



Economia Aziendale Online

Economia Aziendale Online

Business and Management Sciences
International Quarterly Review

Sistemi di Controllo Integrato di Produzione e
Stock. Dal MRP al OPT; dal JIT ai FMS; e Oltre

Piero Mella

Pavia, Dicembre 2020
Volume 11 - N. 4/2020

www.ea2000.it
www.economiaaziendale.it



PaviaUniversityPress

Electronic ISSN 2038-5498
Reg. Trib. Pavia n. 685/2007 R.S.P.

Sistemi di Controllo Integrato di Produzione e Stock. Dal MRP al OPT; dal JIT ai FMS; e Oltre

Piero Mella

Full Professor
Department of Economics and
Management. University of Pavia,
Italy

Corresponding Author:

Piero Mella
University of Pavia, Via S. Felice 5,
27100 Pavia, Italy
Email: piero.mella@unipv.it

Cite as:

Mella, P. (2020). Sistemi di Controllo Integrato di Produzione e Stock. Dal MRP al OPT; dal JIT ai FMS; e Oltre. *Economia Aziendale Online*, 11(4), 435-473.

Section: Refereed

Received: November 2020
Published: 31-12-2020

ABSTRACT

Il controllo dei processi produttivi e degli stock rientra tra le forme tipiche del *controllo manageriale* orientato ai processi della trasformazione produttiva ed economica descritti dal modello di impresa come sistema di cinque trasformatori. Per il controllo della produzione e del magazzino sono stati elaborati numerosi modelli di calcolo; alcuni, semplici, ipotizzano la conoscenza dei volumi di domanda dei beni stoccati; altri, più sofisticati, suppongono di conoscere tale domanda solo in termini di distribuzione di probabilità. Tuttavia, i controlli della produzione, del magazzino e dei processi produttivi devono essere attuati congiuntamente in quanto da un lato il controllo della produzione determina il tipo e il livello degli stocks mentre, dall'altro, le forme di controllo degli stock influenzano i ritmi di produzione. Oggi le imprese possono contare su numerosi strumenti di controllo della produzione e del magazzino che si avvalgono ampiamente degli strumenti informatici che offrono un controllo integrale della produzione e del magazzino aumentando notevolmente l'efficienza dei processi. Sono state elaborate diverse tecniche di controllo "globale" del magazzino e della produzione – tra cui MRP1, MRP2, OPT, FMS e HMS, CIM e JIT – la cui logica viene presentata in questo studio. Data l'ampiezza dei temi affrontati non potrò approfondire gli aspetti tecnici dei diversi argomenti; ritengo, comunque, utile una loro presentazione, per quanto sintetica.

The control of production processes and stocks is one of the typical forms of *managerial control* oriented to the processes of productive and economic transformation described as a *system of five transformers*. Numerous calculation models have been developed to control production and inventory; some, simple, hypothesize the knowledge of the volumes of demand of the stored goods; others, more sophisticated, assume that they know this question only in terms of probability distribution. However, the controls of production, stocks and production processes must be implemented jointly since on the one hand the control of production determines the type and level of stocks while, on the other, the forms of control of stocks influence the rhythms of production. Today, companies can count on numerous production and warehouse control tools that make extensive use of information technology, IT, tools that offer integrated control of production and warehouse, significantly increasing the efficiency of processes. Several "global" control techniques of warehouse and production have been developed – including MRP1, MRP2, OPT, FMS and HMS, CIM and JIT – whose logic is presented in this study. Given the breadth of the topics addressed, I will not be able to deepen the technical aspects of the various topics; I believe, however, a presentation of them useful, albeit brief.

Keywords: Controllo degli stock; funzione congiungente e disgiungente delle scorte; metodo ABC; controllo integrato della produzione; programmazione della produzione; logica “pull”; logica “push”; MRP1; MRP2; JIT; OPT; FMS; HMS, CIM

1 – Politica delle scorte e della produzione. La funzione congiungente (accoppiamento) e disgiungente (disaccoppiamento) delle scorte

Il *micro-controllo* di gestione, o *controllo operativo*, riguarda le diverse *funzioni* (approvvigionamento, produzione, vendita, logistica, personale, finanza, ecc.) e le diverse *unità operative* (stabilimenti, divisioni, reparti, singoli impianti e/o lavoratori, ecc.) e agisce attivando leve operative di diversi livelli (Mella, 2018a). Tra i molteplici Sistemi di Controllo operativo che agiscono nell’ambito del *micro-controllo* di gestione delle trasformazioni “tecnico-strumentali” e, in particolare, della trasformazione *produttiva* e della *economica* (Mella, 2005, 2014a) – qualità, produttività, progetti, costi e prezzi – ritengo che uno sia particolarmente rilevante, per favorire l’efficienza produttiva e l’economicità aziendale: il controllo degli stock, della produzione.

Nelle imprese manifatturiere, gli stock, da un punto di vista *tecnico*, rappresentano *volumi* di materie (principali e accessorie), di semilavorati e componenti o di prodotti finiti – oppure di merci e di imballaggi nelle imprese mercantili – denominati *average stable stock level*, conservati nel *magazzino* per un dato periodo, da non confondersi con le giacenze di fine anno che rappresentano una situazione puntuale. Da un punto di vista *economico*, esse rappresentano *investimenti* monetari aventi una rotazione più o meno elevata, a seconda del tipo di bene in scorta. Controllare la dimensione degli stock, siano essi di materie o di prodotti finiti, significa decidere (a) le quantità ottimali da detenere in magazzino, (b) le quantità (lotti) di rifornimento (acquisti o produzioni), (c) i tempi di rifornimento (ordini ai fornitori o alla produzione). Controllare gli stock – sia nelle imprese mercantili, sia in quelle industriali – consente di ridurre il *capitale investito* nelle scorte, con la conseguenza di innalzare il ROI (Return on Invested Capital), a parità di risultato operativo, e di ridurre il costo del capitale, se il magazzino, come normalmente accade, risulta finanziato con capitale di prestito.

Tra i vari tipi di stock, i più rilevanti, da monitorare e da controllare, sono i *functional stocks* che non sono semplici giacenze istantanee, o il risultato di acquisti nel tentativo di speculazioni sui prezzi (speculative buying stocks) ma il risultato di un processo di stoccaggio ben controllato, che si fonda su accurati calcoli di convenienza, per tentare di ridurre sia gli svantaggi connessi alle *asincronie* dei ritmi aziendali (*utilizzo* e *produzione*) rispetto a quelli dei mercati (*acquisti* e *vendite*) sia i *rischi* di arresto dei processi (*minimum security stocks*) (Mella, 1997). Mi riferirò nel seguito principalmente ai *functional stocks*, che nelle imprese industriali adempiono contemporaneamente ad una funzione *congiungente* e a una *disgiungente*, per garantire l’*elasticità* dei processi di approvvigionamento, di produzione e di vendita.

Adempiono ad una *funzione congiungente* – o di *anticipazione* – in quanto colmano i divari temporali esistenti tra il processo degli approvvigionamenti, quello della produzione e quello delle vendite. Di conseguenza i fabbisogni della produzione e delle vendite possono essere soddisfatti indipendentemente dai ritmi di produzione e di acquisizione delle materie prime e dai ritmi del mercato di vendita. Al tempo stesso, le scorte adempiono ad una *funzione disgiungente* – o di *disaccoppiamento*; le scorte di materie prime - rendono il processo produttivo in parte indipendente da quello degli approvvigionamenti; quelle di prodotti - svincolano il processo di produzione da quello delle vendite (Fornaciari & Galassi, 2012). Le due funzioni non possono essere considerate separatamente: le scorte adempiono ad una funzione *disgiungente* proprio in quanto ne assolvono una *congiungente* e consentono di eliminare le *asincronie* tra processi di acquisto, produzione e vendita *rendendo stabili i ritmi dei processi produttivi*; tale stabilità favorisce sia il raggiungimento ed il mantenimento di migliori livelli di qualità delle produzioni (Eroglu & Ozdemir, 2006) sia un innalzamento della produttività

facilitando l'applicazione delle tecniche di controllo che saranno esaminate nei paragrafi seguenti. L'obiettivo dell'indipendenza tra ritmi di *produzione* e ritmi di *vendita* è importante in quanto un ritmo di produzione relativamente uniforme si riflette sulla politica degli approvvigionamenti dell'impresa, la quale è in grado di programmare i propri acquisti con regolarità senza necessariamente "subire" i prezzi dei fornitori. La stabilità degli approvvigionamenti di una impresa *a valle* influisce positivamente sulla stabilità delle produzioni dei fornitori *a monte* con una progressiva razionalizzazione che si estende a tutte le imprese che fanno parte della *supply chain* (Mentzer, 2001; Gardner, 2018).

È importante infine osservare che la politica dell'ottimizzazione del magazzino presuppone che le *scorte funzionali* siano considerate *fisiologiche*; non costituiscono una *ridondanza* o un errore di programmazione della produzione ma una necessità operativa, proprio per la loro funzione disgiungente e congiungente; è, pertanto, necessario renderne ottimo il flusso e il livello nel tempo. Questa concezione è tipica nelle imprese *occidentali* nate dalla prima rivoluzione industriale, rigidamente *strutturate* per ottenere ritmi produttivi uniformi, operanti in una economia *non satura*, non sufficientemente informatizzata, con un sistema logistico non avanzato (Chiarini, 2010), Ad essa si affianca (e forse si contrappone) la visione delle imprese *giapponesi* (ormai diffusa, però, in tutto il mondo produttivo) – che si sono scontrate con i problemi industriali dell'economia *satura* – secondo la quale le scorte rappresentano la conseguenza della *rigidità* della produzione e possono – anzi, devono – essere evitate; occorre eliminarle impostando una politica di *flexible manufacturing*, tendente a produrre con *scorte zero* (Browne et al., 1984; Raouf and Ben-Daya, 1995).

2 – Dinamica delle scorte e politica degli impianti

Quando le scorte sono *funzionali*, e svolgono, quindi, una funzione congiungente e disgiungente, appare chiaro che il controllo delle scorte, quando considerate "fisiologiche", è comunque interrelato alla dimensione e ai ritmi di utilizzo degli impianti; la dinamica delle scorte dipende, pertanto, anche dalla *politica degli impianti* (Del Favero, 2010) che definisce la scelta tra gli obiettivi di *produzione regolare*, oppure di *produzione flessibile*, quando l'impresa ha una domanda soggetta a forti oscillazioni più o meno ricorrenti nel tempo. Ci sono due soluzioni estreme, tra le quali ricercare quella operativamente più conveniente (Figura 1):

1. gli impianti vengono dimensionati alla *domanda media*, con produzione costante e formazione di scorte nei periodi di basse vendite (fig. 1(a)); la capacità produttiva degli impianti viene utilizzata al massimo livello e con regolarità; per contro, l'impresa si trova ad avere, a periodi alterni, disponibilità di scorte, con il relativo costo di stoccaggio (Song & Zipkin, 1993;

2. gli impianti vengono dimensionati alla *domanda massima*, con produzione variabile, senza formazione di scorte (fig. 1(b)); gli impianti installati devono avere una capacità produttiva pari ai livelli massimi di domanda, quindi un costo di acquisto e di manutenzione più elevato; potranno, però, essere utilizzati secondo ritmi variabili e questo rappresenta l'aspetto positivo di assenza di scorte e di costi di stoccaggio.

È immediato rendersi conto che vi sono situazioni particolari, nelle quali la politica degli impianti deve necessariamente essere subordinata alla dimensione massima della domanda, come accade, ad esempio:

- 1 – nel caso di imprese che ottengono prodotti aventi conservabilità fisica limitata nel tempo (sono deperibili);

- 2 – quando i prodotti, anche se conservabili fisicamente, non mantengono il loro valore nel tempo, poiché la loro domanda è fortemente influenzata dai *cambiamenti nella moda* e nelle *preferenze dei consumatori*, con un conseguente rischio di rapida obsolescenza delle scorte;

3 – nel caso di imprese i cui prodotti sono servizi – spesso di pubblica utilità – che non possono essere stoccati e non possono non essere distribuiti;

4 – le imprese che, trasformando materie prime con disponibilità stagionale e non conservabili a lungo (imprese agricole in generale, zuccherifici, imprese conserviere della frutta ecc.) devono dimensionare la capacità produttiva degli impianti ed i ritmi di utilizzo non tanto dalla *domanda del prodotto* finito quanto dalla *disponibilità delle materie*.

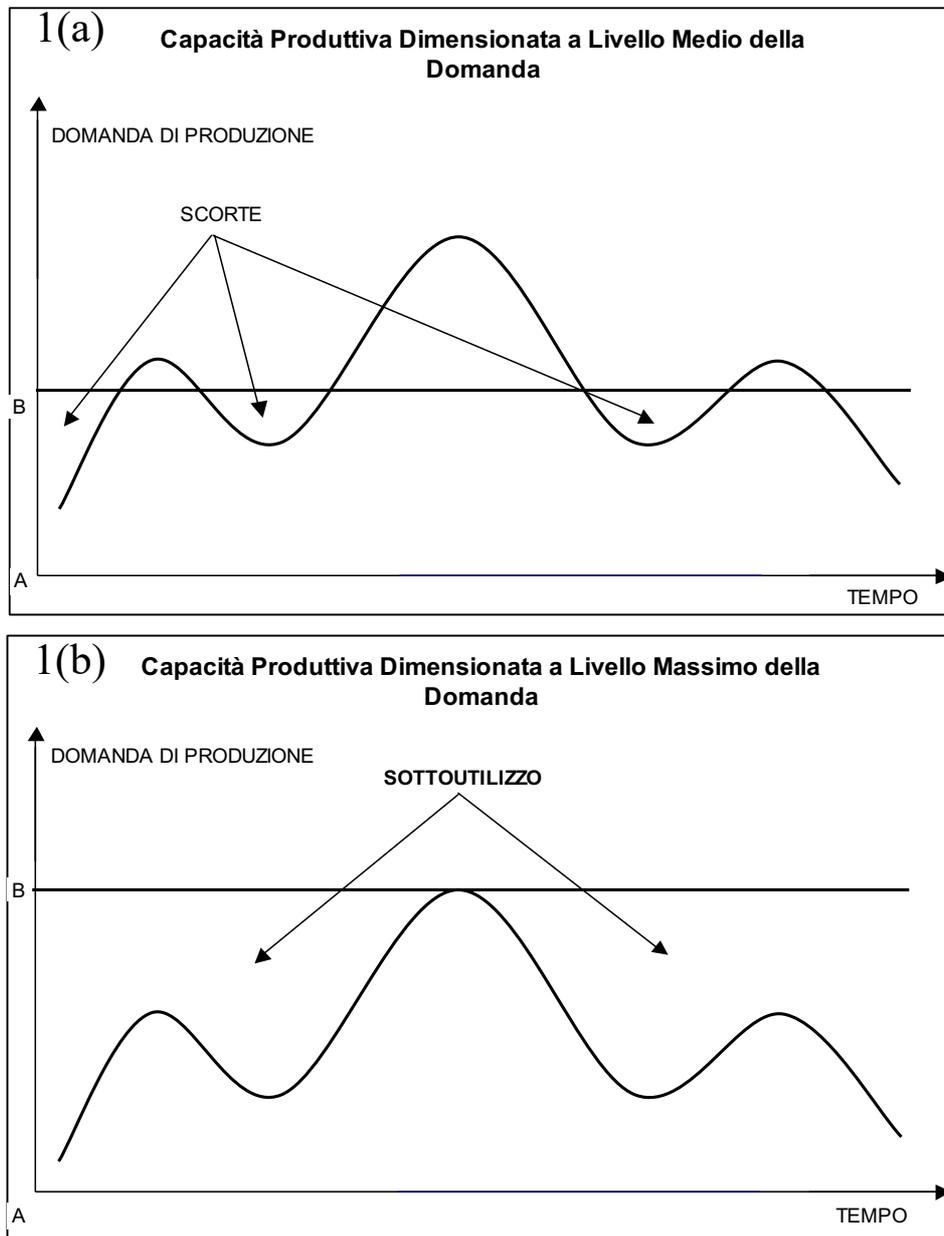


Fig. 1 – Politica delle produzioni e delle scorte in funzione della dinamica della domanda (fonte: Mella, 2014b, p. 325)

3 – Il metodo ABC e il calcolo del lotto ottimale di rifornimento in scorta (cenni)

Il controllo operativo del magazzino si fonda su un particolare calcolo economico-tecnico (Mella, 2014b) che si pone, principalmente, l'obiettivo di determinare:

- a) le quantità ottimali da detenere in magazzino,

- b) le quantità di rifornimento,
- c) i tempi di ordinazione,

per conseguire l'obiettivo superordinato, posto dalla trasformazione economica di minimizzare il costo di stoccaggio, e/o l'ammontare del capitale investito in scorte (Tersine, 1988). I tre controlli precedenti vengono definiti, nel complesso, *controllo economico-tecnico* del magazzino che ha come obiettivo l'ottimizzazione del magazzino (Swamidass, 2000; Durlinger & Paul 2012; Azzi et al, 2014). Esso rappresenta una tra le più utili forme di *operational control*, sia nelle imprese mercantili, sia in quelle industriali, proprio in quanto, come abbiamo visto, consente di ridurre il capitale investito e di innalzare il ROI, a parità di risultato operativo (Mella, Navaroni 2012). Da un punto di vista *tecnico*, tenere sotto controllo le scorte significa ridurre al minimo il costo delle giacenze, mantenendo un equilibrio tra gli investimenti richiesti ed i rischi connessi alla mancanza di scorte.

