzione della variabile di livello $BKO(t)$ consente delle osservazioni interessanti circa il confronto fra la *Politica 1* e la *Politica 3*.

Si faccia riferimento all'andamento di mercato proposto in Figura 5.63, in cui la domanda oscilla fra 18.000 pz/sett e 8.000 pz/sett, e dove è riportato anche l'andamento della capacità del sistema, a seconda che si adotti una politica di caccia o di controllo del *WIP*. Si ipotizzi, inoltre, un valore limite per la coda al sistema pari a 30.000 unità.

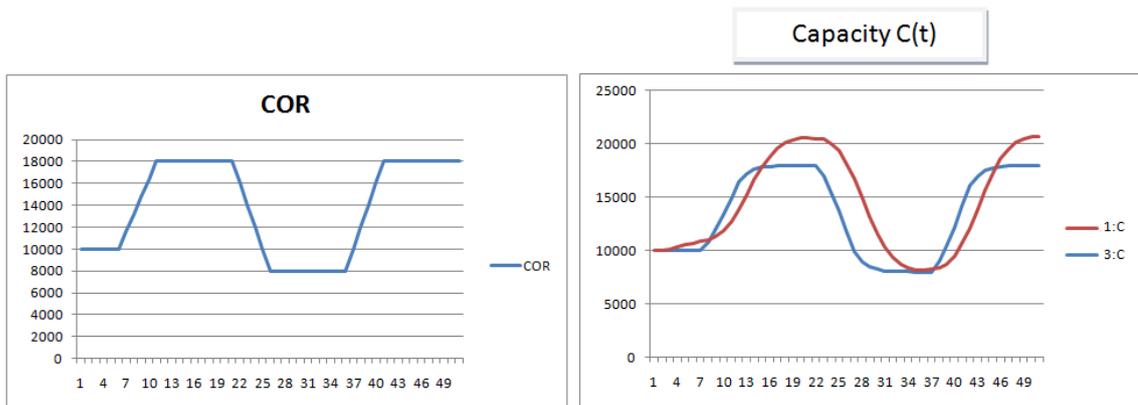


Figura 5.63 – Andamento del Customer Order Rate e della variabile di livello C(t)

Al contrario di quanto accaduto negli scenari precedentemente considerati, nel caso preso in esame, la maggiore reattività della *Politica 3* le assicura, di fatto, una performance paragonabile a quella raggiunta dalla *Politica 1* nel servire il mercato¹³⁴ (Figura 5.64) e, soprattutto, il conseguimento di giacenze di prodotto finito molto più contenute (Figura 5.65).

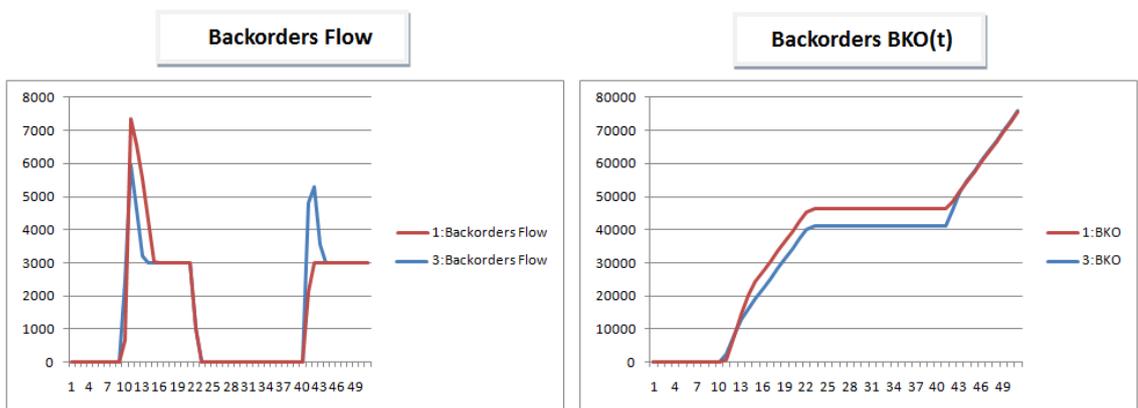


Figura 5.64 – Andamento della variabile di flusso Backorders Flow e della variabile di livello BKO(t)

Nel caso di limitazione della dimensione della coda, infatti, la *Politica 1* non consente di sfruttare la capacità in eccesso per il recupero di ordini arretrati poiché questa si rende disponibile solo successivamente alla saturazione della coda provocando, nel contempo, un consistente incremento delle giacenze di prodotto finito (Figura 5.66).

¹³⁴ Il livello di servizio si attesta sull'87,4% nel caso della *Politica 3* e sull'87,3% nel caso della *Politica 1*.

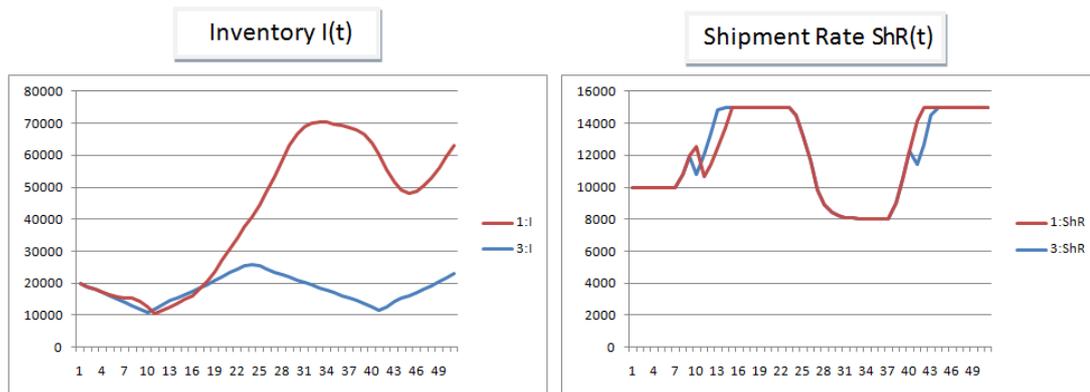


Figura 5.65 – Andamento della variabile di livello $I(t)$ e della variabile di flusso $ShR(t)$

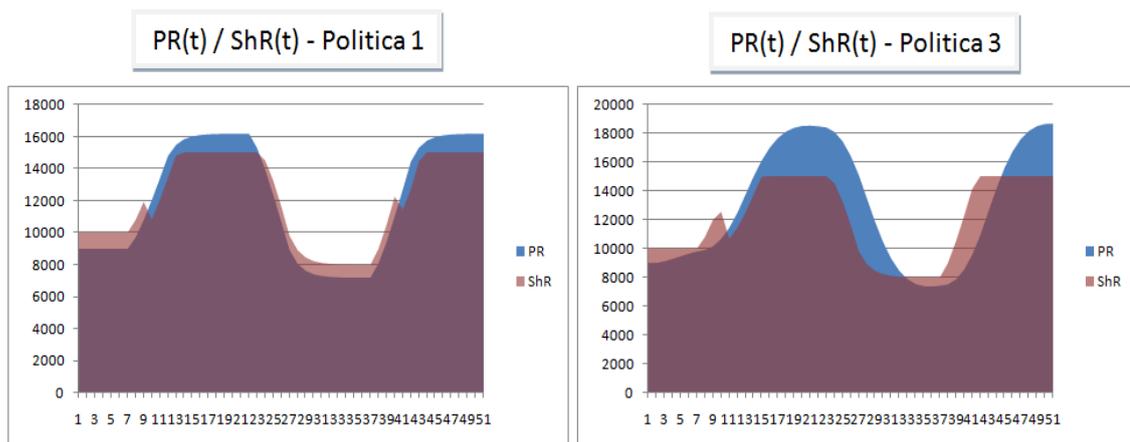


Figura 5.66 – Discrepanza temporale fra tasso di produzione del RMS e tasso al quale i prodotti vengono richiesti dal mercato, nel caso di regolazione in base al WIP o alla domanda

Per quanto al variare del parametro SDT le due politiche mostrino comportamento pressoché analogo, differenze più consistenti nel servizio al mercato sono imputabili ad una variazione del coefficiente di utilizzazione del sistema (Figura 5.67). In particolare i flussi di *backorders* sono meno consistenti nel caso della *Politica 3* a patto che il coefficiente di utilizzazione si mantenga al di sopra del 90%, con differenze nei valori assunti trascurabili¹³⁵ per $1 < U < 0,94$.

¹³⁵ Più nello specifico, nel passaggio da $U=0,87$ a $U=0,9$ si determina una diminuzione del valor medio del flusso in questione pari al 21,1%, del 9,5% nel passaggio da $U=0,9$ a $U=0,94$, del 2,7% nel passaggio da $U=0,94$ a $U=0,98$.

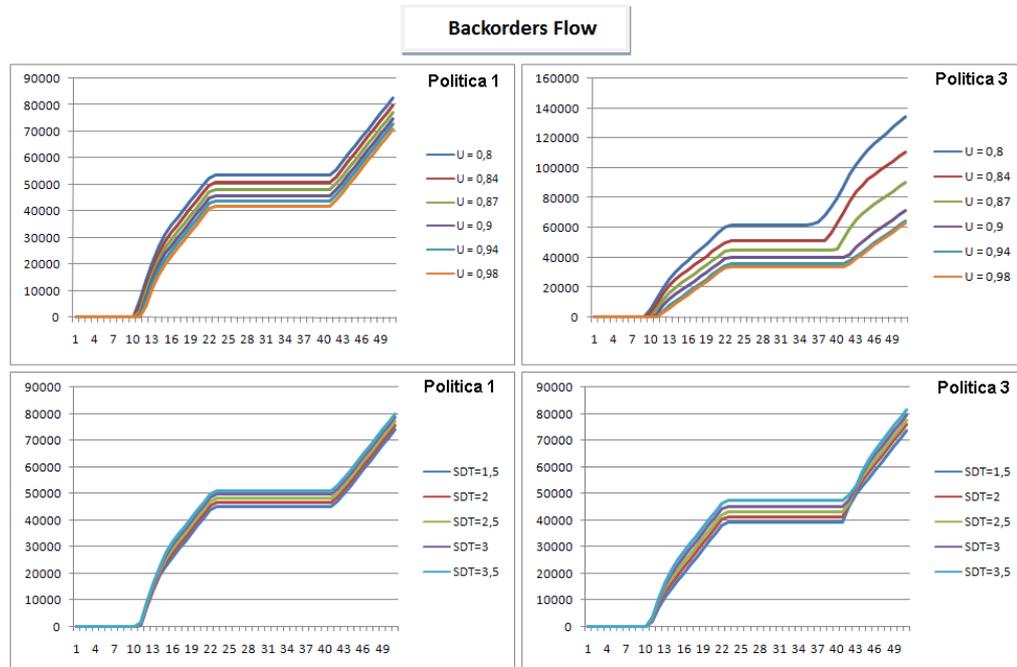


Figura 5.67 – Andamento della variabile di flusso Backorders Flow al variare dei parametri U e SDT

Infine, per quel che concerne le giacenze inventariali (Figura 5.68), un incremento del fattore di utilizzazione U determina, nell'orizzonte temporale di riferimento:

- effetti trascurabili nel caso della *Politica 1*, se si esclude un incremento della giacenza nella prima parte dell'orizzonte temporale di riferimento;
- nel caso della *Politica 3*, un incremento consistente del valore medio e del valore massimo delle giacenze per altro non confrontabile, per valori di U particolarmente elevati, con la connessa diminuzione del numero dei *backorders*¹³⁶.

D'altro canto, un incremento del valore assunto dal coefficiente SDT , determina:

- nel caso della *Politica 1*, un progressivo incremento del valore massimo e del valor medio della giacenza inventariale, senza tuttavia influire sul suo andamento nel tempo;

¹³⁶ Più nello specifico, nel passaggio da $U=0,9$ a $U=0,94$ si determina un incremento del valor medio della giacenza pari al 40,8% e un incremento del valore massimo del 50,3%.

- nel caso della *Politica 3*, la traslazione nel tempo del valore massimo¹³⁷, con un iniziale decremento del valore assunto¹³⁸ (-4,5%) e suo successivo incremento.

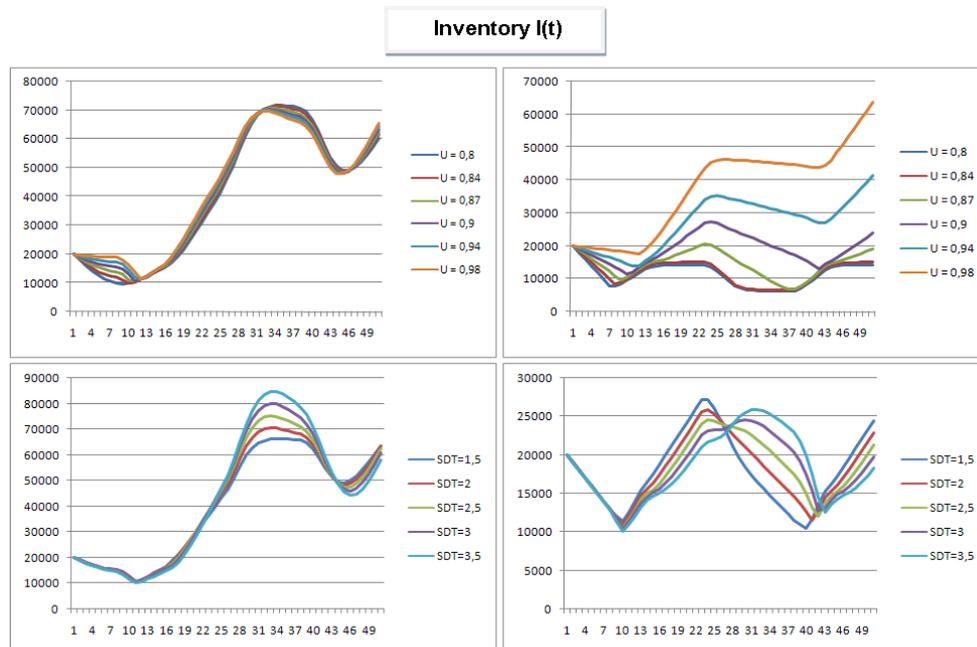


Figura 5.68 – Andamento della variabile di livello $I(t)$ al variare dei parametri U e SDT

Tali risultati lasciano ipotizzare che, in caso si adottasse una politica di caccia, un incremento del coefficiente di utilizzazione oltre il 90% o un SDT al di sotto di 1,5 settimane, possano incrementare i costi di gestione del sistema ben oltre il corrispettivo abbattimento derivante dalla diminuzione del numero dei *backorders*.

5.3.2.b Analisi di sensitività per variazioni dei parametri U e SDT

Le performance della politica basata sul controllo del *work-in-process* circolante nel sistema e di quella basata sulla caccia del mercato dipendono, verosimilmente, dal coefficiente di utilizzazione del sistema e dal lasso di tempo intercorrente fra l'istante nel quale viene richiesto un incremento della capacità e quello in cui tal incremento si rende effettivamente disponibile. Al fine di

¹³⁷ Giustificata dalla analoga traslazione nel tempo dell'istante nel quale si verifica il valore massimo della capacità del sistema.

¹³⁸ Accompagnato da un aumento della giacenza media inferiore all'1%.

verificare quantitativamente l'influenza di tali parametri sui risultati ottenuti è stato valutato il comportamento del sistema per $U \in [0,84; 0,98]$, con $\Delta U = 0,2$, e $SDT \in [1; 5]$, con $\Delta SDT = 1$.

Il valore massimo e il valore minimo assunto dalle giacenze inventariali, influenzano l'entità degli investimenti in spazi che saranno adoperati per l'immagazzinamento dei prodotti finiti, oltre che il loro coefficiente di utilizzazione; è in funzione del valor medio assunto dalle giacenze, invece, che è possibile valutare i costi di mantenimento a scorta nell'orizzonte temporale di riferimento. Com'era lecito aspettarsi, in caso di domanda ciclica, il valore massimo delle giacenze registrate in corrispondenza della *Politica 1* non è indipendente dai valori assunti dai coefficienti U e SDT (Figura 5.69, Tabella 5-9, Tabella 5-10).

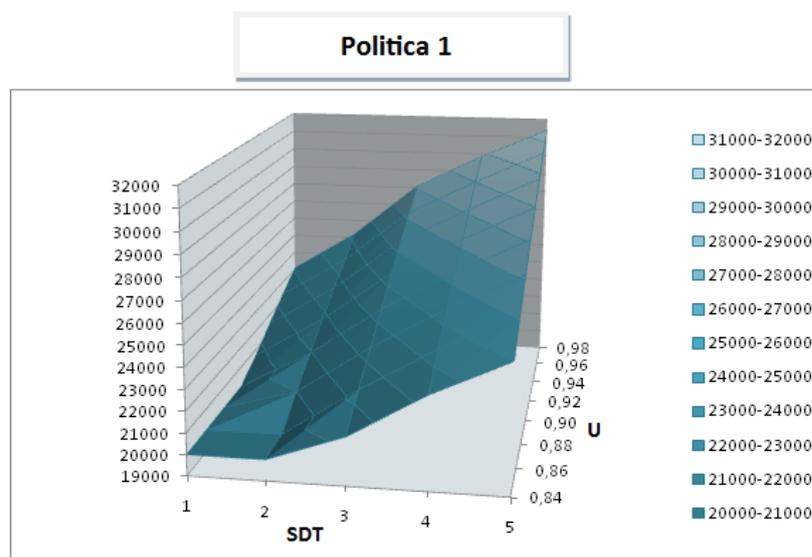


Figura 5.69 – Distribuzione dei valori massimi delle giacenze per la *Politica 1*

Tabella 5-9 - Incremento percentuale del valore massimo delle giacenze al crescere del fattore U , fissato il coefficiente SDT , per la *Politica 1*

		U						
		0,86	0,88	0,90	0,92	0,94	0,96	0,98
SDT	1	0,00%	0,00%	0,00%	3,44%	4,02%	3,68%	3,38%
	2	0,00%	4,94%	4,47%	4,05%	3,68%	3,36%	3,21%
	3	5,03%	4,53%	4,29%	4,13%	3,77%	3,45%	3,17%
	4	4,48%	4,03%	3,66%	3,51%	3,28%	3,02%	2,96%
	5	4,32%	3,89%	3,51%	3,19%	2,92%	2,68%	2,48%

**Tabella 5-10 - Incremento percentuale del valore massimo delle giacenze al crescere del
 fattore *SDT*, fissato il coefficiente *U*, per la Politica 1**

		U							
		0,84	0,86	0,88	0,90	0,92	0,94	0,96	0,98
SDT	2	0,00%	0,00%	4,94%	9,63%	10,27%	9,90%	9,56%	9,38%
	3	6,39%	11,73%	11,30%	11,11%	11,20%	11,30%	11,39%	11,35%
	4	9,82%	9,25%	8,72%	8,06%	7,42%	6,91%	6,47%	6,25%
	5	7,17%	7,01%	6,87%	6,72%	6,39%	6,02%	5,67%	5,18%

In linea di principio, la crescita del valore massimo delle giacenze in corrispondenza di un incremento del coefficiente di utilizzazione del sistema, è giustificabile alla luce di quanto già detto relativamente all'incremento delle giacenze minime nel caso di domanda a gradino. Si consideri, a tal proposito, quanto illustrato in Figura 5.70, nella quale, fra le linee rosse, è evidenziato l'orizzonte temporale nel quale si verifica l'accumulo di giacenze. Al crescere del tasso di utilizzazione del sistema, si noti, innanzitutto la variazione estremamente contenuta mostrata dal tasso di produzione $PR(t)$. Per quanto non immediatamente evidente, tale andamento è giustificato dal fatto che al crescere del coefficiente U decresce il *work-in-process* circolante nel sistema (Figura 5.89) e, proporzionalmente, decresce la capacità di cui il sistema si dotata (Figura 5.71). Tale decremento compensa quasi perfettamente l'incremento di U , lasciando praticamente invariato il tasso di produzione del sistema. L'accresciuto valore di U , tuttavia, consente un progressivo miglioramento del tasso di consegna al cliente giustificando l'accresciuto valore della giacenza massima. È inoltre grazie alla stessa Figura 5.70 che è possibile motivare la diminuzione di $\Delta I_{max\%}$, per valori di U sufficientemente elevati.

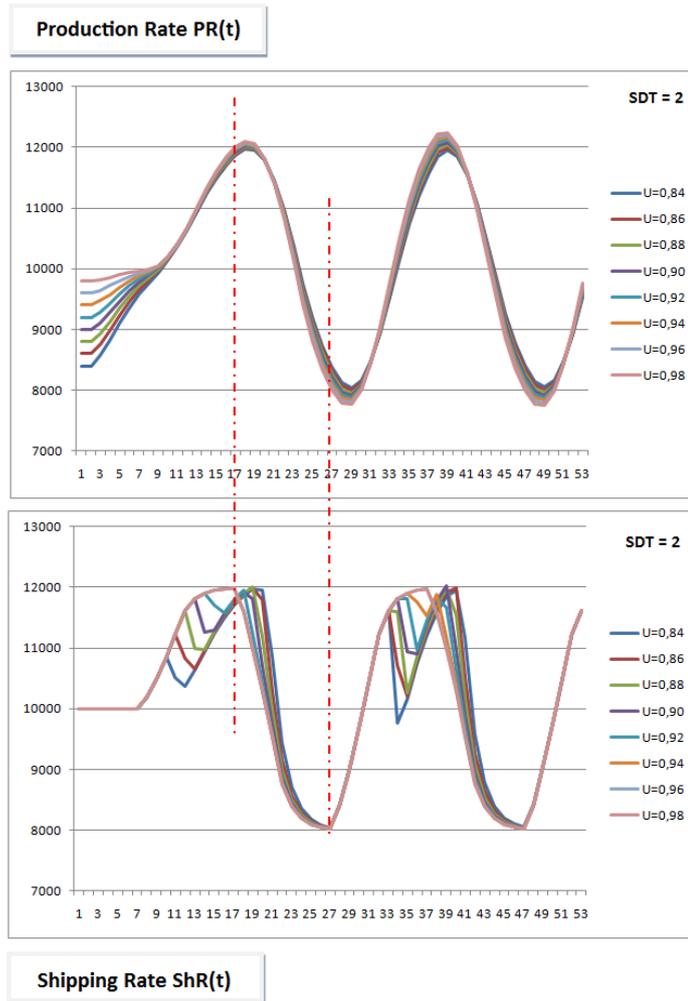


Figura 5.70 – Andamento del tasso di produzione e del tasso di consegna al cliente al variare del coefficiente U , per la Politica 1

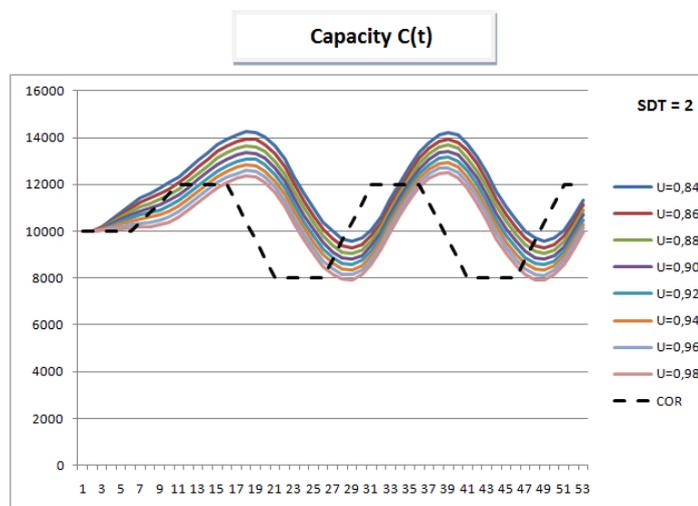


Figura 5.71 – Andamento della variabile di livello $C(t)$ al variare del coefficiente U , per la Politica 1

Per quel che concerne l'aumento del valore massimo delle giacenze in corrispondenza di un incremento di SDT^{139} , dalla Figura 5.72:

- appaiono palesi le fasi di accumulo ($PR(t) > Shr(t)$) e successivo svuotamento del magazzino ($PR(t) < Shr(t)$);
- è evidente l'incremento dell'accumulo massimo che si ottiene nel passaggio da $SDT = 2$ a $SDT = 3$.

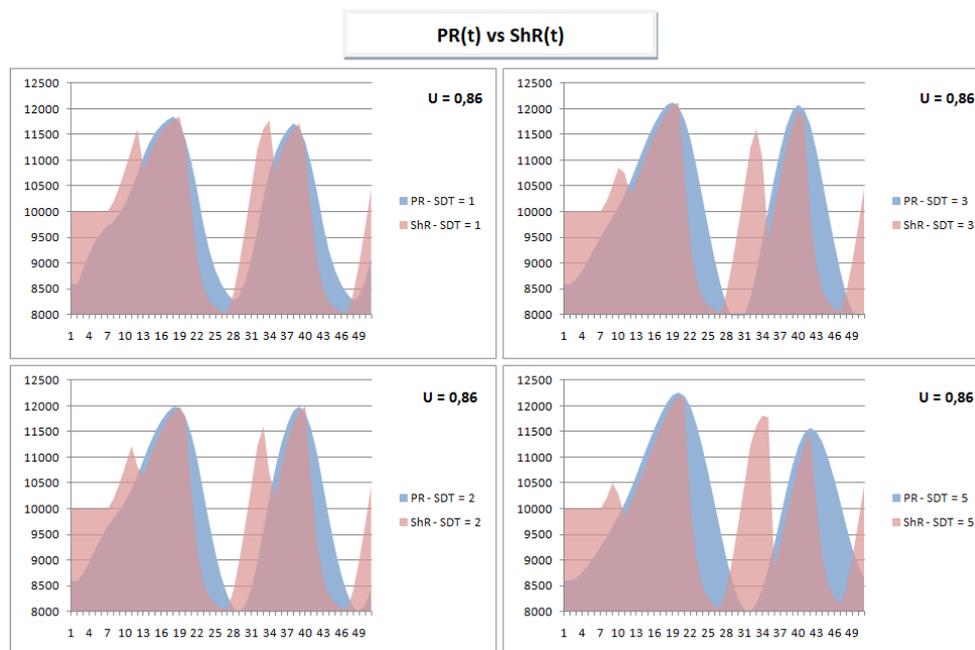


Figura 5.72 – Fasi di accumulo e progressivo svuotamento del magazzino prodotti finiti al variare del coefficiente SDT , per la Politica 1

Inoltre, dalla Figura 5.73 si può notare come al crescere di SDT , si verificano:

- un posticipo dell'incremento del tasso di produzione;
- una traslazione verso l'alto dell'oscillazione per $1 \leq SDT \leq 3$;
- una traslazione verso il basso dell'oscillazione per $SDT > 3$.

L'andamento è giustificabile se si tiene presente che, fin quando risulta $SDT \leq 3$, una migliore reattività del sistema consente, a parità di domanda, di contenere il valore massimo raggiunto da $PR(t)$. In corrispondenza di valori di

¹³⁹ In corrispondenza dei valori di $U = 0,84$ o $U = 0,86$ non si registra incremento della giacenza massima nel passaggio da $SDT = 1$ a $SDT = 2$ perché questa si mantiene al di sotto del valore di partenza, pari a 20.000 pezzi in entrambi i casi.

$SDT > 3$, invece, la capacità è sufficientemente “diluita” nel tempo, decresce più lentamente che nei casi precedenti e provoca una progressiva diminuzione del valore massimo assunto da $PR(t)$.

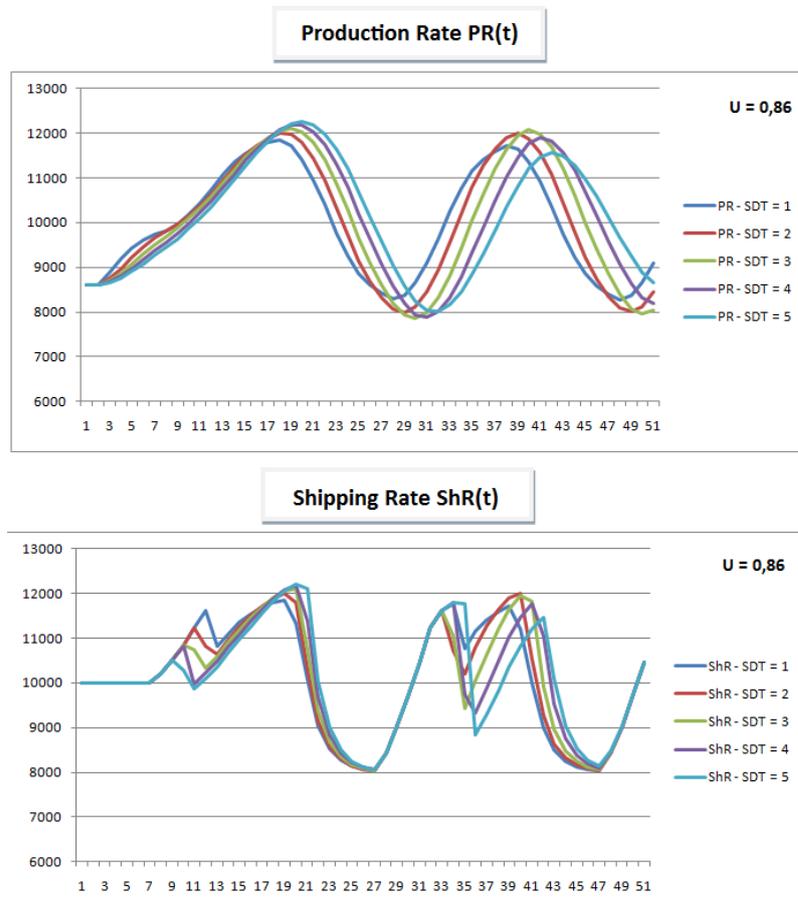


Figura 5.73 – Andamento del tasso di produzione e del tasso di consegna al cliente al variare del coefficiente SDT, per la Politica 1

Al fine di ricavare la distribuzione dei valori minimi¹⁴⁰ di $I(t)$ (Figura 5.74), è stato necessario, per la *Politica 3*, in corrispondenza di $U = 0,98$, incrementare l’orizzonte temporale di riferimento di 40 settimane (Figura 5.75); solo in questo modo, infatti, è stato possibile ottenere la stabilizzazione di $I(t)$. Per quest’ultima, in Tabella 5-11 e in Tabella 5-12, sono riportati, rispettivamente, l’incremento del valore minimo della giacenza al variare del coefficiente U , fissato il coefficiente

¹⁴⁰ La distribuzione dei valori minimi relativa alla *Politica 1* è giustificabile con considerazioni analoghe a quelle effettuate in corrispondenza dello *Scenario 1* e tenendo presente quanto detto a proposito di $PR(t)$ in corrispondenza di una variazione di SDT .

SDT, e l'incremento del valore minimo della giacenza al variare del coefficiente *SDT*, fissato il coefficiente *U*.