Il controllo del magazzino dovrebbe rivolgersi a tutti gli articoli (*items/codes*) in stock: materie, componenti, prodotti finiti e semilavorati, merci, imballaggi, materiali di consumo, utensili e attrezzature. Nelle imprese che hanno molti *item* in magazzino (ipermercati, venditori di componenti, etc.), un controllo che si estendesse a tutti gli articoli potrebbe diventare problematico: il costo per attuarlo sarebbe eccessivo rispetto ai vantaggi in termini di risparmi di costi; solitamente, pertanto, il controllo si rivolge solo agli *items/codes* il cui valore rappresenta la più consistente parte dell'intero valore del magazzino. Per individuare gli *item* su cui effettuare il controllo si può procedere con la semplice "tecnica ABC", o metodo 80/20 (Juran, 2019), che fa riferimento al principio di Lorenz-Pareto, tecnica che evidenzia il grado di *concentrazione del magazzino* (Farné, 2010; Ackerman, 2015). Il metodo appare concettualmente semplice in quanto richiede che per ciascun articolo stoccato sia valorizzato il *consumo annuo* e che siano elencati poi tutti i codici in ordine di valore annuo decrescente. Analizzando la *composizione media* dei beni movimentati nell'anno si rileva in genere che un numero molto limitato di item, circa il 10-30%, determina un'elevata percentuale del valore complessivo annuo dei beni movimentati, pari a circa il 75-80%, formanti la Classe A; il successivo 10-15% degli item, formanti la Classe B, ha un valore complessivo di circa il 10-15% valore dei movimenti annui, mentre ai rimanenti item, rientranti nella Classe C, pari al 40-50% corrisponde un valore pari al 5-10% del valore complessivo movimentato (Mella 1997, Sect. 19.7). La politica di stoccaggio dovrebbe concentrare particolare attenzione agli articoli delle Classi A e B, aventi un valore complessivo elevato, le cui scorte possono richiedere elevati investimenti nel magazzino.

Appare immediato considerare che il valore delle scorte di un dato *articolo* dipenda dal "numero di riordini" per coprirne il fabbisogno complessivo annuo. Le scorte si ridurrebbero drasticamente se i riordini fossero frequenti e per ridotti volumi. La contrazione del numero dei riordini finirebbe, al contrario, per aumentare il valore medio delle scorte. Ogni processo di ordinazione presenta, tuttavia, costi fissi, inevitabili. Quanto più aumenta il numero di riordini, pur abbassandosi l'investimento in scorte, riducendosi i costi dell'investimento medio, tanto più si incrementa la somma dei costi fissi di riordino.

Il *problema fondamentale del controllo delle scorte* può essere, pertanto, espresso come segue: per ogni articolo significativo (secondo il metodo ABC prescelto) determinare il *livello ottimale di riordino* (EOQ, Economic Order Quantity), *funzionalmente necessario*, che riduca al minimo i costi del mantenimento in stock, garantendo un livello di stoccaggio compatibile con la funzione congiungente e disgiungente del magazzino. In particolare:

a. per determinare i livelli delle scorte di *materie prime* occorre *ridurre al minimo il rischio* che la mancanza di scorte produca si abbiano ritardi nei processi produttivi programmati, con conseguente aumento dei tempi di inattività delle macchine e del lavoro;

b. le scorte di *prodotti finiti* devono essere dimensionate in quantità sufficiente *per evitare il rischio* che la mancanza di scorte provochi ritardi nell'evasione delle ordinazioni con eventuale perdita di clienti a tutto vantaggio delle imprese concorrenti.

Tenuti presenti gli obiettivi di cui sopra, il livello ottimale di scorta dipende da quattro fattori, riferiti specificatamente alle imprese manifatturiere di beni:

1) il *fabbisogno* di materie o prodotti durante il tempo di approvvigionamento o, il che è lo stesso, la *curva di deflusso* delle materie prime o dei prodotti finiti dal magazzino;

2) il *tempo di approvvigionamento* – o *lead time* – cioè l'intervallo intercorrente tra l'emissione di un ordine di acquisto (materie prime) o di produzione (prodotti finiti) ed il momento in cui è disponibile quanto ordinato;

3) il costo di *conservazione/mantenimento* in scorta (storage cost, SC), tipicamente variabile con i volumi stoccati;

4) il costo di *approvvigionamento* delle scorte (acquisition cost, AC), tipicamente fisso per ogni lotto indipendentemente dalla dimensione di questo.

Sulla base di queste semplici ipotesi, possiamo costruire la Figura 2, nella quale sono evidenziate le curve degli andamenti di SC e AC; la somma dei segmenti crescenti e decrescenti di queste curve rappresenta l'andamento del costo unitario totale al variare della dimensione del lotto economico, Q, posto in ascissa; dalla figura si nota che il *costo totale minimo* per la *quantità ottimale di riordino* "Q = EOQ" corrisponde al livello nel quale l'incidenza dei costi di *acquisizione* è uguale al costo unitario di *stoccaggio*. Pertanto, EOQ rappresenta la quantità da ordinare che riduce al minimo il *costo complessivo di stoccaggio*. Si può osservare che il costo totale in prossimità di ("intorno" a) EOQ diminuisce e aumenta leggermente, in modo che piccoli errori nella determinazione dell'EOQ comportino variazioni accettabili nel costo totale del lotto.

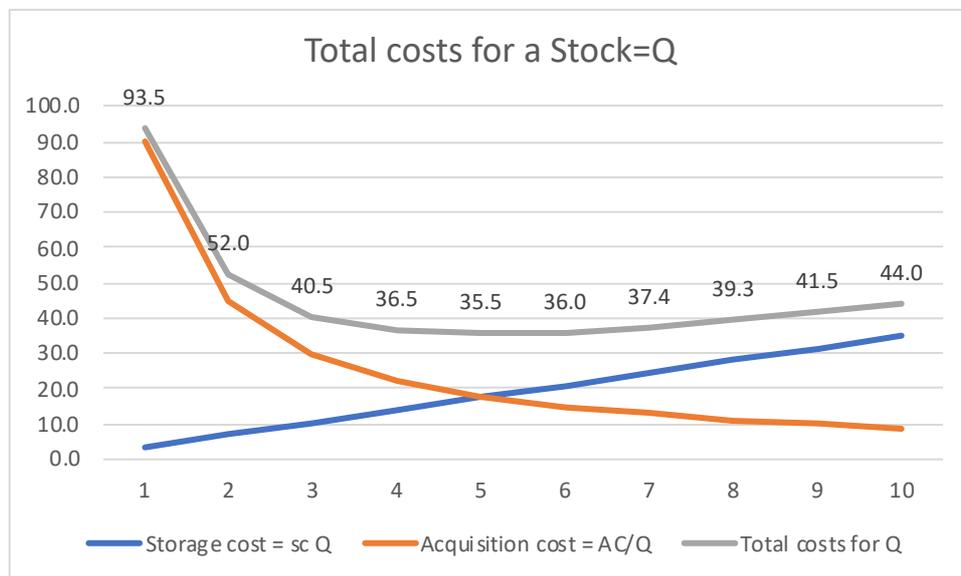


Fig. 2 – Total storage costs (legenda: sc = costo unitario di mantenimento in scorta) (fonte: Mella, 1997)

Esiste un'ampia letteratura sul calcolo dell'EOQ (Whitin 1954; Veinott 1966; Clark 1972; Nahmias 1982; Silver 1981; Silver & al.1998; Wagner 1980) e in essa sono stati elaborati numerosi modelli per determinare l'EOQ in differenti circostanze (Chu et al., 1998; De Toni & al. 1988, Goswami & Chaudhuri 1992, Cheng 1991); alcuni assumono che i parametri contenuti nel calcolo siano pienamente noti, mentre altri che siano noti solo in termini probabilistici. Il più semplice di tutti i modelli è il modello (o formula) di Wilson, noto anche come modello Harris-

Wilson – poiché fu proposto da Ford Whitman Harris nel 1913 e successivamente sviluppato da R. H. Wilson nel 1934.

Nella sua versione più semplice (Wilson 1934), la formula di Wilson presuppone che il “valore” delle merci o materie prime immagazzinate – calcolato utilizzando i prezzi – non abbia influenza sull'EOQ (Ballou, 1967; Neal, 1962). In base a questo semplice presupposto, l'EOQ è determinato basandosi solo su un'analisi dei costi di stoccaggio (Wilson, H. G., 1977); in altre parole, il prezzo di acquisto non è incluso nel calcolo. Waters (1992), Arsham (2006), Woolsey & Maurer (2005), Axsäter (2015) e Beretta e Navaroni (2017), presentano una vasta raccolta di modelli di calcolo basati su ipotesi alternative alla formula di Wilson ai quali rinvio il Lettore per approfondimenti analitici.

In Figura 3 riporto il modello generale più semplice per il controllo delle scorte (Mella, 2014b).

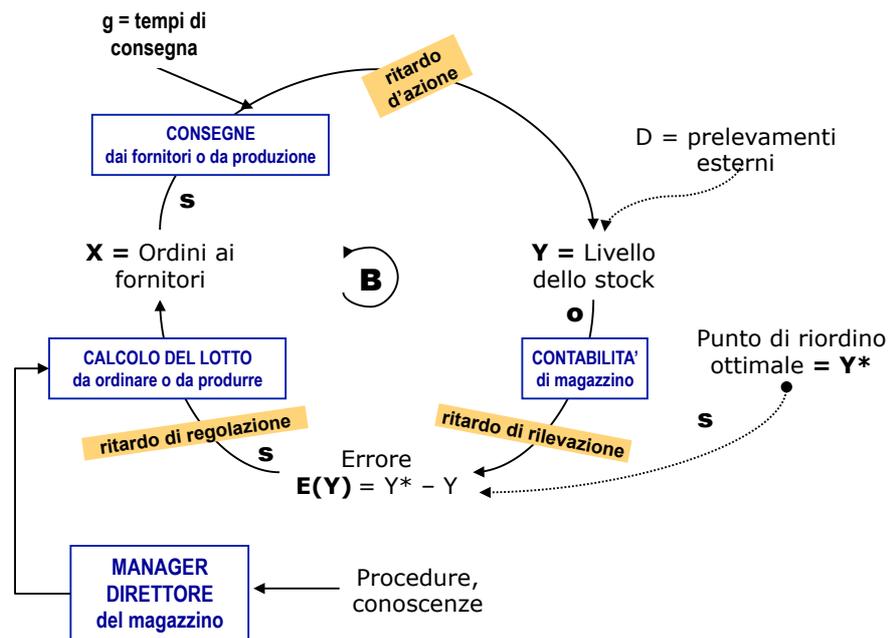


Fig. 3 – Modello generale di Sistema di Controllo del punto di riordino (fonte: Mella, 2014b, p. 323)

4 – Il Controllo della Produzione nelle imprese pluriprodotto, con vincoli di capacità. Le regole del Direct Costing e il metodo della programmazione lineare

Ho osservato come il controllo del magazzino non può essere disgiunto dal controllo della produzione in quanto, come sappiamo, il controllo delle scorte richiede che sia conosciuto il volume complessivo dei beni da mantenere in magazzino nell'anno o in qualche periodo specificato. Questo implica che ogni imprenditore/manager debba conoscere i volumi di produzione dai quali dipendono sia i consumi delle materie sia la disponibilità dei prodotti in scorta. Il controllo della produzione, quando non sono conosciuti i volumi da produrre, è, prevalentemente, un calcolo tecnico dei volumi ottimali da produrre dai quali dipendono poi i volumi delle scorte. Nelle imprese pluriprodotto controllare la produzione diventa un problema economico in tutti i casi in cui le produzioni debbano essere ottenute contemporaneamente in un periodo “T” ma vi siano vincoli di capacità produttiva.

Quando la produzione dei molteplici prodotti si svolge in condizioni di risorse limitate, e la produzione di un prodotto, inevitabilmente, assorbe le risorse a scapito di quella di altri prodotti, allora occorre determinare le quantità ottimali da produrre contemporaneamente

tenendo conto dell'esigenza di massimizzare i profitti, oppure i margini, compatibilmente con i limiti connessi alla presenza di fattori scarsi – capacità produttiva di macchinari e disponibilità limitata di materie e di lavoro – che occorre ripartire tra le diverse produzioni. Solo dopo avere determinato la quantità complessiva da produrre dei diversi prodotti, è possibile poi procedere alla individuazione del lotto più conveniente di produzione con le tecniche esaminate nel precedente capitolo.

Se le produzioni sono sottoposte ad un solo vincolo di capacità, il mix ottimale di produzione può essere determinato ricorrendo alle regole decisionali del *direct costing method* che ipotizza che per le decisioni di mix produttivo sia necessario distinguere tra costi variabili e fissi in relazione ai volumi P da produrre e assume che ogni unità di produzione ottenuta e venduta debba necessariamente “coprire” i costi variabili unitari, vc_n , lasciando un margine di contribuzione, “ $cm_n=p_n-cv_n$ ”, per la copertura dei costi fissi “FC”. Nelle imprese pluriprodotto, da questa regola deriva che il complesso delle produzioni “ qP_n ” degli $n= 1, 2, \dots N$ prodotti debba coprire i costi variabili complessivi, “ $\sum VC_n=vc_n qP_n$ ”, lasciando un margine di contribuzione complessivo, $CM=\sum cm_n qP_n$, possa assorbire i costi fissi complessivi necessari per le produzioni; o, in ogni caso, quanto più possibile (Anthony, 1965).

Con il *direct costing* non ha senso quantificare l'utile o la perdita per unità di prodotto; l'utile (o la perdita) si deve calcolare solo per tutte le produzioni insieme attivate dalla impresa con il contributo dei costi fissi: solo i margini totali o i profitti devono essere calcolati.

Seguendo questa logica, si possono ricavare le seguenti *regole operative* di calcolo economico per il confronto prezzi/costi unitari (Moisello & Mella, 2020):

REGOLA 1): un prodotto che presenta un prezzo, p, superiore al direct cost, vc, può essere fabbricato, in quanto il margine di contribuzione consente di coprire almeno una quota dei costi fissi di produzione; di conseguenza, il prezzo di vendita, p, deve sempre superare il direct cost: $p > vc$.

REGOLA 2): se l'impresa non ha vincoli alla capacità produttiva, tra due prodotti che presentano diversi margini unitari occorre potenziare la produzione di quello più remunerativo, cioè di quello che presenta il maggiore margine di contribuzione unitario;

REGOLA 3): se l'impresa ha un unico vincolo di capacità produttiva, nel senso che ha quantità limitata di un fattore da destinare alle diverse produzioni (p. es. ore macchina, materie prime, ore di mano d'opera, etc.), deve potenziare la produzione del prodotto che presenta il *maggior rapporto tra margine di contribuzione unitario e quantità di fattore a disponibilità limitata*; per es., se l'impresa ottenesse le produzioni ALFA e BETA, con un vincolo sulla quantità di materie disponibili per entrambi, e se $qM(ALFA)$ e $qM(BETA)$ indicano le *quantità unitarie* di materie prime impiegate per i due prodotti, allora occorre potenziare la produzione per la quale è maggiore il rapporto:

$$\frac{cm(ALFA)}{qM(ALFA)} \quad \text{oppure} \quad \frac{cm(BETA)}{qM(BETA)}$$

REGOLA 4): in presenza di più vincoli di capacità produttiva, il mix ottimale di produzione si ottiene impostando un “problema di ottimo vincolato” tramite la “programmazione lineare” ponendo quale funzione obiettivo la massimizzazione del risultato operativo complessivo calcolato come differenza tra il totale dei margini di contribuzione su tutti i prodotti e il totale di tutti i costi fissi.

Quando vale la RULE 4), una tecnica ormai consolidata da decenni, di semplice e generale applicazione, è il *Linear Programming Method* (LPM), proposto da George Bernard Dantzig (1963), che trova utile impiego nei problemi di produzioni multiple a flusso continuo, o assimilabile. Non posso entrare nei dettagli matematici ma mi limiterò alla presentazione delle

caratteristiche fondamentali del metodo, presentando, nel seguito, un esempio di applicazione, evidenziando che per la concreta soluzione di problemi di programmazione lineare sono disponibili efficienti software. Gli aspetti matematici possono essere approfonditi in Dantzig, 1963; Pierre, 1987; Brickman, 1989; Gass, 2010 e nei testi di Ricerca Operativa,

Per il controllo della produzione, in estrema sintesi, poiché la presenza di vincoli di disponibilità di uno o più fattori che devono essere impiegati per "N" produzioni comporta l'impossibilità di determinare la quantità ottimale di un prodotto senza nel contempo tenere conto degli effetti sulla produzione di altri prodotti, il LPM consente di calcolare il *mix ottimale* degli "N" prodotti in modo da rendere massima una *funzione economica* che dipende dalla quantità dei diversi prodotti ottenuti e dal loro "valore"; tale funzione, da massimizzare, potrebbe essere la funzione dei ricavi complessivi, quella dei margini lordi di vendita, o dei profitti netti dell'impresa; potrebbe essere, però, anche la funzione di costi di produzione, da rendere minima. Tale funzione viene denominata "funzione obiettivo" (*objective function*). Le quantità di produzione dalle quali dipende la funzione obiettivo sono sottoposte a un "sistema di vincoli lineari" sotto forma di eguaglianze e, nella maggior parte dei problemi, di disuguaglianze lineari (*linear inequality constraints system*) nelle quali i volumi di risorse limitate disponibili costituiscono i "termini noti". Il valore assunto dalle "N" produzioni non può essere negativo; pertanto si pone anche la "condizione di non negatività delle produzioni". Pertanto, la programmazione lineare è un metodo che consente di determinare come distribuire in modo ottimale un insieme di risorse in quantità limitata e nota tra un certo numero di produzioni, in concorrenza tra di loro sull'uso di quelle risorse, in modo da "ottimizzare" una funzione obiettivo. Nel seguito supporremo che la politica della produzione sia già stata definita e che le quantità da produrre siano indipendenti dalle scorte di prodotti finiti. Si denomina "soluzione ammissibile" una n-upla di valori assumibili dalle N variabili e che soddisfano i vincoli e la condizione di non negatività.