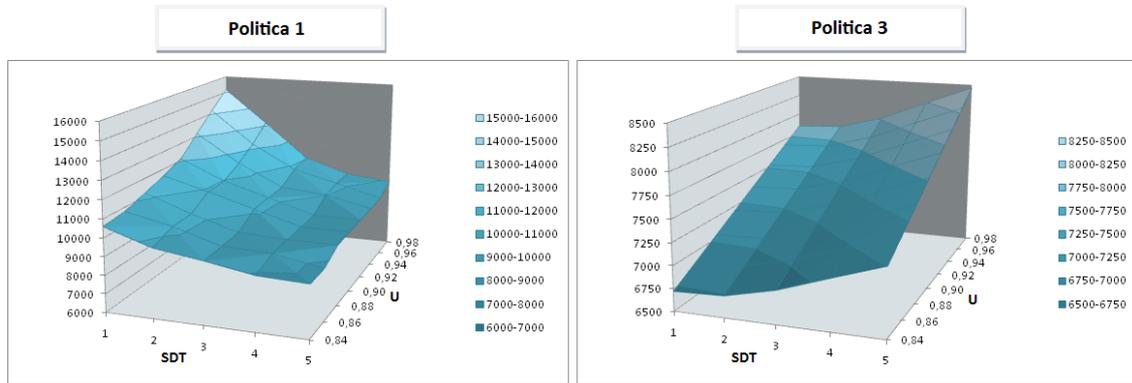


Figura 5.74 – Distribuzione dei valori minimi delle giacenze al variare della politica di scalabilità adottata

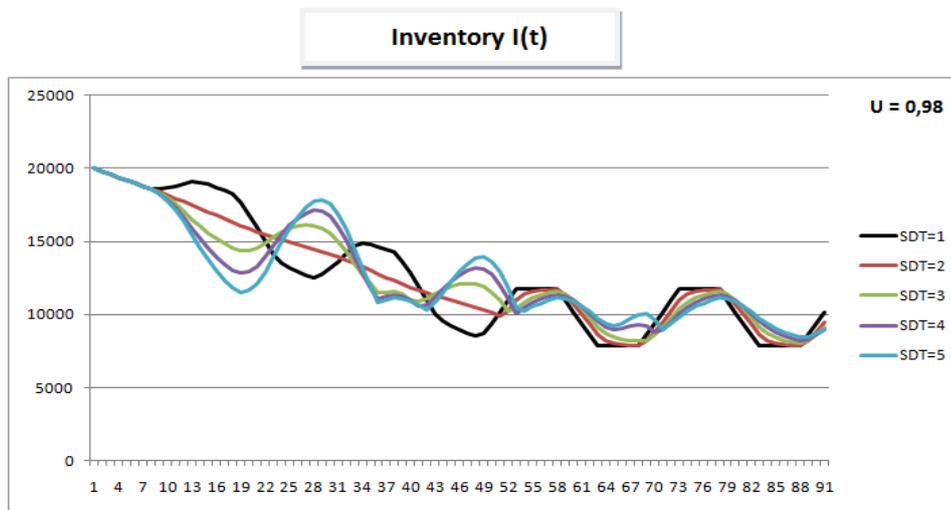


Figura 5.75 – Andamento della variabile di livello *I(t)* al variare del coefficiente *SDT*, per la *Politica 3*

Tabella 5-11 - Incremento percentuale del valore minimo della giacenza al crescere del fattore *U*, fissato il coefficiente *SDT*, per la *Politica 3*

		U						
		0,86	0,88	0,90	0,92	0,94	0,96	0,98
SDT	1	2,38%	2,33%	2,27%	2,22%	2,17%	2,13%	2,08%
	2	2,38%	2,33%	2,27%	2,22%	2,17%	2,13%	2,08%
	3	2,38%	2,33%	2,27%	2,22%	2,17%	2,13%	2,08%
	4	2,38%	2,33%	2,27%	2,22%	2,17%	2,13%	2,08%
	5	2,38%	2,33%	2,27%	2,22%	2,17%	2,13%	2,08%

Tabella 5-12 - Incremento percentuale del valore minimo della giacenza al crescere del fattore *SDT*, fissato il coefficiente *U*, per la Politica 3

		U							
		0,84	0,86	0,88	0,90	0,92	0,94	0,96	0,98
SDT	2	0,30%	0,30%	0,30%	0,30%	0,30%	0,30%	0,30%	0,30%
	3	1,94%	1,94%	1,94%	1,94%	1,94%	1,94%	1,94%	1,94%
	4	2,83%	2,83%	2,83%	2,83%	2,83%	2,83%	2,83%	2,83%
	5	2,68%	2,68%	2,68%	2,68%	2,68%	2,68%	2,68%	2,68%

L'incremento della giacenza minima al crescere del parametro *U* non varia al variare del particolare *SDT* prescelto ed è giustificato dal fatto che al crescere di *U* si ottiene un proporzionale incremento di *PR(t)* (Figura 5.76). Questo, tenendo anche conto del livello delle scorte iniziali, consente (Figura 5.77):

- un miglior sostenimento delle richieste di mercato, allontanando l'istante per il quale risulterà $ShR(t) = MShR(t) = I(t)$;
- l'assestamento su valori minimi di giacenza via via più consistenti e coincidenti con il valore minimo assunto da *PR(t)*.

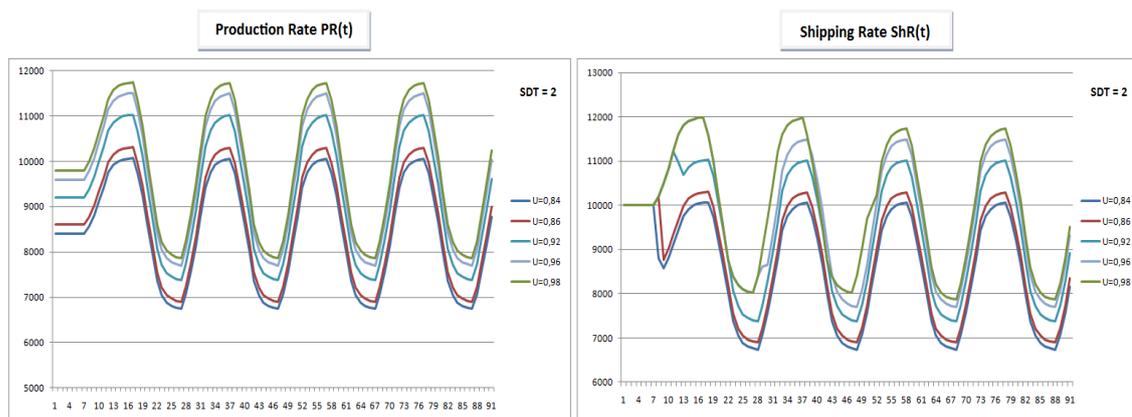


Figura 5.76 – Andamento del tasso di produzione e del tasso di consegna al variare del coefficiente *U*, per la Politica 3

La giacenza inventariale iniziale, infatti, consente il soddisfacimento della domanda che non è possibile soddisfare al tasso di produzione attuale; quest'ultimo resta, in ogni caso, sempre inferiore alla richiesta del mercato. Assorbita, dunque, tale scorta iniziale il tasso di consegna diverrà esattamente sovrapponibile al tasso di produzione, assumendone il valore massimo e il valore

minimo ed analogamente accadrà per $I(t)$. Poiché al crescere di U cresce $PR(t)$, cresceranno proporzionalmente i valori minimi assunti dalla giacenza.

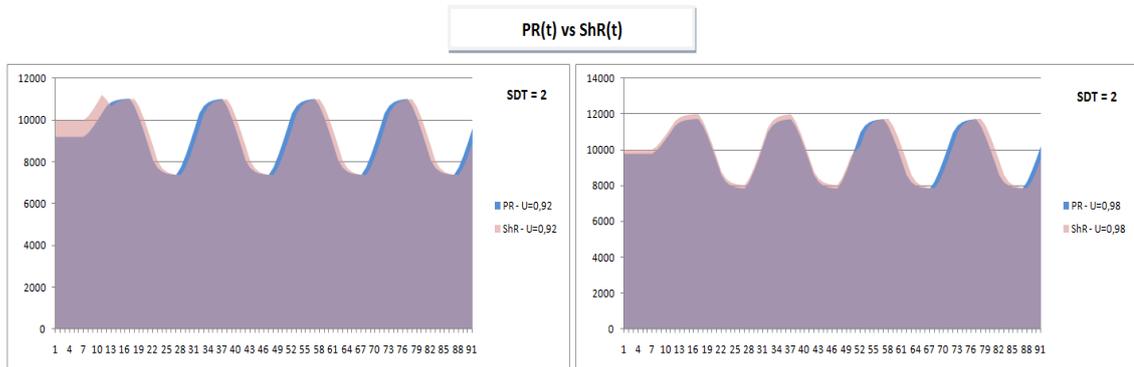


Figura 5.77 – Fasi di accumulo e progressivo svuotamento del magazzino prodotti finiti per $SDT = 2$ e a) $U = 92\%$, b) $U = 94\%$ (Politica 3)

Un discorso analogo può essere condotto per giustificare l’incremento della giacenza minima nel caso di incremento del coefficiente SDT . La variazione di $PR(t)$ è dovuta alla minore sovrapposibilità dell’andamento della capacità di cui si dota il sistema e di quello relativo alla domanda di mercato (Figura 5.78) e, ancora una volta, il valor minimo della giacenza corrisponde al valore minimo del tasso di produzione. Tale condizione verrà raggiunta in tempi più o meno consistenti, a seconda del valore assunto dal coefficiente di utilizzazione del sistema.

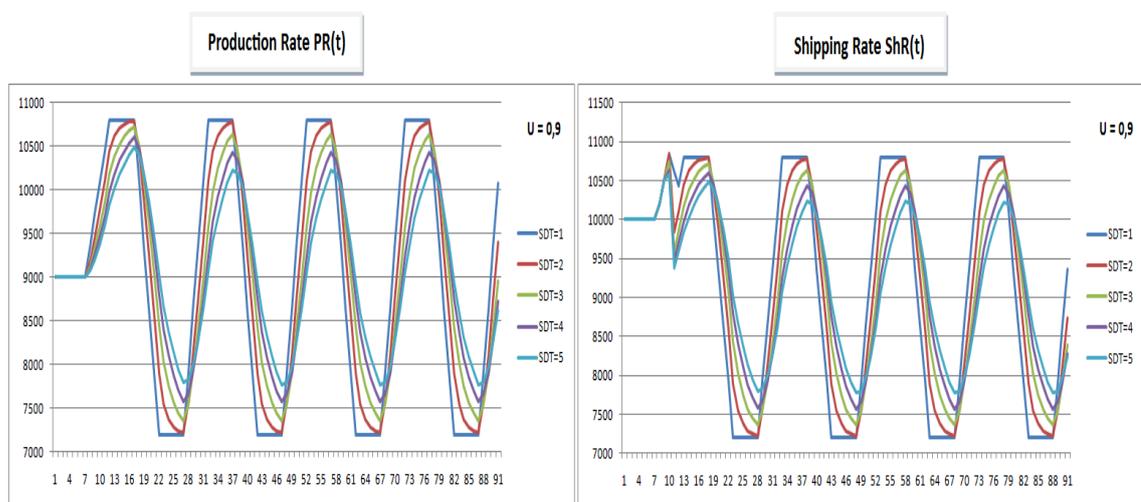


Figura 5.78 – Andamento del tasso di produzione e del tasso di consegna al variare del coefficiente SDT , per la Politica 3

Per quel che concerne l'andamento delle giacenze medie (Figura 5.79):

- nel caso si adotti la *Politica 1*, se ne verifica un incremento più consistente al crescere del coefficiente di utilizzazione del sistema piuttosto che al crescere di *SDT* (Figura 5.80, Tabella 5-13);
- nel caso si adotti la *Politica 2*, una contrazione di *SDT* o un incremento di *U* comportano un incremento della giacenza media confrontabile, con $\Delta I_{med} \in [1,6\%, 1,3\%]$, confermando la scarsa sensibilità ai parametri presi in considerazione (Tabella 5-14, Figura 5.81);
- nel caso si adotti la *Politica 3*, l'incremento del valor medio delle giacenze al crescere di *U*, si giustifica nell'ottica del progressivo incremento dei valori minimi e massimi delle giacenze conseguibili a seguito dell'incremento di $PR(t)$. Il consistente balzo in avanti fatto registrare in corrispondenza del passaggio da $U = 0,96$ a $U = 0,98$ è dovuto alla diminuzione dell'entità dei prelievi nella fase iniziale (Tabella 5-15, Figura 5.82).

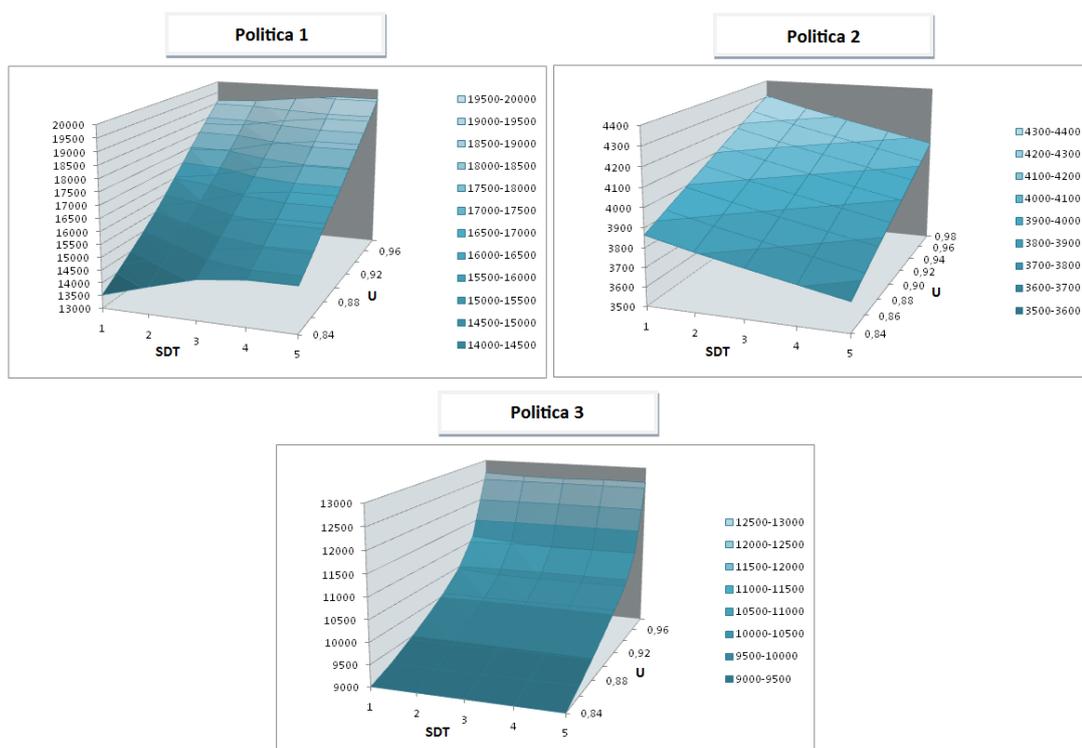


Figura 5.79 – Distribuzione dei valori medi delle giacenze al variare della politica di scalabilità adottata

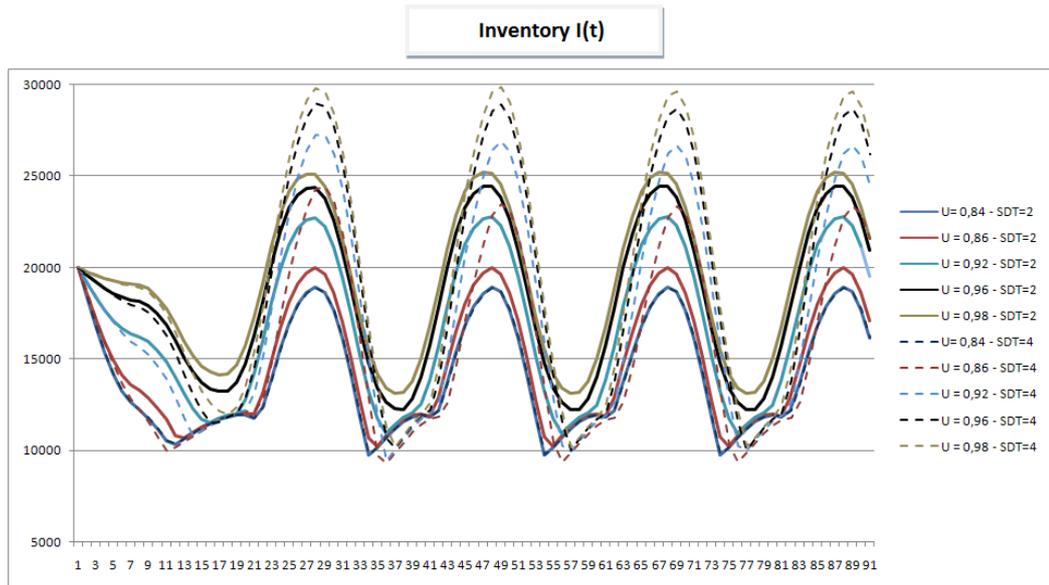


Figura 5.80 – Andamento della variabile di livello $I(t)$ al variare del coefficiente U , per valori di $SDT = 2$ e $SDT = 4$ (Politica 1)

Tabella 5-13 - Incremento percentuale del valore medio della giacenza al crescere del fattore U , fissato il coefficiente SDT , per la Politica 1

		U						
		0,86	0,88	0,90	0,92	0,94	0,96	0,98
SDT	1	4,93%	4,94%	5,13%	5,58%	5,43%	4,94%	4,53%
	2	4,57%	4,54%	4,45%	4,41%	4,46%	4,69%	4,57%
	3	4,36%	4,37%	4,23%	4,14%	4,02%	3,98%	4,00%
	4	4,50%	4,23%	4,09%	4,15%	3,97%	3,80%	3,80%
	5	4,23%	4,39%	4,09%	4,15%	3,97%	3,80%	3,80%

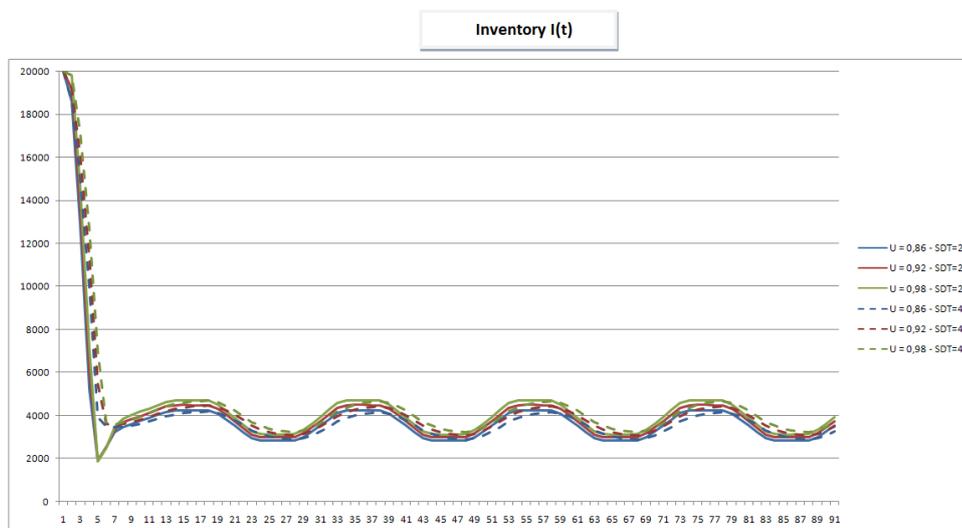


Figura 5.81 – Andamento della variabile di livello $I(t)$ al variare del coefficiente U , per valori di $SDT = 2$ e $SDT = 4$ (Politica 1)

Tabella 5-14 - Incremento percentuale del valor medio della giacenza al decrescere del fattore SDT, fissato il coefficiente U, per la Politica 2

		U							
		0,84	0,86	0,88	0,90	0,92	0,94	0,96	0,98
SDT	1	1,52%	1,52%	1,52%	1,52%	1,52%	1,52%	1,52%	1,52%
	2	1,38%	1,38%	1,38%	1,38%	1,38%	1,38%	1,38%	1,37%
	3	1,34%	1,34%	1,34%	1,34%	1,34%	1,33%	1,33%	1,33%
	4	1,37%	1,36%	1,36%	1,36%	1,36%	1,35%	1,35%	1,35%

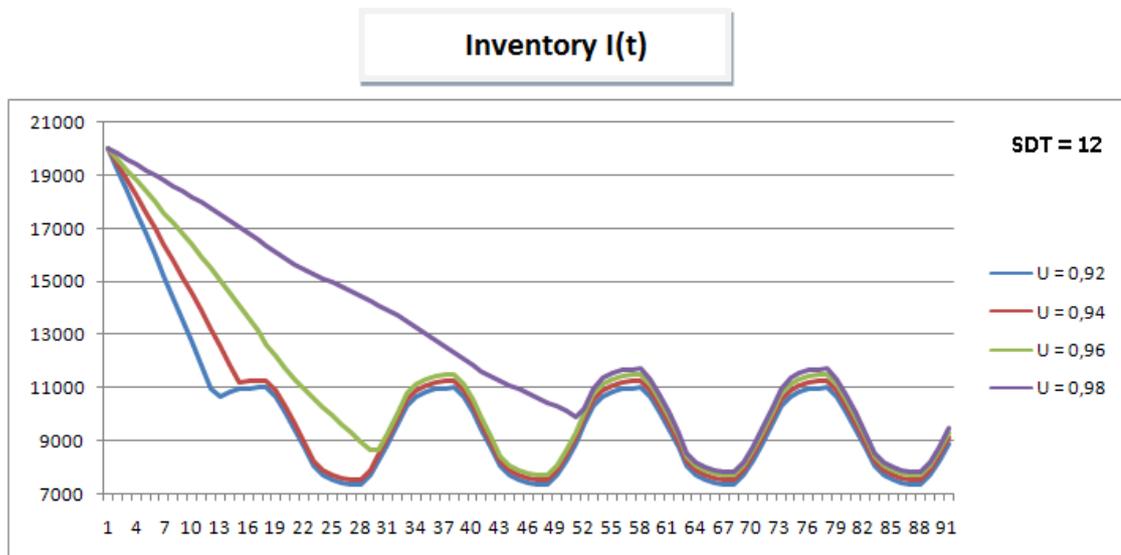


Figura 5.82 – Andamento della variabile di livello I(t) al variare del coefficiente U (Politica 3)

Tabella 5-15 - Incremento percentuale del valore medio della giacenza al crescere del fattore U, fissato il coefficiente SDT, per la Politica 3

		U						
		0,86	0,88	0,90	0,92	0,94	0,96	0,98
SDT	1	2,73%	2,83%	3,00%	3,27%	3,99%	6,25%	13,97%
	2	2,73%	2,83%	2,93%	3,13%	3,44%	6,18%	14,46%
	3	2,73%	2,83%	2,91%	3,07%	3,29%	5,83%	14,88%
	4	2,73%	2,83%	2,91%	3,03%	3,25%	5,90%	15,01%
	5	2,73%	2,82%	2,91%	3,02%	3,21%	5,92%	14,87%

I valori massimi, minimi e medi del *backlog* di sistema, ottenuti al variare della politica adottata, sono riportati in Figura 5.83, Figura 5.84 e Figura 5.85. Molte delle considerazioni sugli andamenti in questione possono essere estrapolate da quelle fatte relativamente all'andamento delle giacenze inventariali. È alla luce del confronto fra l'andamento del mercato e di quanto

riportato in Figura 5.70 e Figura 5.73 che si spiega, se si adotta la *Politica 1*, il decremento di $OB(t)$ al crescere di U o al diminuire di SDT ; basta, invece, considerare quanto illustrato in Figura 5.76 e Figura 5.78 per giustificare gli andamenti relativi alla *Politica 3*.

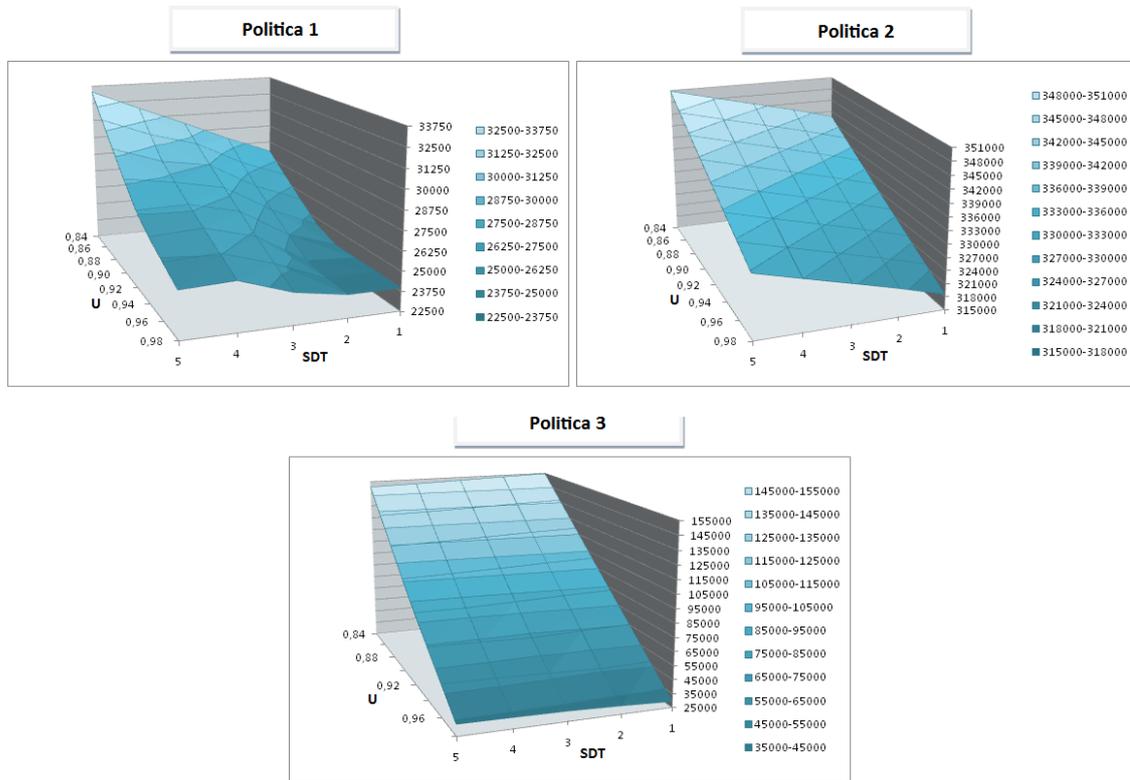


Figura 5.83 – Distribuzione dei valori massimi del backlog di sistema al variare della politica di scalabilità adottata

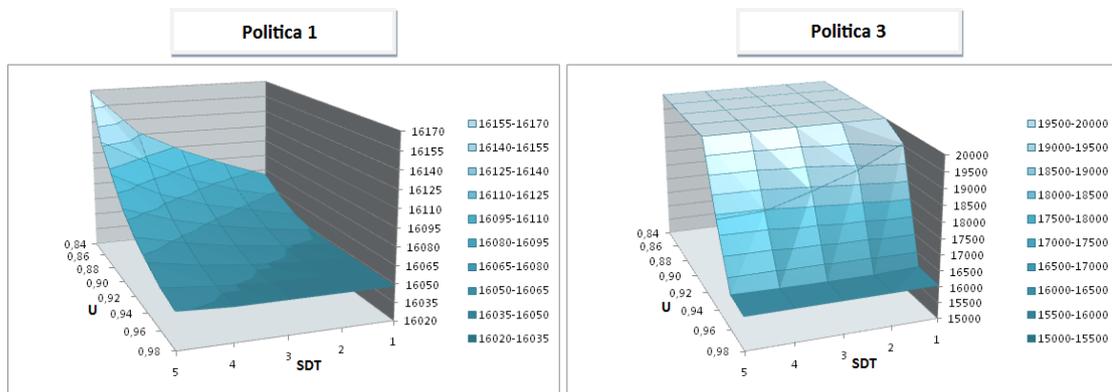


Figura 5.84 – Distribuzione dei valori minimi del backlog di sistema al variare della politica di scalabilità adottata

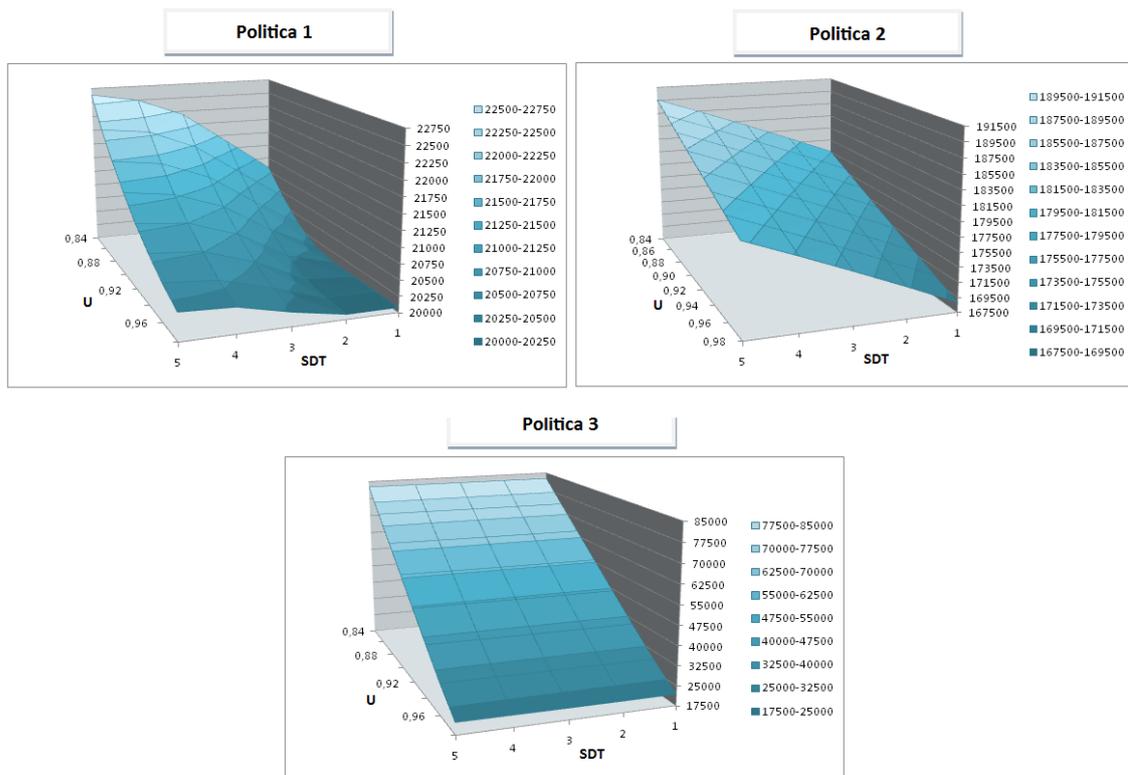


Figura 5.85 – Distribuzione dei valori medi del backlog di sistema al variare della politica di scalabilità adottata

Analizzando più nel dettaglio gli andamenti relativi alla *Politica 1* (Tabella 5-16, Tabella 5-17), è possibile individuare delle aree nelle quali interventi mirati alla contrazione di U o SDT o non comportano vantaggi significativi o richiedono sforzi aggiuntivi affinché possano diventarlo¹⁴¹. Preme in ogni caso ricordare che negli altri casi, così come già detto allorquando si è ipotizzato un incremento stabile della domanda, pur se non si considerasse l'entità dell'investimento necessario per un aumento di U o una contrazione di SDT , sarà necessario confrontare i vantaggi derivanti da una contrazione di OB , con i costi da sostenere per l'eventuale incremento di I e/o WIP (Figura 5.86).

¹⁴¹ Si prenda ad esempio in considerazione il caso di una contrazione di SDT da 5 a 4 settimane nel caso di $U > 92\%$.