George Dantzig ha dimostrato i seguenti teoremi:

1. L'insieme ammissibile è convesso.
2. Le eventuali N-uple ottimali appartengono alla frontiera dell'insieme ammissibile.
3. Se il problema ammette più di una soluzione, esso ammette infinite soluzioni date dalle combinazioni lineari convesse delle diverse soluzioni ottimali.

Per determinare la soluzione ottimale, Dantzig elaborò il "metodo del simplesso", un *metodo iterativo* che, analizzando successivamente le N-uple delle soluzioni che appartengono alla frontiera dell'insieme ammissibile, individua la N-upla che ottimizza la funzione obiettivo. Il metodo del simplesso poteva essere implementato con calcoli "manuali", laboriosi e inefficienti in presenza di un elevato numero di variabili da ottimizzare, ma esistono oggi numerosi tools che consentono il calcolo automatico della soluzione ottimale (Wolfram-Alpha's Mathematica Linear Programming Solver, online; Sierksma and Zwols' Linear Optimization Solver, online). Presento un esempio di programmazione della produzione la cui soluzione è determinata con il modello, semplicissimo, predisposto da Sierksma and Zwols (2015a, 2015b), che dimostrerà come sia semplice trovare la N-upla delle soluzioni ottimali.

Un'impresa fabbrica normalmente i prodotti A, B e C. Mentre "A" e "B" sono completamente disgiunti, "C" è economicamente complementare agli altri e si vendono due unità di "C" per ogni "A" e una unità di "C" per ogni "B". Dalla vendita dei prodotti nella settimana h-esima, si prevedono i seguenti margini di contribuzione unitari: $cm(A) = 11.000$; $cm(B) = 6000$; $cm(C) = 5000$. Per la fabbricazione dei prodotti si devono utilizzare i servizi produttivi di tre macchinari: M1, che può essere attivo per 40 ore settimanali, M2, disponibile per 20 ore settimanali, e M3, che può essere impiegato per 40 ore settimanali. Per la settimana h-esima sono disponibili "3" macchine M1, "4" macchine M2 e "9" macchine M3. Per ottenere il prodotto A occorrono 60

minuti di M2 e 480 minuti di M3; il prodotto B richiede, invece, "252" minuti di M1 e "" di M2; C richiede "36" minuti di M1, "50" di M2 e "160" di M3.

Convieni innanzitutto ordinare i dati come nella Tabella 1.

Tab. 1 – Disponibilità e vincoli di capacità produttiva

Tipo macchinario	Numero macchinari	Minuti per Produzione A	Minuti per Produzione B	Minuti per Produzione C	Minuti macchina disponibili
M1	3	0	252	36	$3 \times 40 \times 60 = 7.200$
M2	4	60	30	0	$4 \times 20 \times 60 = 4.800$
M3	9	480	50	160	$9 \times 40 \times 60 = 21.600$
Margini unitari		11.000	6.000	5.000	

Dai dati ordinati nella Tabella 1 possiamo formalizzare matematicamente il problema di programmazione lineare:

funzione obiettivo

$$\max Z = 11.000 A + 6.000 B + 5.000 C$$

sistema dei vincoli

- | | |
|----------------------------------|------------------------------|
| [1] $252 B + 36 C < 7.200$ | vincolo relativo a M1 |
| [2] $60 A + 30 B + 50 C < 4.800$ | vincolo relativo a M2 |
| [3] $480 A + 160 C < 21.000$ | vincolo relativo a M3 |
| [4] $C = 2 A + B$ | vincolo di complementarità |
| [5] $A, B, C > 0$ | condizione di non negatività |

I primi tre vincoli esprimono le limitazioni alla capacità produttiva delle tre macchine disponibili nelle quantità indicate dai termini noti. Il quarto vincolo, denominato di complementarità, esprime i rapporti di congiunzione economica tra le tre produzioni. L'ultimo vincolo, infine, rappresenta le condizioni di non negatività dei valori delle produzioni.

Il metodo risolutivo di Sierksma and Zwols (2015b) consente di scrivere il problema con la seguente simbologia, essendo, x_1 , x_2 e x_3 , rispettivamente le produzioni A, B e C, dopo avere introdotto i valori della Tabella 1.

PROGRAM START

```

var x1 >= 0;
var x2 >= 0;
var x3 >= 0;
maximize z: 10000*x1 + 6000*x2 + 5000*x3;
subject to c11: 252*x2 + 36*x3 <= 7200;
subject to c12: 60*x1 + 30*x2 + 50*x3 <= 4800;
subject to c13: 480*x1 + 160*x3 <= 21600;
subject to c14: 2*x1 + x2 = x3;

```

END OF PROGRAM

Cliccando "Run-Solve" il modello determina, pressochè istantaneamente, i seguenti valori ottimali, come si può verificare sostituendoli nel programma:

[A = 20, B = 20, C = 60]

[Optimal objective value = 620.000]

[ore macchina inutilizzate: M1 = 40; M2 = 0; M3 = 1.800]

La stessa semplice procedura è stata elaborata in Wolfram Mathematica (2020).

5 – Dalla programmazione al controllo della produzione. La logica “push”. The Materials Requirements Planning, System

Alla determinazione dei programmi di produzione con il calcolo necessario delle quantità da produrre, occorre fare seguire la fase del *controllo della produzione*; indico con tale termine il complesso delle decisioni, delle determinazioni e dei controlli necessari per stabilire *quando* (date di inizio e fine delle produzioni), *dove* (centri di lavorazione), *come* (cicli di lavorazione), *con quali risorse* (materiali o capacità produttiva) e verso quale *destinazione* (consegna immediata o stoccaggio) devono essere implementati i programmi di produzione, rendendo così coordinati i processi di programmazione e di realizzazione. Ciò significa controllare, tra l'altro, il rilascio e l'avanzamento degli ordini ai centri di lavorazione, il carico sugli impianti, l'utilizzo della forza lavoro, il controllo della qualità e lo smistamento degli output ottenuti.

Il controllo della produzione richiede l'uso sia di algoritmi matematici di calcolo sia, soprattutto, di software specialistici, per la gestione dei processi, la schedulazione delle operazioni e la logistica delle materie e dei prodotti ottenuti. Sono state nel tempo ideate e implementate “forme moderne” di controllo della trasformazione produttiva, che si avvalgono ampiamente della Information Technology (IT) e che, per la loro potenza, pervasività ed efficacia, consentono di potenziare contemporaneamente i Sistemi di Controllo del magazzino, della produttività, della qualità, permettendo anche un incremento dell'efficienza della trasformazione economica.

Nei successivi paragrafi presenterò, sinteticamente i principi delle tecniche note come:

- MRP (o MRPI), Material Requirements Planning,
- CRP, *capacity requirements planning*,
- DRP, *distribution requirements planning*,
- MRPII, *manufacturing resources planning*,
- JIT, Just in time e Toyotismo.
- OPT, Optimized Production Technology,
- FMS, Flexible Manufacturing System,
- HMS, Holonic Manufacturing Systems,
- CIM, Integrated Manufacturing Systems

I principi che ispirano queste tecniche pongono l'enfasi sul “tempo” come principale variabile da controllare, e ciò implica la regolazione della *sequenza* e della *tempistica* dell'attività produttiva e di stoccaggio (Ptak 1991; Schmenner 1993; Neely 2007). Controllare il “tempo” in tutte le fasi dei processi della trasformazione produttiva significa porsi anche gli obiettivi di “*time compression*” (Towill, 1996; Mason-Jones & Towill, 1999) and “*shortening of time-to-market*”, in tutte le sue forme, tra cui, tenere sotto controllo i lead time di produzione, favorire la *sincronizzazione* delle linee produttive, la *flessibilità* (production mix) e l'*elasticità* (nei volumi) dei processi produttivi e rendere efficiente l'elaborazione dei fabbisogni di materiali e componenti (Plenert, 1999). Questi controlli vengono attuati impiegando leve che possono ricondursi anche alle attività di gestione dei flussi di materie e componenti (*material handling*). Un'attenta gestione degli *approvvigionamenti* e delle *scorte* di produzione è forse il più semplice intervento di “*time compression*”, considerando che le attività di stoccaggio gestiscono un processo parallelo a quello del lancio degli ordini di produzione; pertanto, i lead time di approvvigionamento *devono* essere tenuti sotto controllo, in modo da rendere disponibili i soli materiali necessari.

Alla base del controllo “moderno” della produzione è il controllo dell'*avanzamento degli ordini*, cioè l'assegnazione delle priorità di lavorazione per quegli ordini relativi a parti del prodotto finito che devono essere fabbricate in uno stesso centro di lavoro. Tali priorità sono soggette a continue modifiche a causa del fatto che i clienti possono cambiare le specifiche o le quantità degli ordini, anticipare o ritardare la data di consegna richiesta, oppure cancellare

l'ordine stesso. Inoltre, possono verificarsi situazioni anomale all'interno della fabbrica, quali guasti del macchinario, aumento inaspettato di pezzi difettosi, problemi di qualità. Il problema è tuttavia preminentemente di tipo informativo in quanto senza informazioni precise e tempestive sullo stato corrente della produzione diventa impossibile ottenere livelli adeguati di attività congrui con le esigenze di esecuzione dei programmi e si finisce inevitabilmente con l'accumulare ordini inevasi e col creare un clima di disordine e di costante stato di emergenza. In questa problematica si inquadra la distinzione tra sistemi di controllo "push" e "pull" (Pyke & Cohen, 1990; Hodgson & Wang, 1991a, 1991b).

In generale, sia nei sistemi a logica push che in quelli a logica pull, il programma di produzione si estende per un orizzonte temporale pari al tempo di produzione, solo che l'entità di questo orizzonte cambia e in particolare risulterà ridotta nel caso pull. Un sistema push si applica quando il lead time di produzione e di approvvigionamento, P , è maggiore della durata del periodo in cui i prodotti devono essere consegnati (delivered) D ; risulta, pertanto necessario prevedere e programmare in anticipo l'ingresso dei materiali in fabbrica nonché gli ordini di lavorazione, per cercare di accorciare al minimo il lead time produzione. Il sistema pull, pertanto si basa su previsioni accurate. Un sistema pull è, invece, strutturato sugli ordini in portafoglio per i quali si è determinato che i tempi di consegna sono maggiori del lead time di produzione e di approvvigionamento; pertanto gli ordini "tirano" produzione e approvvigionamenti e non sono necessarie previsioni, essendo noti i tempi di produzione e di consegna. Ovviamente, anche nel sistema pull risulta sempre necessario assicurare la necessaria capacità produttiva, cioè la disponibilità degli impianti e della forza lavoro che devono essere acquisite con un anticipo sufficiente a renderle disponibili al momento dell'utilizzo.

In un *sistema push tradizionale* per il controllo della produzione (Flow control - Look ahead - Push) si deve cercare di ottimizzare le prestazioni di ciascun centro operativo così che esso minimizzi i tempi di inattività e produca quanto necessario al momento opportuno per i centri a valle; occorre, allora, coordinare la produzione "da valle a monte", partendo da previsioni di vendita, estese ad un arco temporale stabilito, dalle quali si ricava un programma principale di produzione indicante la sequenza ordinata dei singoli prodotti o modelli da realizzare nella fase di assemblaggio. Le fasi di lavorazione a monte sono informate della cadenza e della qualità di parti da fabbricare per mezzo dell'elaborazione di diversi programmi di produzione specifici, la cui emissione viene anticipata, rispetto alla data prevista per il completamento del prodotto finito, affinché i reparti abbiano il tempo di predisporre uomini e macchinari, fabbricare un dato componente e inviarlo al centro di lavorazione successiva. Tale metodo è noto come *Materials Requirements Planning*, MRP, e consiste in un sistema computerizzato per la pianificazione e il controllo dei "materiali" attraverso il calcolo dei *fabbisogni*, per determinare le quantità e le tipologie di materiali richiesti e la *tempificazione* dei flussi, per sincronizzare gli approvvigionamenti con i ritmi dei processi produttivi (la sigla corretta di questa tecnica è MRPI, al fine di distinguerla dal Manufacturing Resource Planning, MRPII e MRPIII che esaminerò brevemente al Par. 8); Ciascun assieme, sotto assieme, parte e componente, di cui sono costituiti i diversi prodotti che s'intendono realizzare, viene effettuato partendo dal *programma principale di produzione*, che deve essere elaborato anticipatamente, per definire il programma dei *volumi* e dei *tempi* di consegna dei prodotti, in un dato arco temporale; si applicano ai volumi i dati di fabbisogno unitario di ciascun componente, o "codice". Per poter stabilire i programmi di produzione occorre, innanzitutto, stimare sia la domanda dei clienti, nonché il tempo che i reparti produttivi impiegheranno per completare le componenti necessarie e per assemblarle. In un mercato non pianificato, caratterizzato da elementi di incertezza, le previsioni non sono sempre accurate e obbligano a una modifica contemporanea di tutti i programmi di produzione.

Specificato il *programma di produzione*, il documento fondamentale è la *distinta base* - cioè l'elenco strutturato di tutti i materiali o parti necessari per produrre uno specifico prodotto finito

– quale strumento per suddividere il programma principale di produzione in *ordini di acquisto* di materie prime e *ordini di produzione* da inviare ai reparti tenendo ovviamente conto anche della quantità in scorta delle diverse componenti.

Da queste informazioni il sistema MRP risale alle quantità necessarie di ciascun “codice”, o *fabbisogno lordo*, per soddisfare le richieste contenute nel programma di produzione. Dal *fabbisogno lordo*, eventualmente integrato con la dimensione della scorta di sicurezza, deriva il *fabbisogno netto*, tenendo conto delle quantità presenti in magazzino e delle quantità per le quali è già in corso un ordine di acquisto o di produzione. Dal *fabbisogno netto* si specifica il piano di approvvigionamenti (piano degli ordini) che indica con esattezza la data in cui dovrà essere emesso l’ordine di produzione o di acquisto dei materiali; in questo modo i “codici” verranno acquistati o prodotti solo quando si verifica effettivamente la loro richiesta. La disponibilità dei materiali viene programmata con una tempificazione precisa, in modo che gli approvvigionamenti facciano pervenire i componenti in magazzino con un minimo anticipo rispetto all’istante in cui avviene il prelievo; in questo modo si riduce la scorta media e si ottiene un notevole risparmio dei costi di stoccaggio.

Se la “fasatura” delle richieste è stata fatta correttamente e nel rispetto delle capacità produttive di cui è dotata la struttura produttiva (impresa, stabilimento, reparto, etc.), e se non intervengono eventi esterni che disturbano la sequenza programmata, tutti i componenti di un determinato prodotto arriveranno alla linea di montaggio contemporaneamente. A lavorazione ultimata, i prodotti (che non sono in pronta consegna) saranno dapprima avviati in un magazzino e in seguito consegnati in base agli ordini effettivi dei clienti. È importante che le variazioni dei programmi vengano comunicate istantaneamente ai centri di lavorazione per evitare di generare scorte di componenti, semilavorati o prodotti finiti di difficile riutilizzo. Essendo spesso problematico gestire modifiche frequenti, a volte si opta per il mantenimento di scorte elevate tra le varie fasi, al fine di garantire una maggiore capacità di risposta dell’intero sistema.

Le tecniche MRP, considerando la frequenza e le modalità di riprogrammazione, possono operare secondo due forme differenti (Schmitt, 1984):

a. *sistemi rigenerativi* che ricalcolano periodicamente la “*full explosion*” dei fabbisogni sulla base della più recente elaborazione del programma di produzione. Tale procedura è adatta in caso di riprogrammazioni poco frequenti e comporta la cancellazione dell’elaborazione precedente, cui si sostituisce per intero la nuova programmazione. Questi sistemi hanno il vantaggio di aggiornare la pianificazione alle eventuali variazioni apportate alla “base dati” (modifiche tecniche, cambiamento di parametri e unità produttive, etc.) ma si dimostrano particolarmente onerosi per l’elevato numero di informazioni che deve essere trattato;

b. *sistemi incrementali* o *net change systems* che attuano interventi di riprogrammazione su “*partial explosions*” dei fabbisogni per effetto di variazioni *parziali* apportate al programma di produzione. In questo caso vengono ricalcolati solo i fabbisogni relativi ai codici interessati dalla variazione, mentre la restante parte dell’elaborazione e l’orizzonte temporale restano inalterati rispetto all’ultima programmazione. I sistemi incrementali sono efficaci nel caso di elaborazioni ravvicinate in quanto riducono i tempi di attesa.

L’applicazione di un sistema MRP comporta un elevato impegno di risorse organizzative; la complessità del metodo e la necessità di disporre di sistemi informatici per rendere più efficiente la gestione delle elaborazioni risultano talvolta onerosi, ma si traducono in significativi benefici sul piano dell’accuratezza e della tempestività dell’intero sistema informativo di produzione.