Tabella 5-16 – Decremento percentuale del valore massimo del backlog di sistema al crescere del fattore U , fissato il coefficiente SDT, per la Politica 1

		U						
		0,86	0,88	0,90	0,92	0,94	0,96	0,98
SDT	1	-4,28%	-4,29%	-4,31%	-2,36%	0,00%	0,00%	0,00%
	2	-4,22%	-3,93%	-3,55%	-3,55%	-3,54%	-0,71%	0,00%
	3	-3,19%	-3,16%	-3,14%	-3,12%	-3,10%	-3,09%	-3,09%
	4	-4,40%	-4,30%	-2,67%	-2,62%	-2,59%	-2,56%	-2,53%
	5	-4,55%	-4,56%	-4,57%	-4,58%	-3,09%	-2,44%	-2,43%

Tabella 5-17 – Decremento percentuale del valore medio del backlog di sistema al crescere del fattore U , fissato il coefficiente SDT, per la Politica 1

		U						
		0,86	0,88	0,90	0,92	0,94	0,96	0,98
SDT	1	-1,89%	-1,54%	-1,04%	-0,31%	0,00%	0,00%	0,00%
	2	-2,02%	-1,72%	-1,46%	-1,16%	-0,79%	-0,25%	0,00%
	3	-2,08%	-1,77%	-1,56%	-1,33%	-1,11%	-0,85%	-0,52%
	4	-1,98%	-1,85%	-1,66%	-1,32%	-1,16%	-1,01%	-0,71%
	5	-2,18%	-1,80%	-1,63%	-1,48%	-1,21%	-1,01%	-0,82%

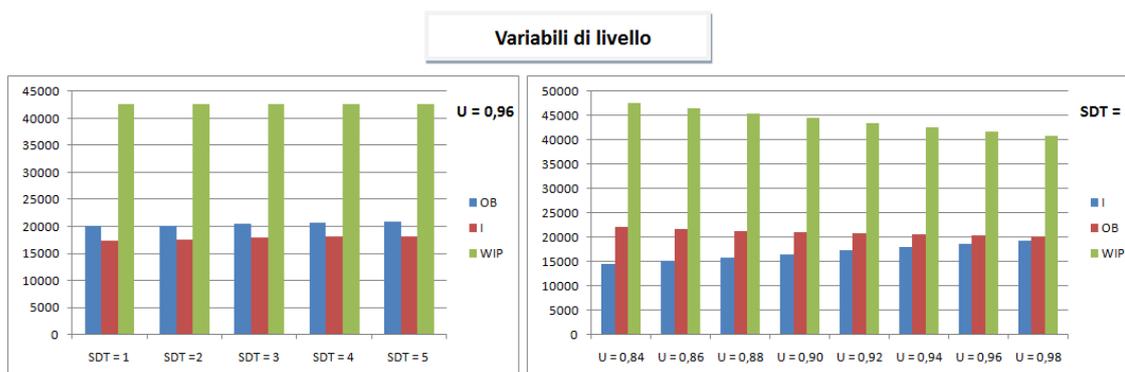


Figura 5.86 – Variazioni delle variabili di livello di interesse in corrispondenza di una variazione di U o SDT (Politica 1)

Considerazioni differenti riguardano la *Politica 3* giacché, in questo caso, il tasso di produzione risente del fatto che la capacità del sistema oscilla all'interno dell'intervallo i cui limiti sono definiti dal valore massimo e dal valore minimo della domanda di mercato. Valori elevati di U consentono, come già detto, di servire una fetta di mercato più consistente e limitare i prelievi dal magazzino nella prima parte dell'orizzonte temporale di riferimento; questo comporta una diminuzione consistente tanto del valor medio del *backlog*, tanto del suo valore

massimo (Tabella 5-18, Tabella 5-19). Vale la pena sottolineare come in questo caso non si osservi quell'effetto di compensazione in corrispondenza di valori elevati di U e SDT che, nel caso di incremento stabile della domanda, comportava una minor contrazione di OB . I valori bassi di SDT , infatti, giocano qui un ruolo ben più importante che nel caso precedente, proprio in virtù della mancata stabilizzazione della domanda¹⁴² che costringe, di volta in volta, il sistema ad adattarsi a nuove condizioni. Infine, la differenza così marcata nelle contrazioni di OB , rispetto al caso in cui si ricorra ad una politica di scalabilità basata sul controllo del WIP , è dovuta al fatto che nel caso della *Politica 3* il valore di OB è, in ogni caso, crescente mentre nel caso della *Politica 1* se ne riesce ad ottenere una stabilizzazione.

Tabella 5-18 – Decremento percentuale del valore massimo del backlog di sistema al crescere del fattore U , fissato il coefficiente SDT , per la *Politica 3*

		U						
		0,86	0,88	0,90	0,92	0,94	0,96	0,98
SDT	1	-11,56%	-13,07%	-15,04%	-17,70%	-21,51%	-27,40%	-37,74%
	2	-11,64%	-13,17%	-15,17%	-17,88%	-21,77%	-27,83%	-32,88%
	3	-11,75%	-13,31%	-15,35%	-18,14%	-22,13%	-24,41%	-31,92%
	4	-11,84%	-13,43%	-15,52%	-18,37%	-19,96%	-24,15%	-31,80%
	5	-11,92%	-13,53%	-15,65%	-17,75%	-19,34%	-23,97%	-31,53%

Tabella 5-19 – Decremento percentuale del valore medio del backlog di sistema al crescere del fattore U , fissato il coefficiente SDT , per la *Politica 3*

		U						
		0,86	0,88	0,90	0,92	0,94	0,96	0,98
SDT	1	-10,84%	-12,13%	-13,77%	-15,91%	-18,75%	-22,41%	-25,83%
	2	-10,83%	-12,13%	-13,78%	-15,93%	-18,86%	-22,46%	-25,73%
	3	-10,82%	-12,12%	-13,76%	-15,92%	-18,87%	-22,53%	-25,59%
	4	-10,81%	-12,10%	-13,74%	-15,90%	-18,84%	-22,46%	-25,45%
	5	-10,80%	-12,08%	-13,72%	-15,87%	-18,80%	-22,39%	-25,41%

Al valore massimo del *work-in-process* circolante nel sistema sono legate problematiche di organizzazione degli spazi di lavoro e il dimensionamento di

¹⁴² Nello *Scenario I*, indipendentemente dal valore assunto da SDT , la capacità del sistema tende, al trascorrere del tempo, al valore della domanda di mercato.

eventuali buffer interoperazionali da realizzare (Figura 5.87); conoscendone il valor medio è possibile, invece, effettuare una stima dei costi di mantenimento da sostenere nell'orizzonte temporale di riferimento (Figura 5.89).

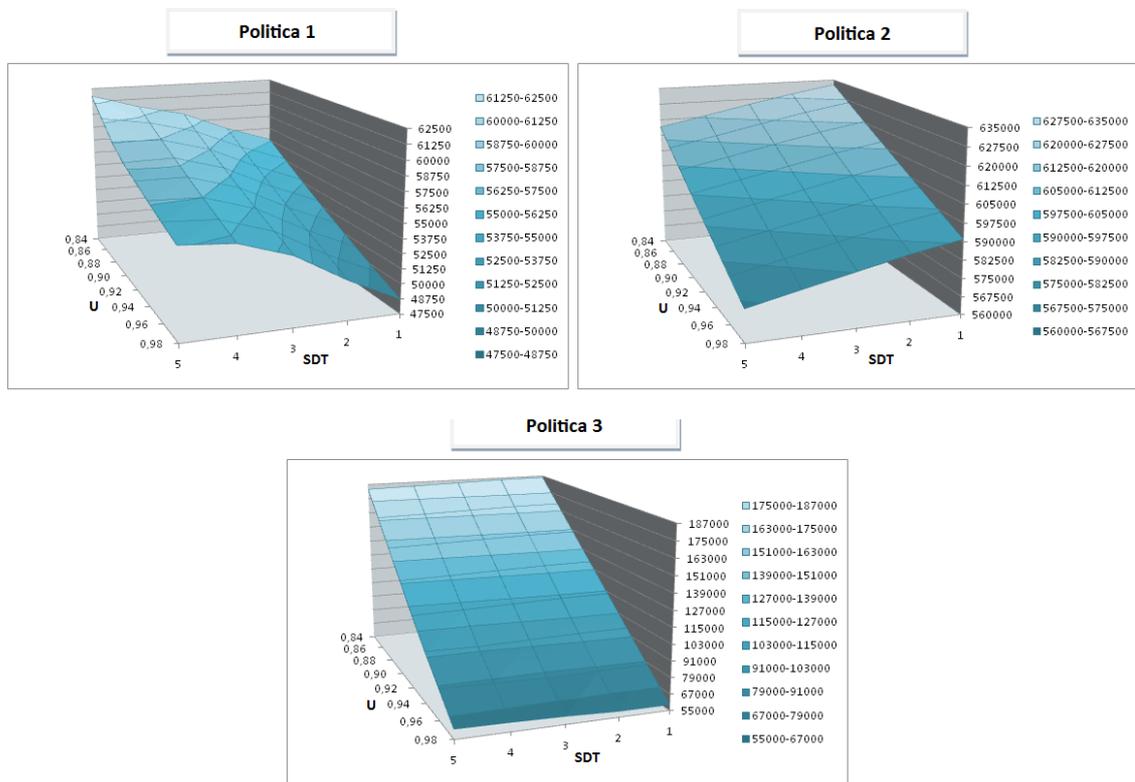


Figura 5.87 – Distribuzione dei valori massimi del WIP al variare della politica di scalabilità adottata

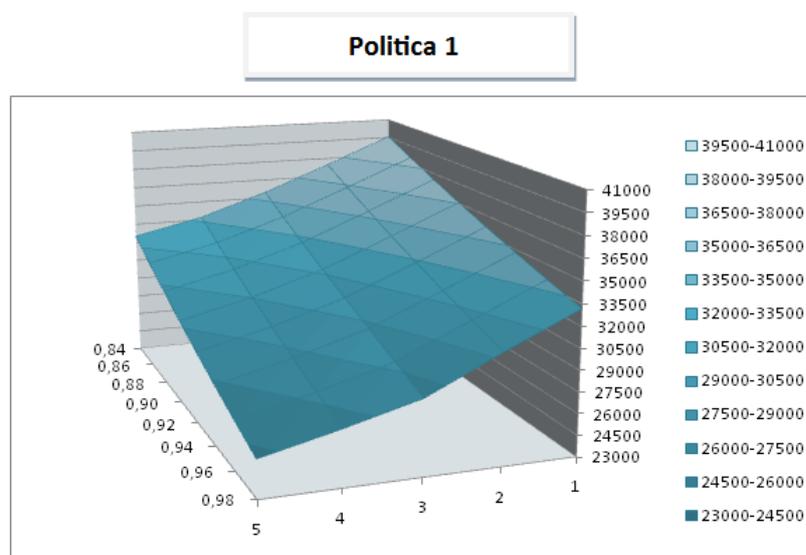


Figura 5.88 – Distribuzione dei valori minimi del WIP per la Politica 1

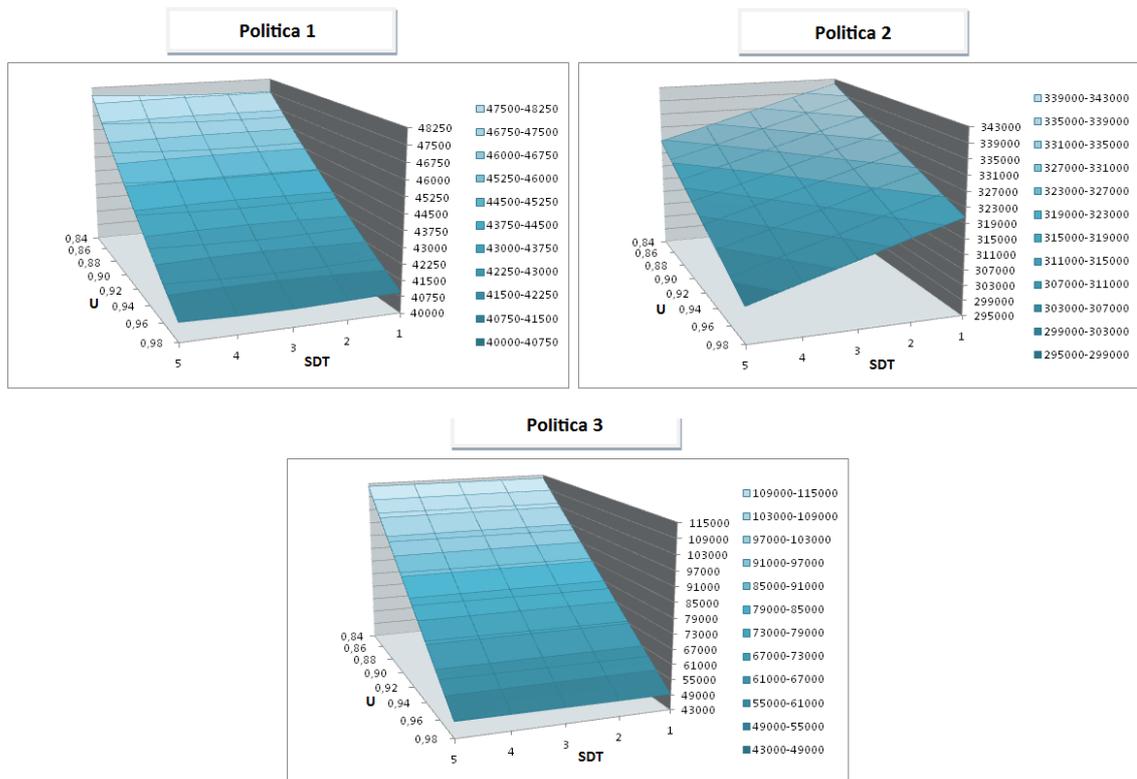


Figura 5.89 – Distribuzione dei valori medi del WIP al variare della politica di scalabilità adottata

Secondo quanto riportato in Tabella 5-20, Tabella 5-21 e Tabella 5-22 è possibile ottenere una contrazione più consistente del valor massimo e del valor medio assunto dal *WIP* nell’orizzonte temporale di riferimento, soprattutto in corrispondenza di un decremento di SDT^{143} , nel caso in cui si faccia ricorso alla *Politica 1*.

Tabella 5-20 – Decremento percentuale del valore massimo del WIP al crescere del fattore U, fissato il coefficiente SDT, per la Politica 1

		U						
		0,86	0,88	0,90	0,92	0,94	0,96	0,98
SDT	1	-2,17%	-2,13%	-2,09%	-2,06%	-2,02%	-1,98%	-1,95%
	2	-1,90%	-1,87%	-1,83%	-1,80%	-1,77%	-1,74%	-1,72%
	3	-1,76%	-1,62%	-1,57%	-1,53%	-1,50%	-1,47%	-1,44%
	4	-1,51%	-1,47%	-1,44%	-1,41%	-1,38%	-1,35%	-1,32%
	5	-2,44%	-2,39%	-1,78%	-1,22%	-1,19%	-1,16%	-1,14%

¹⁴³ A parità di coefficiente di utilizzazione del sistema.

Tabella 5-21 – Decremento percentuale del valore massimo del WIP al decrescere del fattore SDT, fissato il coefficiente U, per la Politica 1

		U							
		0,84	0,86	0,88	0,90	0,92	0,94	0,96	0,98
SDT	1	-2,39%	-2,66%	-2,92%	-3,18%	-3,43%	-3,67%	-3,91%	-4,13%
	2	-2,99%	-3,13%	-3,38%	-3,64%	-3,90%	-4,17%	-4,43%	-4,70%
	3	-1,63%	-1,88%	-2,02%	-2,14%	-2,27%	-2,39%	-2,51%	-2,63%
	4	-2,05%	-1,12%	-0,19%	0,15%	-0,04%	-0,23%	-0,42%	-0,61%

Tabella 5-22 – Decremento percentuale del valore medio del WIP al crescere del fattore U, fissato il coefficiente SDT, per la Politica 1

		U						
		0,86	0,88	0,90	0,92	0,94	0,96	0,98
SDT	1	-2,24%	-2,19%	-2,15%	-2,10%	-2,06%	-2,02%	-1,98%
	2	-2,27%	-2,22%	-2,18%	-2,13%	-2,09%	-2,05%	-2,01%
	3	-2,30%	-2,26%	-2,21%	-2,17%	-2,13%	-2,09%	-2,05%
	4	-2,33%	-2,28%	-2,24%	-2,19%	-2,15%	-2,11%	-2,08%
	5	-2,34%	-2,30%	-2,25%	-2,21%	-2,17%	-2,13%	-2,09%

Tale considerazione è resa palese dalla Figura 5.90 in cui, dal confronto fra l'andamento del tasso di ordinazione e l'andamento del tasso di produzione, è possibile osservare:

- l'anticipo indotto nelle fasi di accumulo e successiva diminuzione del *WIP* da un decremento di *SDT*, una volta fissato il coefficiente di utilizzazione del sistema;
- il decremento anticipato nelle tabelle di cui sopra;
- l'effetto estremamente contenuto, fatta eccezione per la prima parte dell'orizzonte temporale di riferimento, di un incremento di *U* sull'andamento di *PR(t)* e quindi su *WIP(t)*.

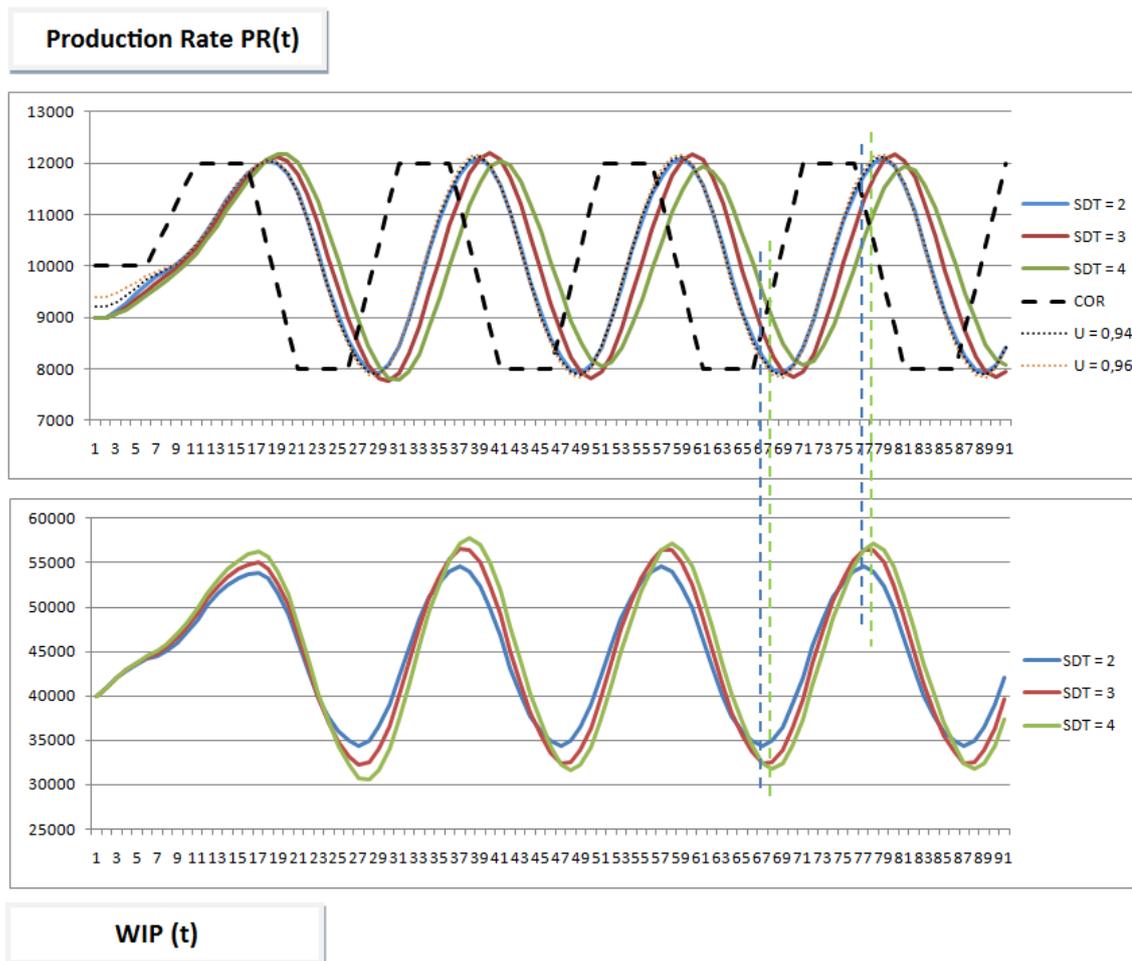


Figura 5.90 – Andamento del tasso di produzione e del WIP al variare del coefficiente SDT, per $U = 0,9$ (Politica 1)

Così come accaduto allorquando si è preso in considerazione l'andamento del *backlog* di sistema, la contrazione del valor massimo e del valor medio del *WIP* è particolarmente consistente nel caso di diminuzione di U , se si adotta per la scalabilità della capacità la *Politica 3* (Tabella 5-23, Tabella 5-24), giacché il tasso di produzione risente del fatto che la capacità del sistema oscilla all'interno dell'intervallo i cui limiti sono definiti dal valore massimo e dal valore minimo della domanda di mercato.

Tabella 5-23 – Decremento percentuale del valore massimo del *WIP* al crescere del fattore *U*, fissato il coefficiente *SDT*, per la *Politica 3*

		U						
		0,86	0,88	0,90	0,92	0,94	0,96	0,98
SDT	1	-9,73%	-10,77%	-12,07%	-13,73%	-15,92%	-18,93%	-23,35%
	2	-9,74%	-10,79%	-12,10%	-13,77%	-15,96%	-18,99%	-22,89%
	3	-9,80%	-10,86%	-12,19%	-13,88%	-16,12%	-18,94%	-20,20%
	4	-9,86%	-10,94%	-12,28%	-14,00%	-16,28%	-17,04%	-20,03%
	5	-9,91%	-11,00%	-12,36%	-14,11%	-15,28%	-16,70%	-20,05%

Tabella 5-24 – Decremento percentuale del valore medio del *WIP* al crescere del fattore *U*, fissato il coefficiente *SDT*, per la *Politica 3*

		U						
		0,86	0,88	0,90	0,92	0,94	0,96	0,98
SDT	1	-8,09%	-8,80%	-9,65%	-10,68%	-11,96%	-13,58%	-15,71%
	2	-8,09%	-8,80%	-9,65%	-10,67%	-11,95%	-13,57%	-15,70%
	3	-8,08%	-8,79%	-9,64%	-10,67%	-11,94%	-13,56%	-15,69%
	4	-8,07%	-8,78%	-9,63%	-10,66%	-11,93%	-13,54%	-15,66%
	5	-8,07%	-8,78%	-9,62%	-10,64%	-11,91%	-13,52%	-15,64%

Dalla Figura 5.91, in cui viene confrontato l'andamento del tasso di ordinazione e l'andamento del tasso di produzione, è possibile osservare:

- la diminuzione del lasso temporale all'interno del quale si verifica l'accumulo di *WIP* nel sistema, allorquando il coefficiente di utilizzazione passa da $U = 0,88$ a $U = 0,92$, una volta posto $SDT = 2$;
- il decremento anticipato nelle tabelle di cui sopra;
- l'effetto contenuto di una contrazione di SDT una volta fissato $U = 0,92$.

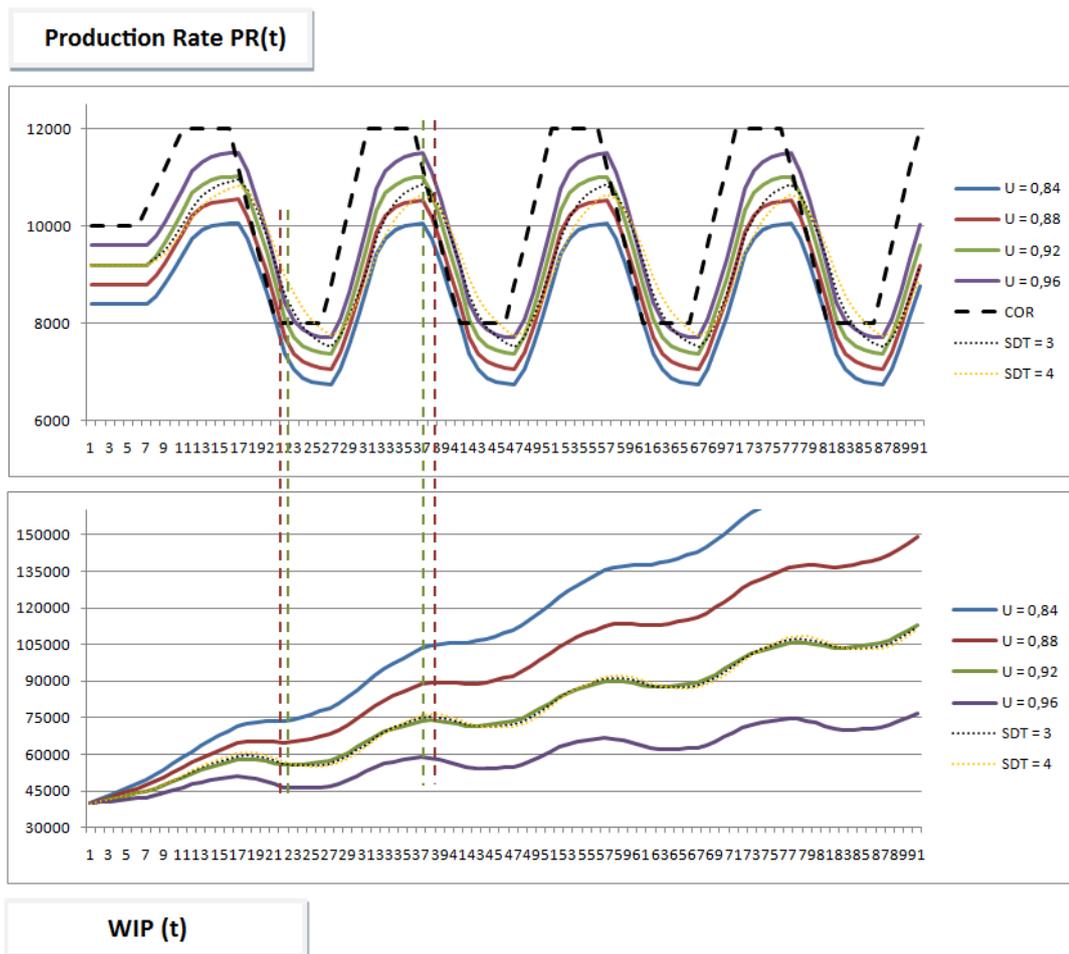


Figura 5.91 – Andamento del tasso di produzione e del WIP al variare del coefficiente U , per $SDT = 2$ (Politica 3)

5.3.3 Analisi dei risultati – Scenario III

È interessante analizzare la risposta fornita dal sistema in presenza di un singolo picco di domanda principalmente per due motivi. Il primo, più legato a considerazioni circa la progettazione del modello, è verificare l'assenza di "effetti memoria" nell'andamento delle variabili di interesse, in presenza di una perturbazione non prevista degli stimoli esterni. Tale verifica potrà essere condotta paragonando il comportamento del sistema a quello registrato in caso di domanda costante. In secondo luogo, si è inteso simulare la presa in carico di una singola commessa che non fosse inizialmente prevista nel portafoglio ordini aziendale. Tale eventualità, per la verità piuttosto comune in ambito industriale,

presuppone una più accurata valutazione dello sforzo sostenuto dall'azienda per riconfigurare il sistema in rapporto al valore della commessa stessa.

In Figura 5.92 sono riportati gli andamenti della variabile di livello *Capacità* e del *Tasso di Produzione* garantiti dalle politiche oggetto di confronto, nonché le rispettive variazioni percentuali¹⁴⁴ in funzione del tempo, rispetto al caso di domanda costante e pari a 10.000 pz/sett.

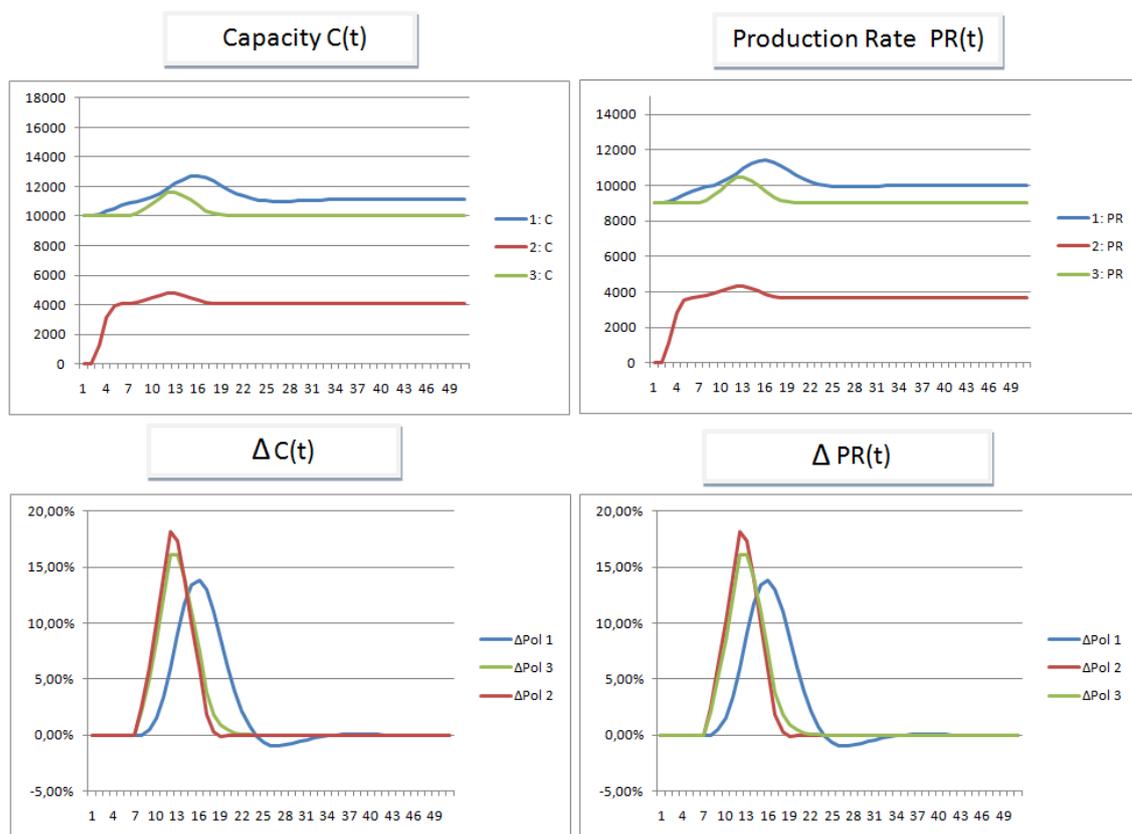


Figura 5.92 – Andamento della variabile di livello Capacità e della variabile di flusso Tasso di Produzione e relative variazioni percentuali rispetto al caso di domanda costante

Sebbene al termine dell'intervallo temporale di riferimento in nessuno dei tre casi si registri traccia della perturbazione indotta, questa è assorbita più rapidamente nel caso della *Politica 2* e della *Politica 3*, mentre per la *Politica 1* è necessario attendere un lasso temporale più consistente. In quest'ultimo caso, i valori negativi di $\Delta C(t)$ sono giustificati dall'eccesso di produzione rispetto alla

¹⁴⁴ Le variazioni sono evidentemente le stesse a causa della proporzionale diminuzione, in entrambi i casi, di $PR(t)$ rispetto a $C(t)$ per la presenza di $U = 90\%$.

domanda; nel periodo di interesse, difatti, si verifica una diminuzione del *WIP* rispetto al caso di domanda costante e, conseguentemente, una proporzionale riduzione della capacità con inerzia dettata dallo *Scalability Delay Time*.

In questo caso più che negli altri, il comportamento dinamico mostrato dal sistema per l'adeguamento della capacità si rivela critico in termini di costi sostenuti a fronte dei benefici offerti dalla vendita del volume di prodotti costituenti la commessa. La mancata stabilizzazione della domanda sui nuovi livelli influisce soprattutto sulla dinamica della *Politica 3* e della *Politica 1*, comportando nel primo caso un repentino riposizionamento della capacità sui livelli iniziali e prolungando la fase di riassetto nel secondo (Figura 5.93).

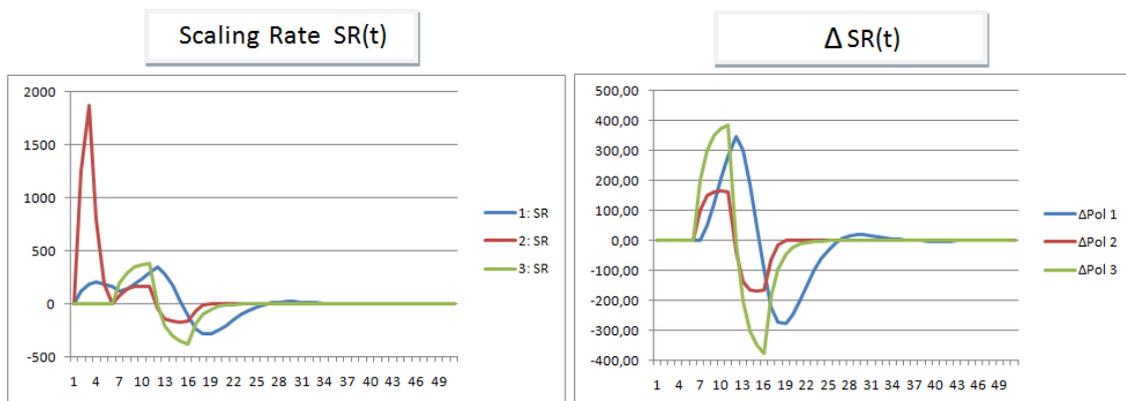


Figura 5.93 – Andamento della variabile di flusso Scaling Rate e variazione assoluta rispetto al caso di domanda costante

Il comportamento delle variabili $OB(t)$ e $ShR(t)$ si presta a considerazioni di particolare rilievo (Figura 5.94). Nello specifico, si osservi il comportamento dinamico del tasso di consegna in corrispondenza della *Politica 3*: il tasso cresce, presenta un picco negativo in corrispondenza della settimana 11 e, dopo un ulteriore ciclo di incremento e decremento, si stabilizza (settimana 24) su valori finali tipici dello scenario con domanda sempre costante nel tempo. Tale andamento è giustificato dal fatto che l'incremento della domanda è inizialmente soddisfatto dal sistema sfruttando le giacenze inventariali preesistenti, piuttosto che compensandolo con un adeguato incremento della capacità; in questa fase è $ShR(t) = DShR(t)$. In corrispondenza dell'undicesima settimana, la domanda è

sufficientemente elevata da consentire il soddisfacimento solo di una parte delle richieste, sicché $ShR(t) = MShR(t) = I(t)$.