6 – Segue. La logica “pull”

Per evitare gli inconvenienti della continua previsione e riprogrammazione generati dalla logica *push*, si può ricorrere al sistema alternativo che si fonda sulla logica *pull*, secondo il quale, in sintesi, noti i tempi di consegna degli ordini in portafoglio, i materiali e i componenti sono

“richiamati” dai centri utilizzatori e, di conseguenza, messi a disposizione solo quando occorre (Stock control - Look back – Pull). Non vi è più la necessità di “decomporre” il programma principale di produzione in tanti ordini di lavorazione da inviare ai singoli reparti; è sufficiente che la linea di assemblaggio finale riceva la sequenza dei componenti dei modelli da produrre – nella quantità aggiornata all'ultimo istante con gli ordini reali provenienti dalla clientela – affinché si possa attuare il prelievo dei pezzi necessari, nella quantità ed al momento giusto. Tale logica operativa procede “a ritroso” lungo tutto il sistema produttivo, dalle vendite alla produzione, poiché ciascuna fase di lavorazione preleva solo quanto le serve dalla fase immediatamente precedente, la quale, a sua volta, si limita a produrre quanto è stato appena prelevato. Questo sistema di controllo della produzione è anche un sistema di controllo delle scorte in quanto, basandosi sul “rimpiazzo” di ciò che è stato utilizzato, elimina la necessità di tenere le scorte cuscinetto (*buffer stock*), che in un sistema *push* potrebbero, al contrario, essere indotte oltre che da errori di previsione della domanda, anche da asincronie generate tra due fasi fra loro concatenate.

Il metodo *pull* prevede che materie e componenti, una volta lavorati, vengano trattenuti in piccoli punti di stoccaggio in uscita, anziché essere *pushed* al reparto seguente. Questo è anche un ottimo dispositivo di *segnalazione visiva* dell'errore, ai fini del controllo della produzione di ogni reparto, poiché, se nessuno viene a prelevare i pezzi in questione, gli operai del reparto possono immediatamente constatare che la loro produzione deve fermarsi, e quindi evitare l'accumulo di scorte indesiderate. Tale sistema può essere pensato come un canale di scorrimento che unisce il reparto produttore con quello utilizzatore, all'interno del quale le scorte non possono superare una quantità limitata (dimensione limitata del punto di stoccaggio). Se si preleva un pezzo da un'estremità, il resto del materiale avanza nel canale di scorrimento e lascia uno spazio vuoto all'estremità di alimentazione. Il ritmo con cui le scorte sono ritirate per i fabbisogni “a valle”, regola il ritmo di alimentazione da parte del reparto “a monte”.

Dal momento che il sistema fluisce a ritroso, cioè dal punto terminale a quello iniziale della produzione, solo il primo deve essere portato a conoscenza di eventuali modifiche del piano di produzione; le fluttuazioni della domanda si riflettono rapidamente all'indietro, lungo tutto il sistema produttivo senza necessità che un ufficio di programmazione centrale elabori e trasmetta programmi di produzione modificati ai centri di lavorazione, come accade in un sistema *push*. La differenza nei confronti di un metodo *push* tradizionale è che in quello *pull* non si ha alcun anticipo di produzione; il sistema, rispondendo a ben precisi segnali di “trazione”, fornisce solo quei prodotti che, in base agli ordini aggiornati in tempo reale, sono suscettibili di essere venduti.

Perché un sistema *pull* possa funzionare occorre verificare la sussistenza di alcune caratteristiche del sistema produttivo:

- 1) la produzione deve essere, innanzitutto, possibilmente, a *flusso continuo*. È necessario rivedere il lay-out dei macchinari affinché ciascun centro di fabbricazione abbia un punto di stoccaggio in entrata ed uno in uscita ove potere attuare un minimo di accumulo di *buffer stock funzionali*; le linee di assemblaggio avranno più punti di stoccaggio in entrata, tanti quante sono le stazioni di lavoro che fanno confluire le componenti prodotte;

- 2) ogni unità produttiva centrale (stabilimento, reparto) deve disporre di un solo punto di rifornimento per ogni componente, o materia, anche se poi tale componente, o materia, viene utilizzato in diversi centri operativi; occorre, pertanto, programmare con precisione il percorso che il materiale deve compiere attraverso il sistema produttivo;

- 3) occorre attuare quanto più possibile il *livellamento della produzione* con riduzione dei tempi di attrezzamento. Livellare la produzione significa rendere la produzione a lotti minimi, tendenti all'unità, rendendo flessibile la produzione. Questo contribuisce a bilanciare tutte le

operazioni che alimentano l'assemblaggio finale, garantendo la massima fluidità, senza interruzioni o soste;

4) è necessario che il processo di produzione sia caratterizzato da ripetitività delle operazioni, anche se questa condizione può venire meno nel caso di produzioni su commessa. Il sistema *pull* si rivela molto efficace nella lavorazione di prodotti pre-codificati, cioè dotati di distinta base e di struttura di prodotto facilmente pre-definibile.

7 – L'importanza di schedulazione, livellamento e bilanciamento della produzione

Qualunque sia la logica seguita per il controllo della produzione, appare importante il momento della *schedulazione*, l'attività di controllo della produzione per ottimizzare le sequenze produttive al fine di massimizzare il rendimento dei fattori produttivi e ottenere un flusso regolare e tempestivo dei prodotti attraverso le varie fasi di fabbricazione. La corretta schedulazione è necessaria per la configurazione del *ciclo di lavorazione*, cioè della sequenza ordinata delle operazioni di movimentazione e trasformazione di materiali e componenti che consentano di fare pervenire al deposito nei magazzini prodotti finiti, nei tempi stabiliti e nelle corrette quantità, i volumi necessari per la consegna e commercializzazione. Il ciclo ha inizio con il prelevamento dei materiali del magazzino materie prime, e termina con il montaggio finale del prodotto finito e il suo deposito a magazzino. Tale tipo di attività è fondamentale nel caso di produzioni discontinue, costituite da prodotti che interessano le stesse macchine o gli stessi centri operativi. La schedulazione implica che siano stati definiti i volumi, i tempi e i processi di produzione e si conoscano già gli ordini da eseguire e le risorse a disposizione. Le decisioni da prendere riguardano la sequenza con cui lanciare in produzione i diversi ordini o con cui eseguire le operazioni relative a tutti gli ordini al fine di:

a) ridurre quanto possibile le asincronie e gli sfasamenti tra il lavoro dei diversi centri produttivi;

b) evitare gli sprechi di tempo connessi a soste inutili o eccessive di scorte;

c) fornire con regolarità lavoro alla manodopera;

d) realizzare i termini di consegna prestabiliti;

e) ridurre i costi; poiché i costi sono correlati al tempo, la migliore sequenza è quella che richiede il minor tempo di attrezzaggio e produzione. Con la schedulazione si vengono, quindi, a definire i tempi intercorrenti fra il lancio in produzione e la consegna del prodotto finito in modo che vengano rispettati i tempi convenuti con il cliente e siano minimizzati i costi di produzione.

Le tecniche di schedulazione utilizzabili dipendono dal tipo di organizzazione che caratterizza il processo produttivo. È possibile, infatti, ottenere particolari vantaggi dall'uno o dall'altro sistema di organizzazione della produzione tramite adeguate procedure standard di schedulazione senza richiedere una riorganizzazione generale degli impianti. Esistono due tipologie principali di organizzazione della produzione che possono essere definite *funzionale e per linea di prodotto*. Nella maggior parte delle imprese manifatturiere si ritrovano elementi di entrambe le tipologie di sistema.

Nella *funzionale*, i centri produttivi sono organizzati secondo i diversi tipi di macchinario o di operazioni e i materiali "attraversano" i reparti in lotti separati corrispondenti ai singoli ordini di fabbricazione. Pur consentendo di operare con una più bassa capacità produttiva degli impianti, questo tipo di organizzazione presenta costi notevoli legati alle continue necessità di "riattrezzaggio" delle macchine per i continui cambi di produzioni e all'esigenza di disporre di

personale più versatile e quindi, probabilmente più retribuito. Occorre quindi che ogni unità da produrre sia diretta attraverso il sistema e schedulato alle varie stazioni di lavoro.

Nell'organizzazione della produzione *per linea di prodotto*, invece, gli impianti sono specializzati e destinati alla fabbricazione di un insieme di prodotti similari per i quali tutte le operazioni sono combinate insieme, con il rischio avere difficoltà a distinguere tra i singoli ordini; pertanto l'organizzazione *per linea di prodotto* è caratteristica delle industrie di produzione di grande massa, per le quali la domanda è stabile e la produzione è limitata a pochi prodotti di base. Pur presentando il vantaggio di un più rapido flusso dei materiali attraverso le varie fasi di fabbricazione, di minori costi di attrezzaggio e minori scorte in lavorazione, questo tipo di organizzazione è caratterizzato da rigidità elevata e richiede ampi investimenti in impianti. Questa situazione richiede un'attività di schedulazione limitata alla necessità di stabilire le velocità di produzione.

Nella produzione *a lotti*, in cui le linee di produzione vengono riattrezzate di volta in volta per elaborare, in lotti successivi, un grande numero prodotti diversi, la schedulazione provvede a determinare le priorità di svolgimento delle lavorazioni dei diversi lotti di fabbricazione tenendo conto sia di vincoli temporali di consegna, sia dei tempi di lavorazione; difficoltà possono intervenire quando si verifica un cambiamento della priorità di alcuni ordini rispetto ad altri con conseguente necessità di modificare la sequenza di operazioni stabilite in precedenza.

Il *livellamento* della produzione è un aspetto fondamentale della *produzione a flusso*; anziché ottenere un prodotto in un unico lotto annuale, è preferibile produrlo con un output costante, mensile o addirittura settimanale; ciò evita all'azienda di stoccare un lotto intero pari al fabbisogno annuale o mensile e consente di lanciare la produzione sulla base delle effettive necessità, e non delle previsioni annuali, producendo nel breve periodo il mix produttivo necessario per le consegne; per es., livellare su base settimanale significa produrre tutti i codici nell'arco della settimana con lotti di produzione settimanali. Il *livellamento* presenta notevoli vantaggi nel caso di produzioni caratterizzate da reparti "in cascata", poiché le operazioni previste per la produzione mensile (settimanale, o giornaliera) devono essere livellate in tutti i reparti della cascata, così che la produzione uscente sia quella effettivamente voluta. La *produzione* completamente livellata richiede, pertanto l'impostazione di una *programmazione livellata* consistente nella distribuzione più razionale della richiesta di materiali, di tempo macchina e di manodopera, in modo da ottenere una distribuzione armonica di ogni prodotto fabbricato quando la produzione è in corso.

Anche il controllo del *bilanciamento*, o *sincronizzazione*, della produzione è fondamentale per l'organizzazione a flusso della produzione. Al fine di avere sempre sotto controllo l'intera attività produttiva, per poterla adeguare ad eventuali variazioni improvvise della domanda, è, infatti, necessario che l'intero processo di lavorazione mantenga un ritmo regolare, agisca in modo ripetitivo e coerente nelle diverse fasi del processo. Se la sincronizzazione dovesse mancare, le diverse parti della linea produttiva potrebbero sviluppare comportamenti autonomi di lavorazione, causando ritardi e incrementando anche i costi del processo. Non è utile che un reparto, per ottimizzare l'utilizzo della propria capacità produttiva, debba produrre grandi quantità se poi tali produzioni comportano accumuli di materiali in lavorazione a causa di una minore velocità operativa in qualche reparto a valle. Per la sincronizzazione potrebbe, invece, essere opportuno rallentare tutta la linea, perdendo in efficienza in alcune macchine, ma garantendo maggiore fluidità e controllo del processo produttivo. Per questo, la sincronizzazione deve fare in modo che ogni flusso, ogni macchina o posto di lavoro proceda alla stessa velocità, determinata dal reparto più lento che rappresenta il *collo di bottiglia* del processo.

8 – Evoluzione dell'MRP: MRPII e MRPIII. Verso il Just In Time (JIT).

Il continuo miglioramento dei sistemi di controllo favorisce la ricerca di sistemi di controllo sempre più articolati rivolti alla pianificazione di ogni fase del processo di produzione e di vendita. I sistemi MRP si sono progressivamente evoluti e la prima forma di evoluzione è riconducibile all'affermarsi dei cosiddetti *closed-loop* MRP in cui il sistema è in grado di verificare l'esistenza di capacità disponibile presso ogni reparto e di tenerla sotto controllo, realizzando una connessione tra MRP, che ha per oggetto i *materiali*, e CRP, il *capacity requirements planning* che ha per oggetto le *capacità produttive* con il risultato che, oltre agli ordini confermati, anche gli ordini pianificati dall'MRP possono vengono tradotti dal CRP in fabbisogni di capacità ed in relativi carichi di reparto, opportunamente livellati e compatibili con i limiti di capacità esistenti. Il *closed-loop* MRP risulta, pertanto, in grado di pianificare la disponibilità di tre risorse fondamentali; materiali, capacità produttiva e tempo.

Come con il *closed-loop* MRP si arriva, a valle, "spinti" dall'intero programma di produzione, così, a monte, si è cercato di integrare la pianificazione della produzione con quella dei fabbisogni del sistema distributivo, arrivando a configurare il sistema DRP, il *distribution requirements planning*, con il quale si realizza il coordinamento del flusso di informazioni che pervengono dal mercato. Il DRP emula il meccanismo di funzionamento dell'MRP, prendendo in considerazione anche i dati dei magazzini periferici o dei punti di vendita collocati sul territorio, programmando il flusso di domanda dalla periferia al centro, tenendo conto delle rispettive disponibilità, delle politiche e dei tempi di riassortimento di ciascun segmento del canale di distribuzione.

Il processo di integrazione informativa delle aree coinvolte nella pianificazione e gestione dei flussi fisici, ha di recente condotto all'affermazione del *manufacturing resource planning*, noto come MRPII, che, pur mantenendo la logica sottostante ai sistemi MRP, amplia il processo di pianificazione a tutte le risorse di produzione: capacità produttiva, investimenti e personale. Grazie all'uso intensivo di strumenti informatici, hardware e software, tenendo anche conto delle nuove bande nonché dell'ampliamento della *broadband* che favorisce la velocità di trasmissione dei numerosi dati necessari, anche l'MRPII è stato ampliato per includere nella programmazione anche la gestione della *manutenzione*, del *controllo di qualità* e sulla *contabilità industriale* (Wight, 1995, Jiang and Han 2009); si è trasformato in MRPIII, un sistema di gestione integrata della produzione, che abbraccia quasi tutti gli aspetti gestionali inerenti all'attività produttiva; in particolare integra la progettazione, la definizione delle fasi di produzione e il sistema informativo gestionale. Lo MRPIII appare particolarmente utile per le imprese mono-business che lavorano per progetti e sono denominate "One-of-a-Kind Production (OKP)".

Advanced technology for facilitating integration, lay the concept of the MRP-3, a new production management system specially indicated for the "minibusiness" model of a factory, and which is probably going to give a leap in the next future to the organisational procedures in discrete manufacturing, and in particular in OKP (one of a kind production manufacturing) (Elejabarrieta, 1998).

A questi sistemi di controllo della produzione si affianca la tecnica/filosofia del "just-in-time", JIT, adottata in Giappone, agli inizi degli anni sessanta, nei cantieri navali; a seguito di una forte produttività delle acciaierie, i cantieri navali erano riusciti ad abbattere le scorte di acciaio, avendo potuto negoziare tempi molto ridotti di evasione degli ordini di acciaio, grazie alla possibilità di approvvigionarsi con lotti dimensionati a pochissimi giorni di fabbisogno; quindi, effettivamente, "giusto in tempo" rispetto all'utilizzo. La prassi si è estesa rapidamente ad altri settori industriali ed alle fasi produttive interne e la Toyota lo ha applicato in tutti i suoi stabilimenti, concettualizzandone i vari aspetti e diffondendoli presso i fornitori; il JIT, conosciuto in Occidente è proprio quello messo a punto da Toyota.

Per limiti di spazio, non posso approfondire le ragioni storico-economiche che hanno condotto a questa forma di controllo della produzione; ritengo opportuno ricordare, solamente, che nei paesi occidentali il just-in-time è stato inizialmente accolto in modo contrastante; era, infatti, opinione diffusa che il JIT, più che un *nuovo* modello organizzativo-gestionale *generale*, fosse invece il risultato di una politica industriale resa possibile dal diverso *contesto culturale e sociale* giapponese, nel quale la gestione della manodopera non presentava i caratteri di conflittualità e di criticità che si riscontravano in Europa e negli Stati Uniti. Un secondo aspetto che ha contribuito, inizialmente, a frenare l'introduzione di questo modello produttivo nelle imprese occidentali è stata la convinzione che gli approcci MRP e JIT fossero incompatibili. Tuttavia, tra i due sistemi non ci sono differenze tali da renderli inconciliabili; la differenza fondamentale tra i due sistemi è l'orizzonte temporale considerato: l'MRP parte da un programma di produzione che copre un intervallo di tempo superiore ai lead time delle fasi a monte che si vogliono gestire e pianifica, di conseguenza, a ritroso tutte le operazioni interne. Il JIT lega la singola fase a quella che si trova a valle, privilegiando *non* il fabbisogno pianificato *ma* quello immediato. Con questo modo di procedere, il JIT elimina molti degli inconvenienti che caratterizzano il controllo con l'MRP e, in particolare, la necessità di scorte di funzionali e di sicurezza, tanto maggiori quanto più ampio è l'orizzonte temporale considerato. Mentre l'MRP è un tipico sistema *push*, il JIT è un sistema *pull* nel quale i materiali non avanzano nel processo produttivo, ma vengono "tirati" dal reparto a valle nel momento in cui sono richiesti. Da un punto di vista logico, l'*ottimo*, per un sistema *pull*, si consegue quando il flusso logistico è costituito da operazioni di trasformazione e movimentazione eseguite sul *singolo pezzo*, nel momento in cui esso è *richiesto a valle*. Questo, per il JIT, è l'ideale da perseguire.

La logica del just-in-time è, però, molto più ampia in quanto il JIT si propone la ricerca costante del *miglioramento continuo* nell'utilizzo delle risorse disponibili e nell'*eliminazione di tutti gli sprechi* di risorse e di tempo. Secondo Taiichi Ohno, in padre del sistema di produzione Toyota (Ohno 1988), le imprese occidentali non possono affrontare adeguatamente l'eliminazione degli sprechi proprio perché seguono la logica della produzione su larga scala, con *specializzazione del lavoro* (modello tayloristico) e con *catene di montaggio* per produzioni di massa (modello fordistico) (Blackburn, 1991; Wakamatsu 2009). Egli ha indicato sette sprechi (*seven wastes*), che possono essere considerati i peccati mortali (*mortal sins*) nei processi di produzione (Smith & Reinartson 1991):

1. Ritardi (Delay, waiting or time spent in a queue with no value being added)
2. Produzione in eccesso rispetto alle necessità (Producing more than you need)
3. Sovraproduzione e attività senza valore aggiunto (Over processing or undertaking non-value added activity)
4. Trasporti non necessari (Not essential Transportation)
5. Movimentazioni non necessarie (Unnecessary movement or motion)
6. Stoccaggio e scorte (Inventory)
7. Difettosità (Defects in the Product).

Secondo il JIT, tutti gli sprechi devono essere eliminati ma, tra tutti, quello su cui si devono concentrare gli sforzi maggiori è rappresentato dalle *scorte* perché, normalmente, derivano dall'*asincronia* tra operazioni a monte, avvenute in anticipo, e quelle a valle, che non possono assorbire le loro produzioni, quando l'anticipo è superiore al minimo necessario affinché l'operazione a monte possa adeguatamente alimentare quelle a valle. Quando l'*asincronia* è rilevante, lo spreco è evidente e si aggrava per il rischio di obsolescenza degli articoli stoccati. La permanenza in scorta non aggiunge valore al prodotto quando la scorta non è strettamente indispensabile per il buon funzionamento delle operazioni produttive, che aggiungono valore;

se la scorta è uno spreco, sprecato è anche, di conseguenza, lo spazio che essa occupa. Nasce quindi l'idea fondamentale alla base del sistema just-in-time che occorre cercare di produrre:

- solo *quanto* richiesto dalle esigenze commerciali, eliminando così ogni spreco da sovrapproduzione,
- nel *momento* in cui (*quando*) si manifesta la domanda, eliminando così le scorte di componenti e di materie e gli sprechi di spazio,
- con consegna immediata per eliminare le scorte di prodotti finiti.

Da ciò la consuetudine di denominare il sistema JIT con il termine di politica di produzione a scorte zero (*stockless production*). Il JIT, tuttavia, non pone l'enfasi solo sulla *riduzione delle scorte*, considerate un *indicatore di inefficienza* di un sistema produttivo, ma anche sulla *riduzione del lead time* di produzione, cioè il tempo medio necessario affinché un lotto di produzione, completate tutte le fasi di lavorazione, sia reso disponibile per la consegna. Monitorare e tenere sotto controllo la durata del lead time è fondamentale perché solo una parte limitata della durata del lead time è impiegata in attività che aggiungono valore al prodotto, mentre una parte più o meno lunga è assorbita dalle operazioni che non aggiungono valore al prodotto ma che possono generare costi inutili: movimentazione e trasporto, tempi di attesa di lavorazione, tempi lunghi di consegna dei materiali, fermi macchina, etc., tutte operazioni che sono improduttive e che devono essere eliminate o ridotte al minimo.

In sintesi, il sistema giapponese capovolgeva le teorie tradizionali perché imponeva la logica di passare dalla *massimizzazione del l'utilizzo delle risorse installate* (approccio tradizionale) alla *minimizzazione delle risorse impiegate* per rispondere alle variazioni della domanda, soprattutto, riducendo al minimo scorte e lead time. La *flessibilità* e l'*elasticità della produzione*, che garantiscono il collegamento diretto fra andamento del mercato e flusso produttivo, *rappresentano un altro obiettivo prioritario del just-in-time*.

Come ho anticipato, JIT è nato in Toyota (Taiichi Ohno) e ha dato il nome ad una nuova forma, o politica, di produzione denominata Toyotismo – sinonimo di flessibilità e di riduzione delle scorte – per distinguerla dal Fordismo, sinonimo di rigidità e di volumi produttivi costanti. In estrema sintesi, ricordo i (semplici) principi del Toyotismo (Imai, 1986; Benton & Shin, 1998; Liker & Meier, 2005; Liker & Morgan, 2006):

1) *jidoka*, che significa “automazione dei macchinari con la mente umana”, spesso, in italiano, denominato “*autonomazione*”: occorre la massima *automazione* degli impianti accompagnata da funzionamento *autonomo* integrato con l'intervento umano per testare *on line* la qualità di funzionamento; ciò significa controllo in tempo reale dei “difetti” in tutto il processo produttivo, in quanto viene ritenuto preferibile un fermo macchina limitato, per ritardare l'impianto, che uno spreco di materiali e una produzione di pezzi difettosi; lo *jidoka* impone, infatti, di fermare la linea di produzione quando si verificano anomalie e per fare ciò è indispensabile contare sul discernimento umano oltre che fare affidamento sull'intervento dei dispositivi automatici.

2) *shojinka* cioè flessibilità nell'impiego del lavoro umano:

a) occorre che il lavoratore sappia fare molte cose semplici e non poche cose complesse; *sarà così impiegabile in modo flessibile su più macchine*;

b) occorre che la quantità di lavoro possa variare al variare dei livelli produttivi; *si devono potere livellare i carichi di lavoro; l'ozio va eliminato*;

3) *soikufu* cioè inventiva e creatività: occorre mettere a frutto l'esperienza e la creatività di ogni componente produttiva per arrivare al coinvolgimento di ogni lavoratore sia nel miglioramento della, *produttività* sia in quello della *qualità*;

Why not make the work easier and more interesting so that people do not have to sweat? The Toyota style is

not to create results by working hard. It is a system that says there is no limit to people's creativity. People don't go to Toyota to 'work' they go there to 'think' (Taiichi Ohno, quoted by Ballé 2015, online).

4) *just-in-time*: è questo un principio basilare che dà il nome all'intera filosofia: cercare di ridurre al minimo ogni lead time del processo produttivo, a monte, durante e a valle. Ciò significa rendere massima l'efficienza produttiva rendendo minimo il rapporto tra "tempo morto" (da eliminare) e "tempo attivo" (da minimizzare); la presenza di scorte può rendere meno urgente il controllo del processo produttivo e porta ad aumentare l'inefficienza produttiva. In effetti, il JIT non è solo una "tecnica" per il controllo delle scorte e della produzione ma rappresenta una "filosofia" che ha il più ampio obiettivo della ricerca della *qualità totale* e, in quanto tale, rientra fa propria la logica del Total Quality management (*postea*, Par. 10) come sintetizzato nella Figura 4.

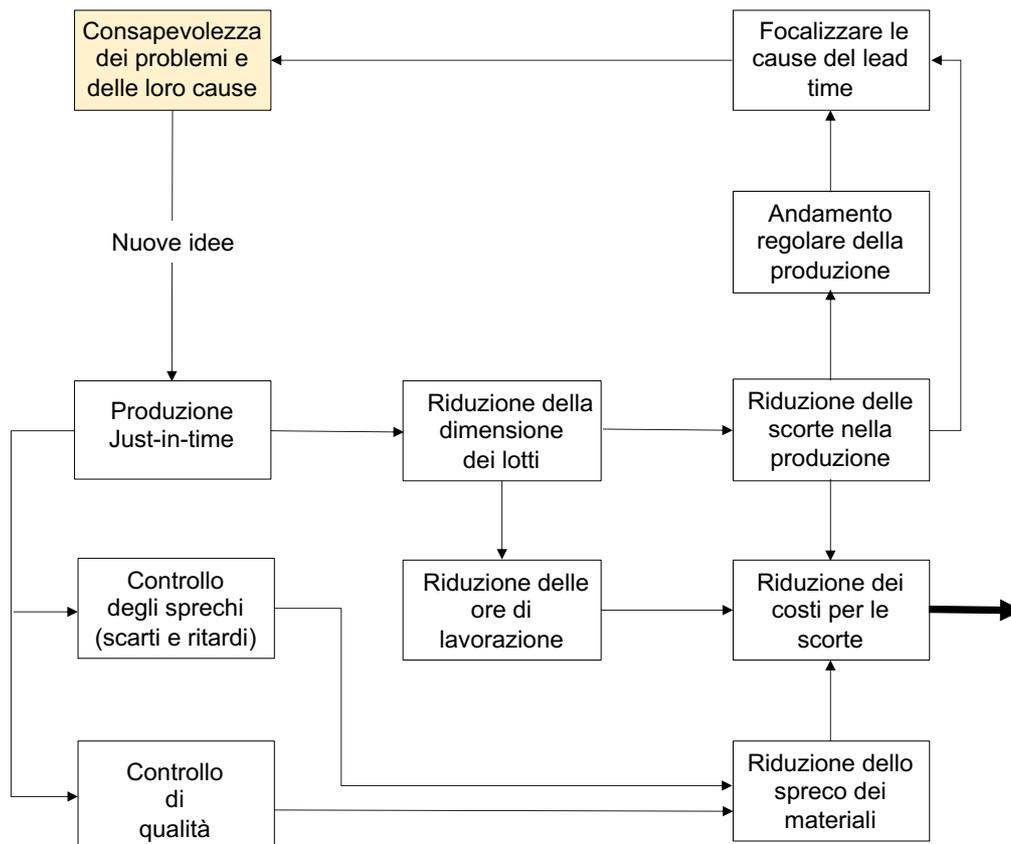


Fig. 4 – Il sistema JIT per il controllo delle scorte, del lead time e dei processi

9 – Just In Time e Stockless Production

Ritengo utile fare alcuni cenni agli interventi che devono essere attuati per realizzare un programma di Stockless production:

- 1) riduzione dei tempi di set-up;
- 2) sviluppo dei rapporti con i fornitori;
- 3) riprogettazione del lay-out;
- 4) operai polivalenti;
- 5) eliminazione dei difetti: qualità eccellente;
- 6) prodotti modulari;
- 7) livellamento della produzione;

8) customer satisfaction: la qualità della produzione è fondamentale per la soddisfazione del cliente e dovrebbe essere migliorata aggiungendo al prodotto tradizionale una serie di servizi complementari (Hall and Jackson 1992; Hum and Sim, 1996);

9) logica del *Kanban*.

Riduzione dei tempi di set-up. Nel sistema produttivo just-in-time il tempo di set-up (tempo di attrezzaggio) ha una particolare importanza in quanto tutti gli interventi volti a realizzare una produzione senza scorte hanno come obiettivo prioritario proprio la riduzione dei tempi di set-up. Per tempo di set-up si intende il tempo che intercorre tra la produzione dell'ultima unità di un dato articolo e la produzione della prima unità utile di un altro articolo che richiede diverse lavorazioni. Le attività di set-up comprendono sia gli interventi diretti sui mezzi di produzione, come la preparazione di un impianto o di una linea di assemblaggio, sia le operazioni relative agli aspetti organizzativi, e quindi l'approntamento delle materie prime, dei semilavorati e di tutta la documentazione relativa alle attività stesse (bolla di lavoro, disegno del particolare da avviare in produzione, ordine di controllo del particolare finito). La riduzione dei tempi di set-up consente una rotazione più veloce dei "codici" prodotti, in uno stesso periodo di tempo, su un impianto, su una linea o su un intero reparto; ciò rende conveniente la programmazione di cicli di lavorazione più brevi e, pertanto, la riduzione delle scorte di work-in-process e produce un effetto analogo sul livello degli stocks. È importante osservare che la riduzione dei tempi di attrezzaggio, oltre agli interventi sul prodotto e quindi sul progetto, consente di realizzare la *produzione livellata* ossia un programma di produzione che, in un certo periodo, risulta costante in volume e variabile nel mix, come osserveremo in seguito. Fu proprio Taiichi Ohno a ritenere che alla Toyota fosse necessaria una drastica riduzione dei tempi di attrezzaggio e, agli inizi degli anni settanta, furono ottenute riduzioni dei tempi di set-up veramente notevoli; su presse per lo stampaggio di parti in lamiera per automobili, il tempo di attrezzaggio venne ridotto, nell'arco di cinque anni, da circa un'ora a 12 minuti. Questo consentì di lavorare per un obiettivo ancora più ambizioso, il single set-up, cioè tempo di attrezzaggio in una sola cifra, quindi minore di dieci minuti; in alcuni casi, sempre in Toyota, si è giunti a tempi di attrezzaggio inferiori al minuto detti anche one touch set-up ovvero attrezzaggi istantanei (Smith & Reinartson, 1991).

Sviluppo dei rapporti con i fornitori. A prescindere dagli interventi operati sul processo produttivo e sulla gestione dello stesso, non può esserci una stockless production se non si interviene opportunamente sulle politiche di acquisto; le condizioni di fornitura vincolano, infatti, spesso in modo determinante, il livello degli stock di materie prime. Il JIT ha portato, di necessità, ad una revisione nei rapporti con i fornitori, coinvolgendoli nella pianificazione di breve e medio termine dell'impresa cliente, con lo scopo dichiarato di sviluppare un clima di reciproca fiducia e collaborazione nella gestione di materiali. L'obiettivo principale in un rapporto di fornitura di tipo JIT è l'*affidabilità* delle consegne e la loro 1 con il programma produttivo dell'impresa cliente. I fornitori vengono considerati alla stregua di "reparti esterni" all'impresa e pertanto assimilabili alle loro unità produttive, sia per miglioramento della produzione e della riduzione dei livelli di scorta, sia per la riduzione del costo complessivo di fornitura. Il controllo delle scorte non è più demandato solo ad una impresa ma all'intera "filiera" delle imprese che formano la *catena del valore* (Rich & Hines, 1997). Il tradizionale rapporto cliente-fornitore tende pertanto ad essere modificato allo scopo di realizzare la cosiddetta "partnership in profit", una relazione secondo la quale cliente e fornitore diventano quindi "soci in affari" e pertanto entrambi sono portati a valutare le opportunità di riduzione dei costi lungo l'intera catena logistico-produttiva. Un altro intervento che coinvolge direttamente i fornitori nel processo produttivo dell'impresa cliente è l'esternalizzazione del controllo di qualità di materiali e componenti dall'impresa acquirente al fornitore stesso, anche a fronte di un aumento del prezzo, poiché l'individuazione di difetti sugli input risulta tanto meno onerosa quanto più è tempestiva.

Riprogettazione del lay-out. Le prestazioni complessive di un sistema produttivo sono il risultato delle interazioni reciproche che si stabiliscono tra le sue componenti: mano d'opera, impianti e materiali. La soluzione organizzativa adottata più frequentemente nella progettazione e realizzazione delle strutture produttive è il *lay-out funzionale*, o per processo, che si basa sulla specializzazione delle funzioni e sulla massima produttività specifica delle singole operazioni. L'orientamento generale del just-in-time, nella progettazione del lay-out, è quello della cosiddetta *organizzazione per prodotto* che si basa sull'identificazione delle unità produttive, dei reparti e delle linee di impianti, con le caratteristiche del prodotto che deve essere ottenuto. Gli interventi necessari per realizzare la riprogettazione del lay-out di un'impresa possono essere di diversa ampiezza e riguardare l'ambiente tecnico di fabbricazione delle componenti, il processo di assemblaggio e l'intero stabilimento. La tecnica di cui si avvale il JIT nella progettazione del lay-out di fabbrica è la "group technology" con la quale si ottiene il passaggio da una organizzazione a "job shop funzionale" ad una organizzazione a "celle di fabbricazione". Attraverso la group technology si identificano i gruppi di impianti o di macchine che verranno in seguito dedicati alla produzione di una determinata "famiglia" di prodotti o anche solo di componenti. Il vantaggio più evidente che si ottiene, invece, con l'organizzazione a celle di fabbricazione, consiste nella notevole semplificazione del flusso dei materiali che si traduce in una notevole riduzione del lead time di produzione dovuta all'eliminazione dei tempi di attesa e alla diminuzione dei tempi di movimentazione.