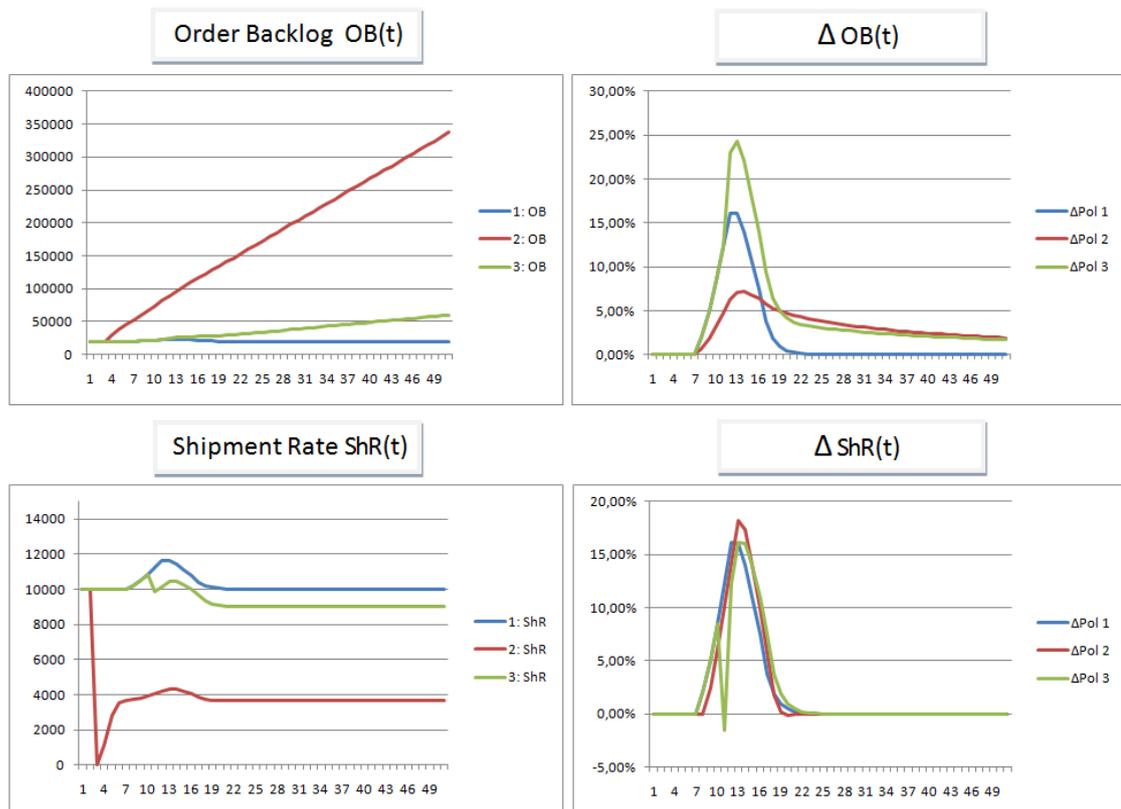


Figura 5.94 – Andamento della variabile di livello $OB(t)$ e del tasso di consegna al cliente $ShR(t)$ con relative variazioni percentuali rispetto al caso di domanda costante

Nella settimana successiva, il valore del tasso di produzione raggiunto dal sistema (10.451 pz/sett, +3,5% rispetto al periodo precedente), parallelamente alla decrescita della domanda (11.600 pz/sett, -3,3% rispetto al periodo precedente), consente al sistema di soddisfarne un'aliquota più consistente (da -17,9% a -12,9%). Infine, la diminuzione finale della variabile è coerente con la contrazione del mercato registrata. È con considerazioni analoghe che si spiega l'andamento di $\Delta ShR(t)$, dove l'estensione dell'oscillazione nel tempo è legata all'inerzia con cui il sistema si riadatta alle condizioni iniziali di mercato¹⁴⁵.

L'andamento nel tempo della variabile $OB(t)$ non si presta a interpretazione specifica se non accompagnato da quello relativo a $\Delta OB(t)$. Due sono in questo

¹⁴⁵ In questo caso il passaggio dalla condizione $ShR(t) = DShR(t)$ a quella $ShR(t) = MShR(t) = I(t)$ si verifica in corrispondenza della settimana 11, questa volta a causa del coefficiente di utilizzazione $U < 1$.

caso le considerazioni degne di interesse. In primo luogo, come c'era d'altra parte da aspettarsi, la politica più performante continua a dimostrarsi quella basata sul controllo del *WIP*, sia perché nel tempo si dimostra l'unica in grado di riassorbire completamente l'incremento nella coda generato dall'improvviso aumento della domanda¹⁴⁶, sia perché ne consente il recupero in tempi decisamente meno consistenti (-56% rispetto alla *Politica 2*, -50% rispetto alla *Politica 1*)¹⁴⁷. La seconda riguarda il valore di picco mostrato nell'andamento di $\Delta OB(t)$ dalla *Politica 3*: un incremento della domanda del 20% provoca un incremento delle dimensioni della coda di circa il 25% nella settimana 13 e di circa il 23% nelle settimane 12 e 14. L'inerzia con la quale il sistema si dota di capacità aggiuntiva, dunque, potrebbe rappresentare, insieme al valore assunto dal fattore *U*, il vero limite di una politica basata solo ed esclusivamente sull'inseguimento della domanda, viste le problematiche collegate alla rapida saturazione che potrebbero presentarsi in caso di limitazione del valore assunto dalla coda.

Per quel che concerne le giacenze di prodotto finito (Figura 5.95):

- la *Politica 1* è quella che ne fa registrare i valori più elevati ma, soprattutto, è quella che presenta differenze più consistenti con il caso di domanda costante, sia in termini di volumi (compresa fra -26,8% e +3,5%), che in termini di differenza esistente fra livello inventariale desiderato e livello inventariale attuale (compresa fra +120,7% e -12,2%). Tale comportamento è ancora una volta giustificabile se si prende in considerazione quanto detto a proposito del meccanismo di scalabilità, allorquando si è esaminato lo *Scenario II* (Figura 5.60). Per quanto anche in questo caso si registri il riallineamento del valore di *I* sui

¹⁴⁶ L'incremento di $OB(t)$ si assesta sull'1,9% per la *Politica 2*, sull'1,7% nel caso della *Politica 3*.

¹⁴⁷ I valori percentuali sono stati calcolati ritenendo recuperato il valore di $OB(t)$ rispetto al caso costante, non appena fosse risultato $\Delta OB(t) < 1\%$ nel caso della *Politica 3*. Nel caso delle altre due politiche, volendo tener conto dell'impossibilità di un recupero totale di ΔOB , il limite di riferimento è stato scelto in corrispondenza dei valori finali cui ΔOB tende.

livelli raggiunti nel caso di domanda costante, la perturbazione viene riassorbita in ben 21 settimane, il doppio rispetto alle altre due politiche;

- la *Politica 2* presenta problematiche assimilabili a quelle già analizzate negli scenari precedenti, sebbene consenta il mantenimento di livelli inventariali più bassi e una discrepanza fra valore desiderato e valore attuale che varia al massimo del 20% nel caso di presenza di picco. L'andamento di $\Delta I(t)$ è simmetricamente distribuito intorno al valore massimo registrato nella settimana 13 e si annulla in 10 settimane;
- la *Politica 3* ne favorisce andamento sufficientemente regolare, per quanto la discrepanza fra valore desiderato e valore attuale sia fino al 40% superiore rispetto al caso di domanda costante. Il volume di prodotti in giacenza varia secondo le considerazioni fatte relativamente all'andamento della variabile $ShR(t)$. Il $\Delta I(t)$ è praticamente concentrato nel passaggio dalla settimana 11 alla settimana 12 (+14%) mentre il riallineamento avviene con decremento regolare (circa 3% nel passaggio da un periodo al successivo). Infine, la politica garantisce il riassorbimento della perturbazione più rapido (9 settimane).

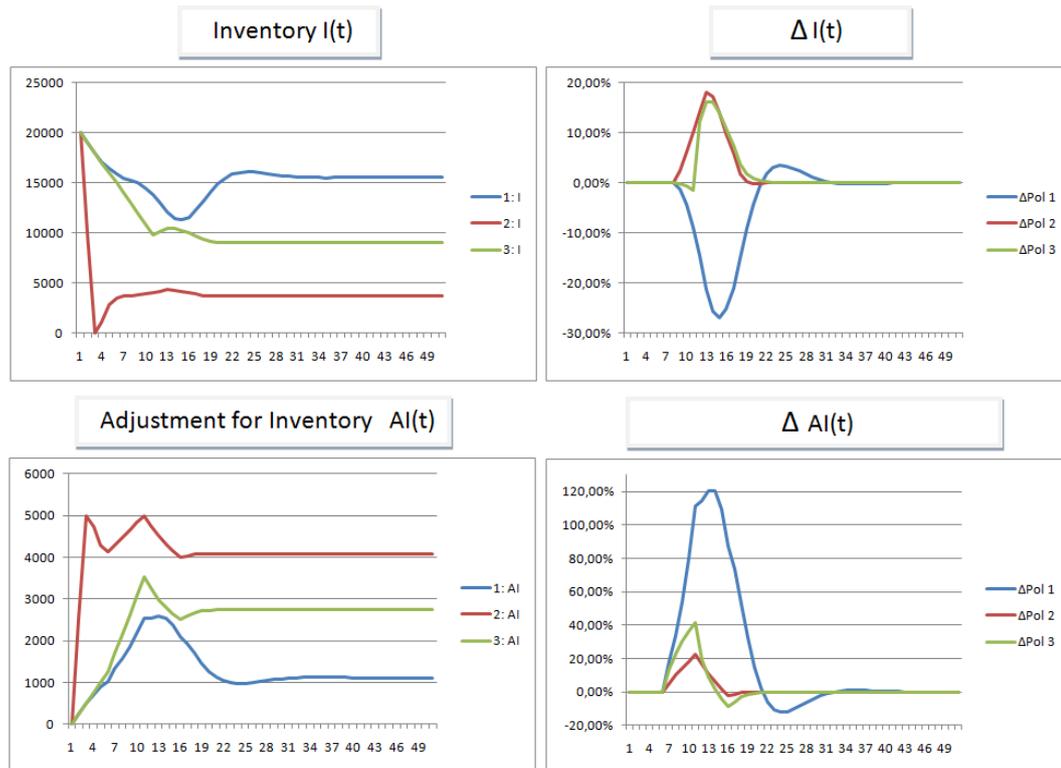


Figura 5.95 – Andamento della variabile di livello $I(t)$ e della variabile ausiliaria $AI(t)$ con relative variazioni percentuali rispetto al caso di domanda costante

Così come nel caso della variabile $OB(t)$, l'andamento del WIP circolante nel sistema non si presta a considerazioni di rilievo se non accompagnato da quello relativo a $\Delta WIP(t)$. Anche in questo caso, l'unica a consentire il riassorbimento della perturbazione è la *Politica 1*, per quanto questa presenti il valore di $\Delta WIP(t)$ più elevato e tempo di stabilizzazione della variabile più consistente che nel caso di $OB(t)$. Dal diagramma, ancora una volta, è possibile notare l'inerzia con la quale il sistema reagisce al picco di domanda, rispetto al quale il valor massimo del *work-in-process* è spostato in avanti di 3 settimane. La *Politica 3* presenta $\Delta WIP(t)$ variabile più rapidamente che nel caso della *Politica 2*, come d'altra parte era lecito attendersi a valle delle considerazioni circa il tasso di produzione, e valore di stabilizzazione superiore dell'1,1% rispetto al caso di domanda costante. La *Politica 2* presenta una stabilizzazione più graduale di $\Delta WIP(t)$ (-6% circa da un periodo all'altro, dopo il picco registrato nella settimana 15) e un

valore di stabilizzazione del *WIP* superiore dell'1,6% rispetto al caso con domanda costante.

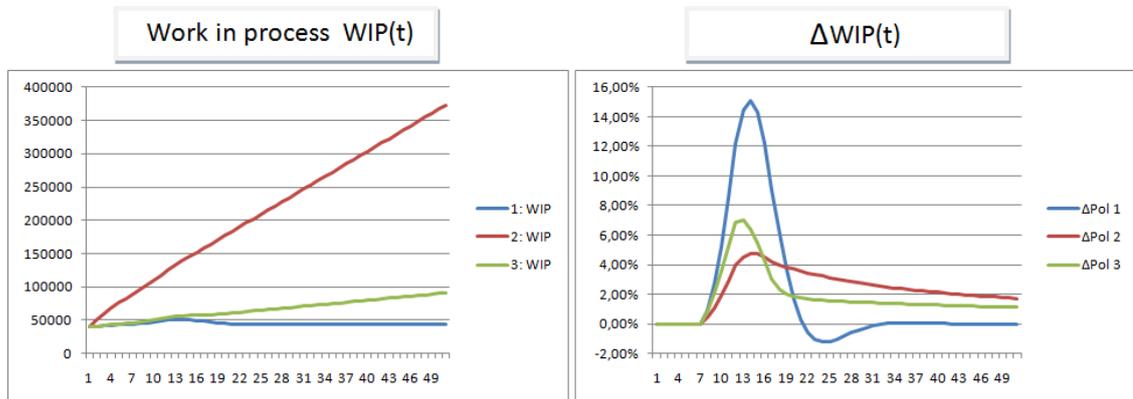


Figura 5.96 – Andamento del *WIP* circolante nel sistema e relativa variazione percentuale rispetto al caso di domanda costante

Alla luce di quanto detto e di quanto riportato in Tabella 5-25, nello scenario analizzato, l'unica politica ad aver consentito il riassorbimento della perturbazione indotta nella domanda, indipendentemente dalla variabile di interesse considerata, è risultata la *Politica 1*. L'unico vero punto di riflessione, relativamente all'adozione di tale politica, è legato all'incremento consistente del materiale circolante nel sistema a seguito del quale potrebbero verificarsi problemi in termini di organizzazione degli spazi interni all'impianto. A fronte di un incremento improvviso del 20% della domanda, le altre politiche hanno riportato un incremento del valore finale di $OB(t)$ minore del 2%. Tuttavia, perplessità consistenti riguardano il ricorso alla *Politica 3*, a causa del rapido incremento della dimensione della coda del sistema in determinati periodi dell'orizzonte temporale di riferimento (sempre superiore al 12% nell'intervallo di tempo compreso fra la settimana 11 e la settimana 16, con picco del 24,3% nella settimana 13) che, in caso di specifiche esigenze imposte dal cliente, potrebbe comportare l'impossibilità di processare parte degli ordini con decremento consistente del livello di servizio.

Tabella 5-25: Valore assunto dalle variabili di livello e confronto con lo scenario caratterizzato da domanda costante

Politica	Capacità							
	Max	Min	Δ Max	Sett	Δ Min	Sett	Δ Osc	
1	12695	10000	13,85%	16	-0,97%	27	126,53%	
2	4824	0	18,20%	12	-0,08%	19	17,28%	
3	11613	10000	16,13%	12	0,00%	-*	O (1613)**	
Politica	WIP							
	Max	Min	Δ Max	Sett	Δ Min	Sett	Δ Osc	
1	51347	40000	15,11%	14	-1,20%	24	134,54%	
2	373486	40000	4,72%	14	0,00%	-*	1,93%	
3	91000	40000	7,02%	13	0,00%	-*	2,00%	
Politica	Giacenze							
	Max	Min	Δ Max	Sett	Δ Min	Sett	Δ Osc	
1	20000	11299	3,47%	24	-26,89%	15	79,84%	
2	20000	0	18,20%	13	-0,08%	20	0,00%	
3	20000	9000	16,13%	13	-1,55%	11	0,00%	
Politica	Backlog							
	Max	Min	Δ Max	Sett	Δ Min	Sett	Δ Osc	
1	23225	20000	16,13%	12	0,00%	-*	O (3225)**	
2	337160	20000	7,16%	14	0,00%	-*	2,04%	
3	60000	20000	24,30%	13	0,00%	-*	2,56%	
Politica	Customer Satisfaction							
	O _p	O _s _p	LS _p	O _c	O _s _c	LS _c	Δ O _s	Δ LS
1	520000	520000	100,00%	510000	510000	100,00%	10000	0,00%
2	520000	196514	37,79%	510000	192840	37,81%	3673	-0,02%
3	520000	479000	92,12%	510000	470000	92,16%	9000	-0,04%

Legenda:

Max – Valore Massimo assunto dalla variabile nello scenario con picco.