Operai polivalenti. In un sistema produttivo del tipo JIT si tende a perseguire, oltre che la riduzione dei costi della manodopera, la *polivalenza* degli operai. Il primo obiettivo è perseguito sia con l'automazione delle operazioni sia attraverso il lavoro per piccoli gruppi. La scelta di avere operai polivalenti ha come obiettivo il miglioramento della flessibilità del sistema produttivo, essendo più semplice l'allocazione della manodopera a diversi impianti e per diversi compiti; ciò implica necessariamente anche la *rotazione* periodica delle posizioni di lavoro per consentire a ciascun lavoratore di apprendere il funzionamento di tutti gli impianti installati e formarsi una miglior comprensione delle fasi di ottenimento del prodotto e, in sostanza, una approfondita conoscenza del processo e del prodotto. Da un punto di vista organizzativo, ciò rende possibile assegnare uno stesso operaio a gestire più impianti contemporaneamente, con la riduzione dei tempi di attesa che si verificano in corrispondenza del cambio di lavorazione delle macchine. Un ulteriore vantaggio connesso con la flessibilità nell'assegnazione della manodopera a diversi compiti con un più rapido adattamento della capacità produttiva alle variazioni della domanda, soprattutto quando tali variazioni riguardano il *mix* piuttosto che i *volumi*

Eliminazione dei difetti: qualità eccellente. Diagrammi di Ishikawa. Poiché, come sappiamo, il controllo della qualità è fondamentale per l'efficienza economica dell'impresa, il JIT impone di non limitarsi al controllo dei prodotti finiti ma di concentrare sul *controllo di processo* che sia in grado di associare a ogni tipo di difetto, nel momento in cui questo si verifica, una causa ben precisa, in modo che questa possa essere rapidamente eliminata durante il (e non al termine del) ciclo di lavorazione. La ricerca delle cause dei difetti riscontrati in un "punto" del processo produttivo può essere facilitata seguendo la tecnica dei Diagrammi di Ishikawa – noti anche come diagrammi a lisca di pesce, o "fishbone diagrams" – che evidenziano le variabili causalmente o funzionalmente connesse ad altre variabili, creando un "albero di cause"; il difetto (sintomo) è posto quale radice dell'albero (o testa della lisca) e, procedendo a ritroso, si formano i rami (o le spine della lisca) sui quali sono evidenziate le variabili causanti, o di input. La Figura 5 evidenzia un Diagramma di Ishikawa generico (Ishikawa, 1969, 1976) nel quale la radice dell'albero è il sintomo o il problema mentre i rami principali rappresentano le cause evidenti, di primo ordine; i rami più minuti sono le cause di ordine successivo che influenzano le cause precedenti.

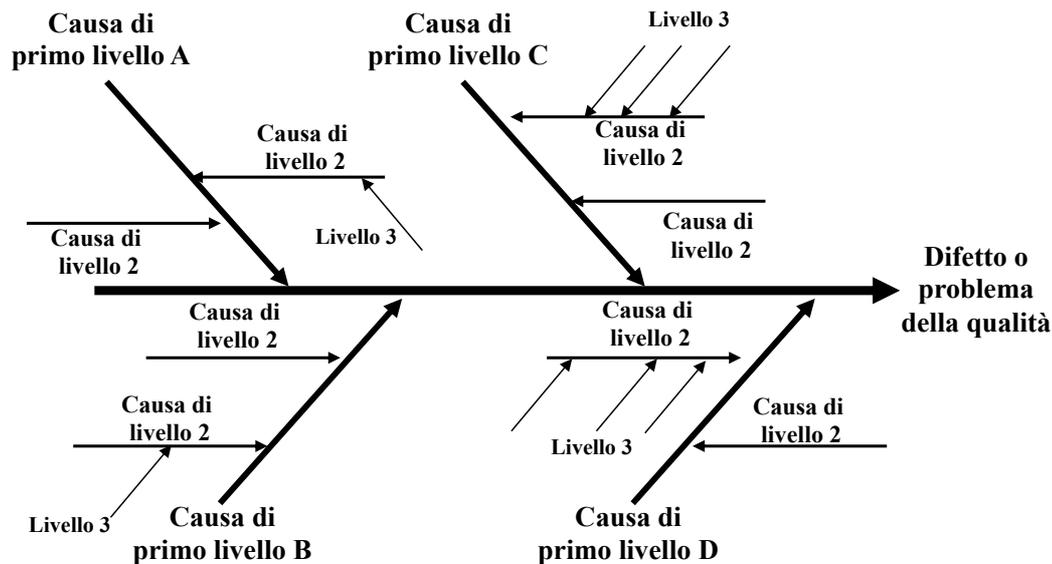


Fig. 1 – Struttura di un generico Diagramma di Ishikawa a "lisca di pesce", o "fishbone diagram"

Prodotti modulari. Per perseguire l'obiettivo economico della riduzione dei costi di produzione occorre agire a livello tecnico, soprattutto in fase di progettazione, con interventi di *standardizzazione* e *modularizzazione*. La *standardizzazione* è un processo organizzativo volto all'ottenimento di un elevato grado di uniformità nei prodotti o nei componenti. Si può distinguere tra: *semplificazione*, con l'obiettivo di ridurre l'eccessiva varietà di prodotti, e *unificazione* quando si ricerca l'ordinamento più razionale dei componenti attraverso una regolamentazione dei caratteri comuni e dei "requisiti di conformità". La *modularizzazione* è una tecnica che cerca di strutturare il prodotto come un insieme di "moduli" ai quali sia associabile una determinata funzione. Ogni modulo, a sua volta, può essere pensato come unità da scomporre in sotto moduli. Il vantaggio della modularizzazione è duplice: da un lato, si può progettare un flusso produttivo più semplice; dall'altro, è più agevole aggiornare continuamente il prodotto quando intervengono miglioramenti tecnologici senza dover modificare l'intero progetto; è sufficiente sostituire il modulo obsoleto con uno aggiornato avente gli stessi requisiti.

Livellamento della produzione. Nel campo delle vendite, il JIT viene applicato fornendo il prodotto destinato alla vendita solo nella quantità richiesta dal mercato. Questa condizione può essere realizzata attuando una produzione che si adegua prontamente alle evoluzioni del mercato. Lo strumento che consente di adeguare la produzione alle variazioni della domanda è il livellamento della produzione. Se la produzione è livellata, una linea produttiva non dovrà più produrre solamente un unico tipo di prodotto in grandi lotti; al contrario, una linea dovrà fabbricare ogni giorno molte varietà di arti colti in funzione della variabilità della domanda. In tal modo la produzione è sempre aggiornata e le scorte sono ridotte (*antea*, Par. 7).

Logica del Kanban. Il sistema di produzione just-in-time è tipicamente basato sulla logica pull in quanto la produzione risulta trainata dalla domanda finale. Per il controllo di produzione il JIT impiega il sistema "kanban", termine giapponese, significa "cartellino o scheda" che viene apposto su contenitori scorrevoli di pezzi di materie, o componenti o prodotti:

1) il *kanban prelievo* (scheda di movimentazione) autorizza il prelievo di un certo tipo e di una certa quantità di materiale da parte della lavorazione a valle; è sempre associato ad un contenitore standard e circola tra il punto di stoccaggio *esterno* e il punto di stoccaggio *interno* del centro produttivo utilizzatore;

2) il *kanban ordine di produzione*: autorizza la produzione per un volume di unità, pari a un contenitore standard, e viene emesso quando occorre sostituirne uno appena prelevato; viene utilizzato solo all'interno del centro produttore. Non appena, presso il centro utente, i pezzi sono tolti dal contenitore per essere lavorati, il kanban prelievo viene staccato e messo in un contenitore di raccolta. Quando si è accumulato un numero prefissato di kanban, oppure ad intervalli predeterminati, un operaio provvede a portarli presso la fase di lavorazione a monte, come autorizzazione per prelevare altri pezzi.

Si tratta, pertanto di un sistema informativo molto semplice che si prefigge di ottenere la regolazione del flusso dei materiali all'interno del processo produttivo consentendo di mantenere limitato il livello delle scorte in giacenza e, contemporaneamente, di soddisfare la domanda di mercato, adattando il livello delle attività produttive alle fluttuazioni che si manifestano nel mix e nel volume.

Come si legge sul sito "Kanban":

Il kanban è una tecnica della Lean Production (Produzione Snella) che rende possibile il Pull Flow (Flusso Tirato) dei materiali. Kan (看) significa "visuale", Ban (板) significa "segnale". Il kanban si basa infatti su dei cartellini fisici che consentono la produzione, l'acquisto o la movimentazione dei materiali. L'obiettivo del kanban è di evitare la sovrapproduzione che è lo spreco più impattante sulle performance di un sistema produttivo Kanban, 2020, online).

Due osservazioni: in primo luogo, mentre la produzione JIT può essere sviluppata anche senza un sottosistema kanban, quest'ultimo è funzionale al JIT in quanto la sua applicazione può avvenire solo in un contesto caratterizzato da bassi tempi di attrezzamento e da lotti molto piccoli; in secondo luogo oggi, dove ancora si applica la logica del kanban, i carrelli di trasporto si sono evoluti in veicoli a guida automatica, Automated Guided Vehicle, AGV, che in pratica sono robot a movimento semi-autonomo (Saputra & Rijanto, 2012; Ferreira & Gorlach, 2016); i kanban, come schede informative, sono sostituite da display scritti dal computer di controllo.

10 – La Customer Satisfaction, uno dei Pilastri del JIT. La "filosofia" del Kaizen

La qualità delle "produzioni terminali" delle imprese industriali manifatturiere, cioè produzioni di beni destinati al consumo (ma anche per le produzioni di servizi e per le produzioni "interne" di componenti e servizi), è fondamentale perché rappresenta la variabile da cui dipende il *valore percepito* dal cliente, o value for money (Hayes & Wheelwright 1984; Anon, 1985), inteso come la valutazione del rapporto tra qualità e prezzo prezzo, espresso dall'equazione seguente:

$$\text{Valore percepito dal cliente} = \text{qualità} / \text{prezzo del prodotto} \quad (1)$$

La qualità (il numeratore) condiziona il valore, a parità di prezzo (denominatore). Tuttavia, un incremento del livello di qualità consente alle aziende di produzione di aumentare il prezzo senza ridurre il valore percepito dal cliente (Wellemin, 1990). Pertanto, poiché la qualità condiziona i prezzi e il mercato, agendo sull'efficienza economica principalmente dal lato dei ricavi, essa diventa un driver fondamentale per la produzione di valore (insieme alla produttività, che condiziona il valore dal lato dei costi) in quanto il livello di *qualità percepito dal cliente* contribuisce in modo rilevante alle decisioni di acquisto, alla propensione del cliente a pagare il prezzo e a mantenersi "fedele" alla marca (eq. (1)). Per questo motivo, è vitale, per qualsiasi organizzazione produttiva, impostare un sistema affidabile di *gestione della qualità* come parte della strategia generale per la produzione di valore (Shetty 1987); questo sistema dovrebbe fissare obiettivi di "qualità" appropriati per il prodotto, rispetto al prezzo, e adottare un sistema per controllare il raggiungimento e il progressivo superamento di questi obiettivi (Deming 1989; 2012).

Practising quality control means developing, designing, producing and supplying quality products and services which are the most economical and most useful for the consumer, providing him continual satisfaction (Ishikawa, 1990).

Questa definizione evidenzia il fatto che le aziende devono ottenere il coinvolgimento dell'intera organizzazione nella Politica di Garanzia della Qualità (Taguchi, 1986, 1988). Ciò richiede:

... a positive attempt by the organizations concerned to improve structural, infrastructural, attitudinal, behavioural and methodological ways of delivering to the end customer, with emphasis on: consistency, improvements in quality, competitive enhancements, all with the aim of satisfying or delighting the end customer (Zairi 2010, p. 74).

La Quality Assurance non può essere solo un'esigenza produttiva, di marketing o economica, ma deve diventare l'obiettivo di una vera strategia di gestione della qualità totale, cioè del *Total Quality Management* (TQM) (Deming 1989), per assicurare il controllo di qualità a ogni livello aziendale, cioè il *Company-Wide Quality Control* (CWQC) (Ishikawa 1985; Ishikawa e Lu 1989) – considerata la versione giapponese di TQM. La strategia TQM deve coinvolgere l'intera struttura produttiva, personale e marketing (Oakland, 1989, 2014) nel controllo e miglioramento della qualità del prodotto e della produzione, coinvolgendo il top management, i direttori, i supervisori e i lavoratori di tutte le aree di attività (Sharma e Kodali 2008). Importante è anche il rapporto con clienti e fornitori, visti come motori per il miglioramento della qualità; i clienti danno suggerimenti per il miglioramento della qualità funzionale e i fornitori devono essere garanti della qualità progettuale (Mella, 2018b). La cultura della qualità si diffonde dai fornitori ai propri fornitori, così da permeare l'intera linea di produzione e interi settori aziendali. Armand Feigenbaum (1991) ha sviluppato una struttura in dieci punti per implementare il Total Quality Management, che è parallela ai 14 punti proposti da Deming (1989) (vedi sotto).

Feigenbaum, Deming e Ishikawa hanno dimostrato, in un quadro concettuale coerente, che il miglioramento della qualità non può essere efficacemente attuato attraverso un processo discreto – con innovazioni, spesso temporanee, nei prodotti e processi – ma deve essere conseguito mediante un processo continuo di "piccoli passi", denominato Kaizen (Imai 1986, Tanaka 1994), che produce una notevole evoluzione anche nel modo di concepire i rapporti tra i vari reparti o centri operativi interni all'azienda. Ogni centro deve garantire la massima qualità al centro a valle – suo "cliente" – e pretendere la massima qualità dal centro a monte – suo "fornitore" (Chiarini et al. 2018).

In termini molto generali, si può affermare che la visione giapponese del miglioramento della qualità, ormai diffusa in tutto il mondo, nasce dalla peculiare concezione dei fattori di successo competitivo per le aziende. Come mostra la Tabella 2, le *aziende occidentali*, quando ancora legate a schemi tradizionali, interpretavano il profitto come un obiettivo fondamentale della gestione aziendale (come viene insegnato, ancora oggi, nei corsi di management in molte università occidentali), mentre la qualità, insieme alla produttività, veniva considerata la condizione necessaria per il raggiungimento del profitto. Nelle *aziende giapponesi*, orientate alla qualità come fattore chiave del successo competitivo, la relazione profitto-qualità deve essere invertito: il "vero" obiettivo dell'azienda è la *customer satisfaction*, che si raggiunge attraverso la qualità dei prodotti; il profitto è un "premio" per raggiungere la qualità; è solo una conseguenza del raggiungimento della soddisfazione del cliente, se la gestione è supportata anche da adeguati valori di produttività. Questa diversa visione del ruolo della qualità porta, pertanto, a diversi modi di perseguire la qualità (Deming 2012):

– l'Occidente ritiene che la qualità debba essere raggiunta attraverso un processo discreto, attraverso grandi innovazioni (spesso occasionali) nei prodotti e nei processi;

– in Oriente, invece, la ricerca della qualità deve essere un processo continuo, per piccoli passi: il Kaizen, appunto.

Tab. 2 – Due “visioni” della qualità (fonte: adattamento da Mella,1 997, p. 225)

Western Firm. Quality must be controlled	Japanese Firm. Jit and Kaizen
The firm survives if it makes a profit (adequate profitability)	The firm survives only if the customer is satisfied (customer satisfaction)
Profit is the primary objective of the businessman	Quality is the primary objective; profits are the premium for competitive success
Quality affects revenues	Quality affects customer satisfaction
The search for quality entails costs	Quality has no cost if it “is arises” at the beginning
Quality must be controlled by a specific organ or center	Quality must involve the entire organization
Workers must be controlled; otherwise, there will be a decline in quality	Workers are the first controllers of quality
Suppliers must be controlled; otherwise, the supplies will be of low quality	Suppliers must be involved in the search for quality
The product must be controlled	The product must emerge already with the maximum quality and be improved through suggestions from the customers
Customers must be assisted after delivery	Customers must contribute to improving the product by pointing out defects or suggesting improvements

William Edwards Deming, che viene riconosciuto come il “padre” del movimento giapponese verso la “cultura della qualità”; proponendo la logica di Total Quality Management ha cercato di diffondere tale cultura anche nel mondo occidentale. Per aiutare il management a prendere consapevolezza della necessità e della possibilità di modificare la propria tradizionale cultura manageriale, Deming ha enunciato “14 key principles for management” proponendo il “sistema della Profound Knowledge” (Deming 2018), che si basa su una concezione “olistica” della funzione del manager fondata su quattro “pilastri”:

- appreciation for a system (cioè, Systems Thinking),
- knowledge of variation (cioè, applicare la Control Theory),
- theory of knowledge (cioè, pensare per modelli),
- psychology (cioè, fare emergere i modelli mentali e motivare).

What we need is cooperation and transformation to a new style of management. The route to transformation is what I call Profound Knowledge (Deming Institute 2020, online). The first step is transformation of the individual. This transformation is discontinuous. It comes from understanding of the system of profound knowledge. The individual, transformed, will perceive new meaning to his life, to events, to numbers, to interactions between people (ibidem).

I “14 points” enunciati da Deming sono molto articolati e non si prestano qui a una, pur sintetica, analisi; li enuncio solamente:

1. Create constancy of purpose toward improvement; 2. Adopt the new philosophy; 3. Cease

dependence on inspection to achieve quality; 4. End the practice of awarding business on the basis of price tag. Use a single supplier for any one item. 5. Improve constantly and forever the system of production and service; 6. Institute training on the job; 7. Institute leadership; 8. Eliminate fear. 9. Break down barriers between departments; 10. Eliminate slogans, exhortations and targets for the work force asking for zero defects and new levels of productivity; 11. Eliminate management by objectives; Substitute leadership; 11. Eliminate management by objective. Substitute workmanship; 12. Remove barriers to pride of workmanship; 13. Institute a vigorous program of education and self-improvement; 14. Put everyone in the company to work to accomplish the transformation. The transformation is everyone's work (Deming 1989, Chap. 2).

La "filosofia" del kaizen è fondamentale comprendere le politiche di controllo della produzione, della produttività e della qualità che hanno prodotto la crescita dell'industria giapponese e della logica del Toyotismo. Il termine "Kaizen" è stato introdotto da Masaki Imai (1986), in *Kaizen, the key to japan's competitive success*, per indicare il concetto/processo di "miglioramento continuo, o "continuous improvement".

KAIZEN means improvement. Moreover, it means continuing improvement in personal life, home life, social life, and working life. When applied to the workplace KAIZEN means continuing improvement involving everyone – managers and workers alike" (Kaizen Institute 2020, online. <https://www.kaizen.com/what-is-kaizen.html>).

Kaizen è il miglioramento graduale e continuo delle prestazioni dei processi attraverso il coinvolgimento dei lavoratori a tutti i livelli organizzativi per il raggiungimento degli obiettivi di qualità e produttività (Deming 1989; Imai 1986; Tanaka 1994). Nel 2007, Imai, nel volume *Gemba Kaizen: A Commonsense, Low-Cost Approach to Management*, affermò che il Kaizen deve essere applicato sul luogo dove si svolge "il vero lavoro", per apportare reali miglioramenti all'organizzazione dell'azienda. Con le parole "Gemba Kaizen" Imai identificava gli innumerevoli "piccoli miglioramenti" quotidiani che vengono apportati al posto dove si fa "il vero lavoro" che, ad esempio, nel settore produttivo, potrebbe essere la linea di assemblaggio mentre, nel settore dei servizi, l'ufficio dove gli impiegati interagiscono con i clienti.

11 – L'Optimized Production Technology. OPT

L'Optimized Production Technology (Jacobs, 1983; OPT, 2000) è una metodologia di controllo della produzione che mira a ridurre tempi e costi di produzione. La tecnica è stata introdotta da Eliyahu Goldratt come Theory of Constraints (TOC) nel suo libro *The Goal* (Goldratt & Cox 1984), che ha avuto in immediato successo (Balderstone & Mabin, 1998), seguito dal libro intitolato *What Is This Thing Called Theory of Constraint and How It Should Be Implemented* (Goldratt 1990).

The TOC analyses the constraints according to an organizational perspective, focusing on the consequences that removing the constraint would have on company results. The TOC encourages managers to channel their efforts into the reduction of bottlenecks, and constraints in general, by investing resources into their elimination, starting from the biggest constraints. The continuous process of removing constraints tends to affect ever larger company sub-systems, thus stimulating cross-functional coordination and cooperation (Moisello, 2012).

Operativamente, l'OPT si pone il duplice obiettivo di:

- programmare la sequenza ottimale delle operazioni dei diversi reparti e dei diversi centri operativi, tenendo conto sia della capacità produttiva esistente, sia delle priorità delle differenti operazioni;
- individuare l'impiego ottimale delle risorse critiche e degli impianti, nonché il modo di minimizzare gli stock delle lavorazioni in corso (*work in process*).

L'OPT, contrariamente a MRP e JIT, ritiene fondamentale programmare la produzione tenendo conto, in via prioritaria, tanto della capacità produttiva esistente, quanto delle priorità

delle operazioni da attuare, permettendo di ottimizzare l'impiego delle risorse critiche e dei carichi di lavoro, la riduzione dei tempi di lavoro umano e degli impianti, nonché di minimizzare i magazzini *dei work in process* e la riduzione dei costi relativi. L'OPT si presenta come un programma implementato su un mainframe che affronta il problema dell'ottimizzazione complessiva della produzione mediante una serie di programmi parziali tra loro connessi, ciascuno preposto alla ricerca dell'ottimo in una specifica area di produzione, analizzando le risorse considerate *critiche*, oppure i *colli di bottiglia* potenziali rappresentati dal personale o dalle macchine.

La programmazione OPT elabora un *master program* che tenta di pervenire a un'ottimizzazione globale della produzione tramite le ottimizzazioni locali: in un tempo ridotto si può ottenere il programma giornaliero locale per numerosi centri operativi. La procedura considera, sequenzialmente, e a intervalli fissi di tempo, come si dovrebbero usare i fattori produttivi disponibili, al fine di rispettare le richieste, dopo avere stabilito le priorità per ogni operazione, utilizzando funzioni ponderate di un certo numero di variabili, quali:

- l'assortimento dei prodotti desiderati
- le scadenze da rispettare
- la scorta di sicurezza da mantenere
- l'uso di risorse che presentano rischi di strozzatura.

Sulla base dell'elenco dei prodotti da ottenere, disposti secondo la loro priorità, il programma alloca conseguentemente le risorse, con l'obiettivo di avviare o di continuare con la produzione dei prodotti con maggiore priorità, considerando continuamente la disponibilità degli input produttivi nell'intervallo considerato. L'ottimizzazione dei carichi di lavoro, la riduzione del magazzino, l'accorciamento dei tempi di lavoro e la riduzione dei costi relativi diventa allora un effetto di questo Sistema di Controllo, e non un obiettivo, come nel MRP e nel JIT. Il programma dell'OPT, pertanto, prova il carico di lavoro esistente e mette quindi in evidenza le strozzature della capacità degli impianti o l'inadeguato uso delle risorse in presenza di operazioni che generano colli di bottiglia.

Questa ottimizzazione *globale* tramite ottimizzazioni *locali* richiede solamente informazioni parimenti locali, con il vantaggio di ridurre la quantità di informazioni da gestire e l'aumento della tempestività delle risposte del programma. Inoltre, non è richiesta una programmazione analitica per tutti i reparti ma solo per quelli *critici*, nei quali sono presenti "strozzature". La simulazione del sistema può, comunque, essere affiancata all'MRP; ciò consente di coordinare i piani generati dall'OPT con la programmazione di risorse non problematiche, rendendo flessibile l'ottimizzazione al variare delle condizioni, con notevoli vantaggi di produttività e di economicità complessiva. Un altro vantaggio dell'OPT è quello di non richiedere un *coinvolgimento totale* dell'organizzazione come negli altri metodi, anche se l'effetto è quello di aumentare l'efficienza degli operatori. La fissazione degli intervalli temporali di tempo in cui si segmenta l'analisi avviene sulla base dell'entità minima di lavoro che il management ritiene debba essere programmata (per esempio un minimo di 4 ore di lavoro per ogni macchina o operaio); ogni intervallo minimo viene poi convertito in una quantità minima di output che deve essere ottenuta o trasferita per ciascuna operazione.

Complessivamente l'OPT, consente l'elaborazione di programmi in un tempo ridotto; la velocità di programmazione è superiore a quella dell'MRP ma normalmente il sistema OPT si dimostra più efficiente nel caso di pochi prodotti fondamentali con lotti di grandi dimensioni, ciascuno dei quali richieda, tra l'altro, un numero limitato di operazioni. Poiché, inoltre il programma non considera i costi di gestione, non dovrebbe essere utilizzato per prendere decisioni strategiche a lungo termine quali acquisto di nuove attrezzature o licenziamento/assunzione di personale; queste ultime dovrebbero essere assunte con analisi e calcoli non rientranti ne programma.

12 – I Flexible Manufacturing System (FMS) e gli Holonic Manufacturing Systems (HMS)

I Flexible Manufacturing System, FMSs (Lee, 1993; Boer & Krabbendam, 1992; Kusiak, 1986; Genus, 1995; Christopher, 2000), che si avvalgono ampiamente delle possibilità offerte dai robot e dai sistemi dotati di *intelligenza artificiale* nei processi industriali, rappresentano un ulteriore sviluppo delle tecniche di controllo della produzione. Grazie a un'automazione elevata e a una potenza di calcolo in precedenza non ottenibile, i FMS integrano e razionalizzano molte delle più importanti funzioni produttive: carico, scarico e magazzinaggio delle componenti e dei sottoassiemi, cambio automatico delle attrezzature e degli utensili, lavorazioni dei macchinari macchina, attività di elaborazione dati dei processi di fabbricazione, coordinamento del personale, e così via. Programmando contemporaneamente:

- carico, scarico e stoccaggio delle componenti e dei sottoassiemi,
- cambio automatico delle attrezzature e degli utensili,
- sequenza delle lavorazioni a macchina,
- attività di elaborazione dati dei processi di fabbricazione,

i FMS sono in grado di arrivare alla formazione di linee di stoccaggio e produttive completamente automatizzate integrando la programmazione e il controllo delle macchine operative in un sistema computerizzato di *controllo integrato* che porta alla programmazione ottimale delle lavorazioni e dei lotti e alla minimizzazione del lead time dei materiali e del “prodotto all'interno” del sistema. L'integrazione del controllo ha come effetto una notevole flessibilità delle capacità produttive della linea automatizzata che può consentire di ottenere una grande varietà di parti o di componenti diversi richiesti dalle esigenze produttive nella quantità e nei tempi ottimali con una razionalizzazione dei tempi, delle lavorazioni, dei costi e con un aumento della produttività e della qualità. Per superare le strozzature produttive si attiva una programmazione che sfrutta compiutamente tecniche.

L'estrema evoluzione degli FMS è la fabbrica automatizzata, nella quale tutti i flussi fisici e tutte le lavorazioni risultano programmate in forma integrata, e che si avvale di alcuni strumenti tipici (Buzacott & Yao, 1986) dei quali faccio un cenno:

Macchine utensili a controllo numerico. Il controllo numerico consente l'esecuzione, da parte di una macchina, di una predeterminata sequenza di lavorazioni e permette inoltre il controllo della corretta esecuzione delle operazioni compiute in ogni stazione di lavoro. Una macchina a controllo numerico – tramite sensori, sistemi di visione, lettori di codici o piastrine magnetiche – è generalmente in grado di identificare i pezzi in arrivo da un determinato centro, preparandosi ad eseguire il corretto programma di lavorazione. Con quegli apparati è anche in grado di attuare la trasmissione al calcolatore centrale di informazioni sul numero di pezzi lavorati, sullo stato degli utensili e sugli errori di lavorazione. Tenendo sotto continuo controllo l'usura degli utensili, la macchina determina, inoltre, automaticamente, il loro posizionamento per la corretta esecuzione delle operazioni.

Robot industriali. Sono macchine di manipolazione automatica (automi), sempre più perfezionate sia per precisione che per ripetibilità, programmabili ed in grado di eseguire una serie di operazioni con elevata flessibilità e governabilità e rappresentano una speciale classe di macchine tecnologicamente evolute, per compiere operazioni programmate in un sistema di produzione totalmente automatico. I robot consentono alti livelli di flessibilità in quanto possono interagire tra loro e con altre attrezzature periferiche sincronizzate attingendo da una “libreria” di programmi condivisa con altre macchine, integrando il funzionamento del processo produttivo.

Sistemi automatizzati di movimentazione. Un sistema di movimentazione automatizzata di pezzi e di utensili consente maggiore flessibilità e ridotti lead time, con conseguente contenimento delle scorte di prodotti in lavorazione. I FMS fanno ampio ricorso agli AGV (automated guided vehicle), guidati da sistemi ad infrarosso o a induzione, che possono eseguire autonomamente e a velocità controllabile, tutte le operazioni di carico e scarico, con possibilità di programmarne i percorsi da tutti i computer della fabbrica (Ferreira & Gorlach, 2016). L'AGV conferisce, pertanto, flessibilità al trasporto, potendo stabilire e riconfigurare percorsi complessi con grande facilità, in tempi brevi e a costi contenuti.

Magazzini automatizzati. Nella produzione flessibile possono essere stoccati pezzi diversificati e venire utilizzati utensili con differente grado di usura ma il sistema deve conoscere in ogni momento la posizione e lo stato dei singoli pezzi stoccati. Il sistema di immagazzinamento automatizzato consente di ottenere apprezzabili vantaggi in termini di riduzione del lavoro umano, dell'occupazione dello spazio disponibile e dell'entità delle scorte. Un magazzino automatizzato è generalmente gestito da un computer collegato con una base di dati, che rende disponibili, in tempo reale, informazioni sullo stato di ogni unità stoccata. Queste informazioni possono riguardare le celle di stoccaggio o le singole unità; nel primo caso è possibile conoscere il numero di pezzi giacenti in magazzino, il livello di saturazione, la posizione dei singoli codici e le celle vuote; nella seconda ipotesi, le informazioni fornite sono relative alla natura ed allo stato di ogni componente occupante la cella; ciò consente l'aggregazione dei dati e l'ottenimento di indici di rotazione per ogni codice, con la possibilità di valutarne il rischio di esaurimento.

Come evoluzione degli FMS si possono fare rientrare gli *Holonic Manufacturing Systems* (HMS) (Adam et al., 2002; Kawamura, 1997) che rappresentano il prototipo di *agile manufacturing systems* (Christopher, 2000; Leitão Restivo 2006);

ovvero, sistemi di produzione automatizzati e altamente flessibili che, facendo ampio ricorso a macchine, robot, celle di lavoro e unità di lavoro semi autonome, sono in grado di affrontare i rapidi cambiamenti che tutte le imprese manifatturiere di produzione meccanizzata, devono affrontare: varietà e incertezza della domanda, cambiamenti nei gusti, riduzioni del ciclo di vita e necessità di ridurre il time to market (Mason et al., 1999).

Agile Manufacturing is primarily a business concept. Its aim is quite simple - to put our enterprises way out in front of our primary competitors. In Agile Manufacturing, our aim is to combine our organisation, from this integrated and coordinated whole for competitive advantage, by being able to rapidly respond to changes occurring in the market environment and through our ability to use and exploit a fundamental resource - knowledge (Kidd, 2000 online; see also: Sanchez and Nagi 2001).

People and technology into an integrated and coordinated whole. We will then use the agility that arises from this integrated and coordinated whole for competitive advantage, by being able to rapidly respond to changes occurring in the market environment and through our ability to use and exploit a fundamental resource - knowledge (Kidd, 2000 online; see also: Sanchez & Nagi, 2001).

Gli HMS sono costituiti da *centri operativi relativamente autonomi*, denominati *holons*, in grado di interagire tra di loro e con l'ambiente esterno per lanciare e gestire gli ordini per coprire i fabbisogni per la produzione e per interagire con i clienti destinatari delle produzioni.

[...] the three fundamental functions of a Holon. These are Planning, Execution and Monitoring. They have to be performed by all Holons in order to be able to act autonomously. Thus they have to be able to compile their own plans and execute them while monitoring their progress. [...] Furthermore the functionality is attributed to the Holons, which also consist of the physical shop floor equipment and materials. Thus Order holons also have this functionality, which allows the planning of the production flow to be performed in co-ordination by both material and resources in contrast to traditional systems... (Stylios et al., 2000).

Per lo studio dell'HMS è stata creata un'associazione che ha definito le specifiche tecniche, informative e operative perchè una rete di macchine possa considerarsi un HMS (Mařík et al., 2011, p. 206). Le "specifiche tecniche" del Consorzio HMS forniscono le definizioni seguenti (Adam et al. 2002):

Holon: An autonomous and cooperative building block of a manufacturing system for transforming, transporting, storing and/or validating information and physical objects. The holon consists of an information processing part and often a physical processing part. A holon can be part of another holon.

Autonomy: The capability of an entity to create and control the execution of its own plans and/or strategies.

Cooperation: A process whereby a set of entities develops mutually acceptable plans and executes these plans.

Un insieme di blocchi che in parallelo producono materiali o servizi simili forma un modulo; diversi moduli possono costituire un *olone di ordine superiore* che a sua volta può essere incluso in altri blocchi di livelli ancora più elevati. Gli oloni sono caratterizzati da attributi tecnici e informativi che consentono la pianificazione e l'esecuzione delle loro funzioni, nonché il coordinamento con altri oloni. L'Holonic Manufacturing System attraverso i suoi blocchi di componenti, integra l'intera gamma delle attività produttive, dalla pianificazione alla fornitura, dalla produzione al marketing alla logistica. Nella sua configurazione più semplice (Kanchanasevee et al., 1997) un HMS per un'azienda manifatturiera orientata al mercato comprende tre tipologie di oloni: gli *oloni di produzione*, che per i prodotti a catalogo e le loro componenti (sub-oloni) svolgono i processi produttivi; i *resource holons*, che specificano le risorse disponibili per la produzione e provvedono agli approvvigionamenti; gli *oloni ordine*, che identificano la domanda del mercato e cercano di soddisfare le quantità richieste. Gli *oloni di produzione* che costituiscono i processi produttivi di un HMS possono essere schematizzati come in Figura 6.

Gli HMS possono essere considerati veri e propri Computer-Integrated Manufacturing (CIM) Systems, vale a dire sistemi produttivi integralmente controllati da computer, i cui programmi sono in grado di regolare ogni momento del flusso della produzione: la progettazione, le fasi degli approvvigionamenti, il *materials handling* della lavorazione, lo stoccaggio, il controllo dei costi e la contabilità industriale, anche nei casi di lavorazioni multiple contemporanee, come avviene nelle imprese automobilistiche, di velivoli, spaziali e di navigazione (Lei & Goldhar, 1991).