Min – Valore Minimo assunto dalla variabile nello scenario con picco.

Δ Max – Incremento massimo della variabile rispetto allo scenario con domanda costante.

Δ Min – Decremento massimo della variabile rispetto allo scenario con domanda costante.

Δ Osc – Incremento dell'intervallo di oscillazione della variabile rispetto allo scenario con domanda costante.

Sett – Settimana in corrispondenza della quale si verifica l'incremento/decremento Massimo rispetto allo scenario con domanda costante.

O – Cumulativo ordini nell'orizzonte temporale di riferimento, nello scenario considerato.

O_s – Ordini soddisfatti nell'orizzonte temporale di riferimento, nello scenario considerato.

LS – Livello di servizio garantito al cliente nell'orizzonte temporale di riferimento, nello scenario considerato.

Δ *O_s* – Incremento del numero di ordini soddisfatti rispetto allo scenario con domanda costante

Δ *LS* – Discrepanza nel livello di servizio garantito al cliente rispetto allo scenario con domanda costante

* Non di interesse.

** Espressa in termini assoluti (*numero di pezzi*) poiché nello scenario con domanda costante il valore rimane costante nell'intervallo temporale di riferimento.

5.4 Conclusioni

La capacità di adattamento mostrata da un RMS in caso di perturbazioni del mercato, deriva da un insieme di attributi di tipo fisico e di tipo logico intorno ai quali il sistema viene progettato. Diversamente da quanto accade per un FMS, la struttura modulare di un RMS ne garantisce una più efficace regolabilità in termini di scalabilità fisica, consentendo l'abbattimento dei costi di mancato utilizzo che affliggono i sistemi flessibili di tipo tradizionale. In questo caso, tuttavia, a causa della marcata dinamicità del problema, diventa ancor più critico il legame esistente fra politiche per la scalabilità del sistema, parametri operativi di controllo, obiettivi e strategie di mercato adottate.

Grazie all'implementazione di un modello di *System Dynamics*, in questo capitolo è stato dimostrato che, indipendentemente dalle modalità con le quali evolve il mercato, incentrare una politica di scalabilità della capacità sul controllo delle giacenze inventariali determina, almeno nel caso di ambienti *make-to-order*, livelli di servizio al cliente che non superano il 40%. Tale risultato limite, per di più, è stato conseguito intervenendo incrementando in modo consistente la reattività che il sistema mostra nel percepire e colmare le variazioni inventariali. È stato inoltre verificato che tale tipo di politica non risente in modo significativo di variazioni del coefficiente di utilizzazione del sistema o dell'abbattimento del tempo che intercorre fra il momento in cui viene richiesto un aumento di capacità e l'istante in cui questo viene effettivamente reso disponibile.

Lo stesso modello ha consentito il confronto fra politiche volte al contenimento del *work-in-process* circolante nel sistema o più direttamente incentrate sul soddisfacimento delle richieste del mercato.

Sebbene il primo tipo di politica comporti uno sforzo economico più consistente nel regolare la capacità del sistema, si è dimostrata, indipendentemente dalle modalità con le quali evolve il mercato, in grado di soddisfare integralmente la domanda nell'orizzonte temporale di riferimento, oltre a consentire la stabilizzazione del livello inventariale. Nel caso in cui ci si

trovasse nell'eventualità di dover prendere in carico una singola commessa, tuttavia, a causa dell'eccesso di capacità cui conduce la politica, sarà necessaria una valutazione di convenienza economica più approfondita. Tale considerazione si estende al caso in cui la dimensione della coda degli ordini in attesa di essere processati dal sistema presenti dimensione finita; infatti, è stato dimostrato che, in concomitanza di particolari condizioni di mercato, l'inerzia con la quale il sistema si dotata di capacità aggiuntiva rispetto all'evoluzione della domanda, può determinare una diminuzione del livello di servizio più consistente che nel caso in cui si adotti una politica che dell'evoluzione della domanda fa il proprio punto di riferimento.

Le analisi di sensitività condotte hanno dimostrato, infine, che le performance offerte dal sistema produttivo sono influenzate da variazioni del coefficiente di utilizzazione del sistema o dell'abbattimento del tempo che intercorre fra il momento in cui viene richiesto un aumento di capacità e l'istante in cui questo viene effettivamente reso disponibile. Più nello specifico, mentre una variazione del primo concorre in modo determinante, nell'orizzonte temporale di riferimento, alla variazione dei valori medi del *backlog*, *work-in-process* e delle giacenze inventariali, una variazione del secondo ha influenza più consistente sui valori massimi da questi raggiunti. Esaminando i risultati ottenuti, sono state individuate delle aree per le quali ulteriori investimenti per il miglioramento delle caratteristiche del sistema potrebbero essere non convenienti alla luce delle variazioni negli indicatori di performance adoperati.

5.5 Bibliografia

- Ahmed S., King A.J., Parija G., *A Multi-Stage Stochastic Integer Programming Approach for Capacity Expansion under Uncertainty*. Journal of Global Optimization, Vol. 26 (1), 2003, pp. 3-24.
- Anderson E.G., Lundeen G., Morrice D.J., *The physics of capacity and backlog management in service and custom manufacturing supply chains*. System Dynamics Review, Vol. 21 (3), 2005, pp. 217 - 247.

- Arrow K.G., Harris T., *Optimal Inventory Policy*. *Econometrica*, Vol. 19 (3), 1951, pp. 250-272.
- Asl F.M., Ulsoy A.G., *Capacity management in reconfigurable manufacturing systems with stochastic market demand*. Proceedings of the 2002 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition. New Orleans, Louisiana, U.S.A., 2002.
- Asl F.M., Ulsoy A.G., *Capacity Management via Feedback Control in Reconfigurable Manufacturing Systems*. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 52 (1), 2003, pp. 371-374.
- Baillie R.T., *Long memory processes and fractional integration in econometrics*. *Journal of Econometrics*, Vol. 73 (1), 1996, pp. 5-59.
- Bean J.C., Hagle J.L., Smith R.L., *Capacity Expansion under Stochastic Demands*. *Operations Research*, Vol. 40 (2), 1992, pp. 210-216.
- Bertsimas D., Nakazato D., *The Distributional Little's Law and Its Applications*. *Operations Research*, Vol. 43 (2), 1995, pp. 298-310.
- Bianchi C., *Modelli di System Dynamics per il miglioramento della performance aziendale*. Ipsoa, Milano, 2009.
- Breithaupt J.W., Wiendahl H.P., *Automatic production control applying control theory*. *International Journal of Production Economics*, Vol. 63 (15), 2000, pp. 33-46.
- Breithaupt J.W., Wiendahl H.P., *Modelling and controlling the dynamics of production systems*, *Production Planning and Control*, Vol. 10 (4), pp. 389-401.
- Cakanyildirim M., Roundy R.O., Wood S.C., *Machine purchasing strategies under demand and technology-driven uncertainties*. Technical report 1250, SORIE - Cornell University, New York, U.S.A., 1999.
- Chen Z.L., Li S., Tirupati D., *A scenario-based stochastic programming approach for technology and capacity planning*. *Computers & Operations Research*, Vol. 29 (7), 2002, pp. 781-806.
- Coyle R.G., *System Dynamics Modelling: a practical approach*. Chapman & Hall, Londra, U.K., 1996.
- Deif A., ElMaraghy H.A., *A control approach to explore capacity scalability scheduling in reconfigurable manufacturing systems*. *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 25 (1), 2006, pp. 12-24.
- Deif A., ElMaraghy H.A., *Capacity scalability in reconfigurable manufacturing systems*. Proceedings of the 3rd CIRP Conference on Reconfigurable Manufacturing Systems. Ann Arbor, Michigan, U.S.A., 2005.
- Deif A., ElMaraghy H.A., *Investigating optimal capacity scalability scheduling in a reconfigurable manufacturing system*. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 32 (5-6), 2007, pp. 557-562.

- Deif A., ElMaraghy H.A., *Integrating static and dynamic analysis in studying capacity scalability in RMS*. International Journal of Manufacturing Research, Vol. 2 (4), 2007, pp. 414 - 427.
- Deif A., ElMaraghy H.A., *Dinamic Capacity Planning and Modelling Its Complexity*. In ElMaraghy H.A., *Changeable and Reconfigurable Manufacturing Systems*. Springer-Verlag, Londra, U.K., 2009, pp. 227-246.
- Duffie N., Falu I., *Control-Theoretic Analysis of a Closed-Loop PPC System*. CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 51 (1), 2002, pp. 379-382.
- ElMaraghy H.A., Deif A.M., *Assessing capacity scalability policies in RMS using system dynamics*. International Journal of Flexible Manufacturing Systems, Vol. 10 (3), 2007, pp. 128-150.
- Escudero L.F., Kamesam P.V., King A.J., *Production planning via scenario modelling*. Annals of Operations Research, Vol. 43 (6), 1993, pp. 309-335.
- Evans G., Naim M., *The dynamics of capacity constrained supply chains*. Proceedings of the 12th International Conference of the System Dynamics Society. Stirling, Scozia, 1994.
- Forrester J.W., *Industrial dynamics*. The MIT Press, Cambridge, Massachusset, U.S.A., 1961.
- Forrester J.W., *System Dynamics and K-12 Teachers*. Lettura presso la University of Virginia, School of Education, Cambridge, U.S.A., 30 Maggio 1996.
- Freidenfelds J., *Capacity Expansion when Demand is a Birth-Death Random Process*. Operations Research, Vol. 38 (3), 1980, pp. 712-721.
- Freidenfelds J., *Capacity Expansion: Analysis of Simple Models with Applications*. Elsevier North-Holland, New York, U.S.A., 1981.
- Goncalves P., Hines J., Sterman J., *The impact of endogenous demand on push-pull production*. System Dynamics Review, Vol. 22 (3), 2005, pp. 217-247.
- Gontis V., Kaulakys B., *Modeling long-range memory trading activity by stochastic differential equations*. Physica: Statistical Mechanics and its Applications, Vol 328 (1), 2007, pp. 114-120.
- Granger C.W., Ding Z., *Varieties of long memory models*. Journal of Econometrics, Vol. 73 (1), 1996, pp. 61-77.
- Halo P.T., *Dynamic modeling of surge effect and capacity limitation in supply chains*. International Journal of Production Research, Vol. 38 (17), 2000, pp. 4521-4533.
- Kim J.H., Duffie N., *Backlog control design for a closed loop PPC system*. CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 53 (1), 2004, pp. 357-360.
- Kim J.H., Duffie N., *Design and Analysis of Closed-Loop Capacity Control for a Multi-Workstation Production System*. CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 54 (1), 2005, pp. 455-458.

- Koren Y., Heisen U., Jovane F., *Reconfigurable Manufacturing Systems*. Annals of the CIRP, Vol. 48 (2), 1999, pp. 527-540.
- Koren Y., Heisen U., Jovane F., *General RMS Characteristics. Comparison with Dedicated and Flexible Systems*. In Dashchenko A.I., *Reconfigurable Manufacturing Systems and Transformable Factories*. Springer, 2006, pp. 27-45.
- Leachman R.C., Carmon T.F., *On capacity modeling for production planning with alternative machine types*. IIE transactions, Vol. 24 (4), 1992, pp. 62-72.
- Liberopoulos G., *Production capacity modeling of alternative non-identical, flexible machines*. International Journal of Flexible Manufacturing Systems, Vol. 14, 2002, pp. 345-359.
- Luss H., *Operations Research and Capacity Expansion Problems: A Survey*. Operations Research, Vol. 30 (5), 1982, pp. 907-947.
- Manne A.S., *Capacity expansion and probabilistic growth*. Econometrica, Vol. 29 (4), 1961, pp. 632-649.
- Manne A.S., *Investments for capacity expansion, size, location, and time-phasing*. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, U.S.A., 1967.
- Nyhuis P., Wiendahl H.P., *Logistic Production Operating Curves – Basic Model of the Theory of Logistic Operating Curves*. CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 55 (1), 2006, pp. 441-444.
- Roundy R., Zhang F., Cakanyildirim M., *Optimal capacity expansion for multi-product, multi-machine manufacturing systems with stochastic demand*. Technical report 1271, SORIE - Cornell University, New York, U.S.A., 2000.
- Sethi S.P., Thompson G.L., *Optimal control theory: applications to management science and economics*. Boston, Massachusetts, U.S.A., Springer, 2000.
- Son S.Y., Olsen T.L., Yip-Hoi D., *An approach to scalability and line balancing for reconfigurable manufacturing systems*. Integrated Manufacturing Systems, Vol. 12 (7), 2001, pp. 500-511.
- Stermann J.D., *Business dynamics: systems thinking and modeling for a complex world*. McGraw-Hill, New York, 2000.
- Volino P., Magnenat-Thalmann N., *Comparing Efficiency of Integration Methods for Cloth Simulation*. Proceedings of Computer Graphics International Conference 2001 (CGI '01), Hong-Kong, Cina, 2001.

CONCLUSIONI

Alla luce della progressiva globalizzazione dei mercati, in cui le aspettative di profitto si spostano da contesti di produzione di massa a quelli di produzioni di nicchia, dove il progresso tecnologico decurta drammaticamente la vita commerciale del prodotto e l'utenza finale è caratterizzata da accresciuta competenza e coscienza ambientale, è divenuto determinante, per salvaguardare la propria posizione competitiva, la capacità di distribuire e ridistribuire, in modo rapido ed efficiente, le risorse a disposizione, prefigurandosi la necessità di un adattamento dinamico della produzione industriale.

Diversamente da quanto accade per un sistema di produzione tradizionale, le caratteristiche intorno alle quali è progettato un Sistema di Produzione Riconfigurabile garantiscono il contenimento dell'investimento iniziale, l'abbattimento dei tempi di start-up del progetto, la riadoperabilità delle strutture e dei macchinari, un'accresciuta adattabilità in termini di capacità produttiva e funzionalità, una consistente diminuzione dei costi di mancato utilizzo delle risorse disponibili e la possibilità di sfruttare proficuamente le opportunità offerte da brevi parentesi di mercato.

Progettare un sistema di produzione intorno alle esigenze del cliente, tuttavia, rende ancor più critico il legame esistente fra evoluzione del sistema e quella delle caratteristiche del mercato. Sono queste ultime, infatti, a prefigurare gli specifici scenari progettuali sulla base dei quali il management effettuerà le proprie scelte strategiche, influenzando profondamente la capacità mostrata dal sistema nel generare profitto e rendendo, di fatto, un Sistema di Produzione Riconfigurabile un'alternativa economicamente conveniente rispetto ad un sistema di produzione tradizionale.

Indipendentemente dalle problematiche di tipo tecnico e tecnologico, il vero ostacolo all'implementazione di sistemi di questo genere si rivela la necessità di una diffusione capillare della conoscenza nel tessuto aziendale, giacché la dinamicità delle problematiche trattate non consente il ricorso a tecniche di progettazione, pianificazione e controllo di tipo tradizionale. Al contrario, si determinano contesti in cui particolarmente fruttuoso può essere il contributo offerto dai risultati ottenuti in settori scientifici apparentemente lontani dall'ambiente industriale e dal sistematico ricorso alle tecniche di simulazione per la gestione dell'azienda. Queste consentono di esplorare più approfonditamente il ventaglio dei possibili scenari di mercato da affrontare e, rendendo evidenti gli effetti dei possibili interventi sui parametri di controllo, forniscono informazioni più precise su come e quando intervenire nella regolazione del sistema.