13 – Conclusioni

In questo lavoro ho presentato i più diffusi "sistemi" ("tecniche", "metodologie" e "filosofie") per il controllo della produzione e degli stock, senza analizzarne gli aspetti tipicamente ingegneristici. Il relativamente elevato numero dei "sistemi" presentati rende evidente che:

– quello del controllo della produzione – flussi, processi, metodi e tecniche produttive – è il problema più rilevante nelle aziende di produzione manifatturiere;

– lo sforzo fatto dalle imprese per affrontare questa forma "vitale" di controllo si è concretizzato in una progressiva *evoluzione* dei "sistemi" elaborati;

– questa *evoluzione* ha portato ad un ampliamento della potenzialità di tali sistemi che si sono gradualmente espansi ad aree aziendali sempre più ampie, integrando nello stesso "sistema" forme di controllo prima separate: produzione, stock, logistica in entrata e in uscita, rapporti con i fornitori e con i clienti; dal controllo della produzione si è arrivati al controllo dell'intera supply chain;

– un'importante evoluzione dei sistemi di controllo della produzione, che ha prodotto un

notevole miglioramento, è stata la transizione dalla logica “push”, tipica del MRP, alla logica “pull”, tipica del JIT;

– da un punto di vista dell’implementazione dei sistemi di controllo, l’evoluzione è stata resa possibile dalla sempre maggiore potenza degli strumenti *informatici* che ha consentito di aumentare la velocità e la pervasività della programmazione e del controllo e di costruire sistemi *informativi* integrati tra produzione, stock e flussi di materie, componenti, prodotti, disponibilità di tempo macchina e di lavoro umano.

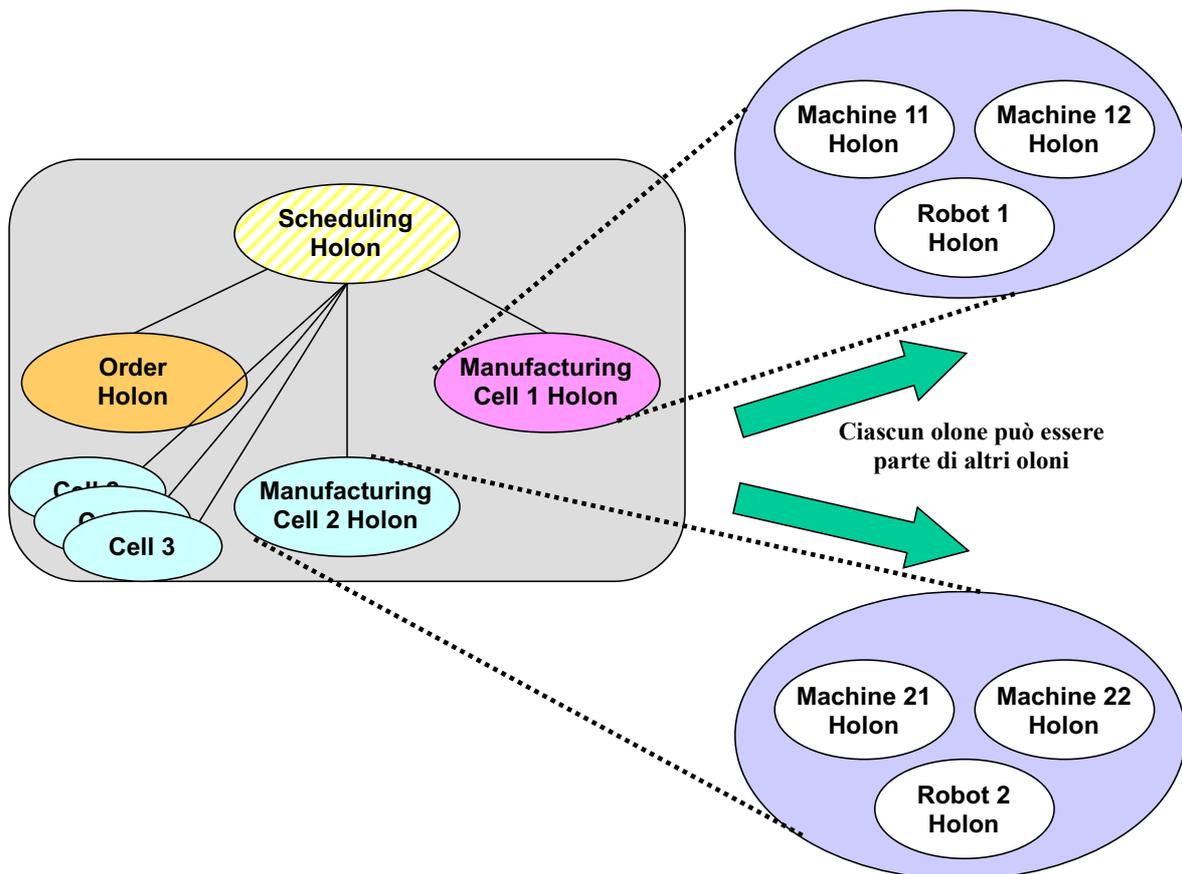


Fig. 6 – Moduli olonici di un sistema di HMS (source: Mella, 2009)

Mi sembra opportuno concludere questo studio con un cenno al più pervasivo e utilizzato sistema *informativo* per l’aumento dell’efficienza dei sistemi di controllo delle imprese, l’Enterprise Resource Planning (ERP), un sistema informatico in grado di raccogliere, elaborare e migliorare tutte le informazioni necessarie per la gestione aziendale e per il controllo, in particolare. Il sistema ERP è “polivalente” in quanto contiene moduli che supportano il maggior numero possibile di processi aziendali: dai processi di gestione dei materiali e delle merci – approvvigionamento, stoccaggio e programmazione degli utilizzi – ai processi delle vendite e delle consegne; dal controllo della produzione – tempi, flussi e assemblaggio e costi di ciascuna fase di lavorazione – al controllo del marketing; dalla gestione dei dati di prodotto e dei materiali alla documentazione e alla reportistica strutturata; dalla pianificazione di produzione, acquisti e vendite, al relativo controllo di processi e flussi; dal controllo degli stock alla logistica; dalla contabilità clienti, fornitori, banche, incassi e pagamenti alla contabilità finanziaria e industriale.

Una funzione rilevante dei sistemi ERP è la possibilità di effettuare *simulazioni* dei processi sopra indicati, prima ancora di accettare gli ordini e di iniziare la produzione, consentendo di *identificare* tempestivamente ed *eliminare* rapidamente, prima che si manifestino, eventuali

vincoli di utilizzo delle macchine, colli di bottiglia, ed errori in tutte le fasi della produzione e della logistica. Il sistema ERP consente anche di tempificare le operazioni, tempi logistici e l'efficiente uso mezzi di trasporto; si rivela, pertanto, essenziale per l'efficienza della produzione, dell'impiego di risorse umane (buste paga, turnazione e performance misurabili) e della supply chain, consentendo di elaborare "dashboard" (Mella, 2014a) che forniscono ai manager una overview dei dati finanziari utili per evidenziare le aree di successo e quelle problematiche.

Infine, mi sembra anche utile osservare che i sistemi ERP costituiscono lo strumento più efficiente per attuare il "Business Process Reengineering" (BPR) e per supportare i processi di "Change Management", che portano a una maggiore efficienza produttiva e organizzativa. Ricordo che il termine Business Process Reengineering (BPR) è stato introdotto da Hammer & Champy (1990, 1993) e Davenport & Short, (1990) come metodologia per gestire le trasformazioni delle imprese al fine di analizzare i processi e scoprire nuovi modi per aumentarne le prestazioni (Davenport, 1993). Per Hammer e Champy (1993) il BPR è "*the fundamental rethinking and radical redesign of business processes to achieve dramatic improvements in critical modern measures of performance, such as cost, quality, service, and speed*" (p. 1-9). Davenport e Short (1990) ritengono che potrebbe anche essere interpretato, non-solo, come "*analysis and design of processes in order to maximize customer value while minimizing the consumption of resources required for delivering their product or service*" (p. 5), ma anche come metodo che "*encompasses the envisioning of new work strategies, the actual process design activity, and the implementation of the change in all its complex technological, human, and organizational dimensions*" (p. 7).

Per questo motivo, il BPR potrebbe essere pensato come parte di un processo di Change Management che in tempi di rapido cambiamento diventa fisiologico, per individui (Lewin, 1947a, b), gruppi sociali e organizzazioni (Senge, 2006), e rappresenta l'approccio naturale per affrontare il cambiamento sia a livello individuale che organizzativo per tutti i tipi di organizzazione (Hiatt, 2006).

A change towards a higher level of group performance is frequently short lived; after a 'shot in the arm,' group life soon returns to the previous level. This indicates that it does not suffice to define the objective of a planned change in group performance as the reaching of a different level. Permanency at the new level, or permanency for a desired period, should be included in the objective. (Lewin 1947a, p. 228)

14 – References

- Ackerman, K. (2015 online). *Practicing Pareto practically in the warehouse*.
<https://exclusive.multibriefs.com/content/practicing-pareto-practically-in-the-warehouse/distribution-warehousing>.
- Adam, E., Mandiau, R., & Kolski, C. (2002). *Une Methode de modelisation et de conception d'organisations Multi-Agents holoniques*, Paris, Hermes.
- Adam, E. E. & Ebert, R. J. (1992). *Production and operations management*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.
- [Anon]. (1985). *Quality and Value for Money*. National Economic Development Council, London.
- Anthony, R. N. (1965). *Planning and control systems: Framework for analysis*. Boston, MA: Harvard University.
- Arsham, H. (2006). *Economic Order Quantity and Economic Production Quantity*. London Uk Wiley
- Axsäter, S. (2015). *Inventory control*. Springer International Publishing Switzerland
- Azzi, A., Battini, D., Faccio, M., Persona, A., & Sgarbossa, F. (2014). Inventory holding costs measurement: a multi-case study. *The International Journal of Logistics Management*.
- Balderstone, S. J., & Mabin, V. J. (1998). *A Review of Goldratt's Theory of Constraints (TOC)—lessons from the international literature*. In Operations Research Society of New Zealand 33rd Annual Conference.

- Ballé, M. (2015, online). *Organizing for learning is critical to sustaining your kaizen efforts and improving your company*. <https://planet-lean.com/learning-organization-kaizen-stick/>
- Ballou, R. H. (1967). Improving the physical layout of merchandise in warehouses. *Journal of Marketing*, 31(3), 60-64.
- Benton, W. C. & Shin, H. (1998). Manufacturing Planning and Control: The Evolution of MRP and JIT Integration. *European Journal of Operational Research*, 110(3), 411-440.
- Beretta, V., & Navaroni, M. (2017). Controllo delle scorte-Modelli di ottimizzazione. *Economia Aziendale Online*, 7(4), 305-329.
- Blackburn, J. D. (1991). *Time-Based Competition: The Next Battleground*. In American Manufacturing. Homewood Irwin,
- Boer, H. & Krabbendam, K. (1992). Organizing for Manufacturing Innovation. The case of Flexible Manufacturing Systems, *International Journal of Operations & Production Management*, 12(7/8), 41-56.
- Brickman, L. (2012). *Mathematical introduction to linear programming and game theory*. Springer Science & Business Media.
- Browne, J., Dubois, D., Rathmill, K., Sethi, S. P., & Stecke, K. E. (1984). Classification of flexible manufacturing systems. *The FMS magazine*, 2(2), 114-117.
- Buzacott, J. A. & Yao, D. D. (1986). Flexible Manufacturing Systems: A Review of Analytical Models, *Management Science*, 32(7), 890-905
- Cheng, T. C. E. (1991). An economic order quantity model with demand-dependent unit production cost and imperfect production processes. *IIE transactions*, 23(1). 23-28.
- Chiarini, A. (2010). *Lean organization for excellence*. Milan, Italy: Franco Angeli
- Christopher, M. (2000). The Agile Supply Chain. Competing in Volatile Markets. *Industrial Marketing Management*, 29(1), 37-44.
- Chiarini, A., Baccarani, C., & Mascherpa, V. (2018). Lean production, Toyota production system and kaizen philosophy. *The TQM Journal*. 30(3). <https://doi.org/10.1108/TQM-12-2017-0178>
- Chu, P., Chung, K. J., & Lan, S. P. (1998). Economic order quantity of deteriorating items under permissible delay in payments. *Computers & Operations Research*, 25(10), 817-824.
- Clark, A. J. (1972). An informal survey of multi-echelon inventory theory. *Naval Research Logistics (NRL)*. 19(4), 621-650.
- Dantzig, G. B. (1963). *Linear programming and extensions*. Princeton, NJ: Princeton university Press. <https://doi.org/10.7249/R366>.
- Davenport, T. (1993). *Process innovation*. Boston, Harvard Business School Press.
- Davenport, T. H., & Short, J. E. (1990). The new industrial engineering: information technology and business process re-design. *Sloan Management Review*, 31, 411-27.
- Del Favero, M. (2010). *Il controllo di gestione nelle aziende di produzione in serie* [Management control in mass production companies]. Milano, Italy, IPSOA.
- Deming, W. E. (1989, 1st Ed. 1982, 2nd Ed. 1986). *Out of the Crisis. Quality, productivity and competitive position*. MA: MIT center for Advanced Engineering Study: MIT Press.
- Deming, W. E. (2012). *The essential Deming: leadership principles from the father of quality*. McGraw Hill Professional.
- Deming, W. E. (2018). *The new economics for industry, government, education*. MIT press.
- Deming Institute. (2020). The Edwards Deming Institute. *The Deming System of Profound Knowledge*. <https://deming.org/explore/sopk/>

- De Toni A., Caputo M., & Vinelli, A. (1988). Production Management Techniques: Push-Pull Classification and Application Conditions. *International Journal of Operations & Production Management*, 8(2), 35-51.
- Durlinger, P. P. J., & Paul, I. (2012). *Inventory and holding costs*. Durlinger Consultant, 1.
- Elejabarrieta, J. B. (1998). MRP-3 Concurrent integration of planning and scheduling in OKP (one of a kind production). *Advances in Production Management Systems* (pp. 163-170). Boston, MA, Springer.
- Eroglu, A., & Ozdemir, G. (2007). An economic order quantity model with defective items and shortages. *International journal of production economics* 106(2), 544-549.
- Farné, S. (2010). *Qualità operativa. Ottimizzare per competere e raggiungere l'eccellenza* [Operational quality. Optimize to compete and achieve excellence]. Milano, Italy, FrancoAngeli.
- Ferreira, T., & Gorlach, I. A. (2016). Development of an automated guided vehicle controller using a model-based systems engineering approach. *South African Journal of Industrial Engineering*, 27(2), 206-217.
- Fornaciari L, & Galassi, D. (2012). *Strategies and economic-financial control for the point of sale* [original: Strategie e control-lo economico finanziario per il punto vendita]. Milan, Italy: IPSOA,
- Gardner, M. (2018). *Step-by-step guide for managing suppliers*. <https://quality.eqms.co.uk/blog/iso-90012015-managing-suppliers-step-by-step-guide>
- Gass, I. S. (2010). *Linear Programming: Methods and Applications* (5th ed.). Dover: Dover Publications
- Genus, A. (1995). *Flexible strategic management*. Chapman & Hall.
- Goldratt, E. M. (1990). *What is this thing called theory of constraint and how it should be implemented*, North River Press.
- Goldratt, E. M., & Cox, J. (1984). *The goal: A Process of Ongoing Improvement*. Routledge (3rd ed. 2016).
- Goswami, A., & Chaudhuri, K. S. (1992). An economic order quantity model for items with two levels of storage for a linear trend in demand. *Journal of the Operational Research Society*, 43(2), 157-167.
- Hall, D., & Jackson, J. (1992). Speeding up. New Product Development. JIT Can Help Put Products in Customer Hand Faster. *Management Accounting*, 74(4), 32-36.
- Hammer, M. Champy, J. (1993). *Reengineering the Corporation: A Manifesto for Business Revolution*. New York, HaperCollins.
- Hayes R. H., Wheelwright S. C. (1984). *Restoring on Competitive Edge: Competing Through Manufacturing*, Wiley, New York.
- Hiatt, J. M. (2006). *ADKAR: A model for change in business, government and our community*. Loveland, CO: Prosci Research.
- Hodgson, T. J., & Wang, D. (1991a). Optimal hybrid push/pull control strategies for a parallel multistage system: Part I. *The International Journal of Production Research*, 29(6), 1279-1287.
- Hodgson, T. J., & Wang, D. (1991b). Optimal hybrid push/pull control strategies for a parallel multistage system: Part II. *The International Journal of Production Research*, 29(7), 1453-1460.
- Hum, S. H., & Sim, H. H. (1996). Time-based competition: literature review and implications for modelling. *International Journal of Operations & Production Management*, 16(1), 75-90.
- Imai, M. (1986). *Kaizen, the key to Japan's competitive success*. New York: McGraw-Hill.
- Imai, M. (2007). *Gemba Kaizen. A commonsense, low-cost approach to management*. In Das Summa Summarum des Management, 7-15. Gabler.
- Ishikawa, K. (1969). Education and training of quality control in Japanese industry. *Reports of Statistical Application and Research, JUSE*, 16, 85-104.
- Ishikawa, K. (1976). *Guide to Quality Control*. Tokyo, Asian Productivity Organization.
- Ishikawa, K. (1985). *What is total quality control? The Japanese way*. Englewood Cliffs N. J: Prentice Hall.

- Ishikawa, K. (1990). Japan and the Challenge of Europe 1992. *Futures*, 22, 664-665.
- Ishikawa, K., & Lu, D. J. (1989). How to apply companywide quality control in foreign countries. *Quality Progress*, 22(9), 70-74.
- Jacobs, F. R. (1983). The OPT Scheduling System: A Review of a New Production Scheduling System. *Production and Inventory Management*, 24(3), 47-51.
- Jiang, W., & Han, J. (2009). *The methods of improving the manufacturing resource planning (MRP II) in ERP*. 2009 International Conference on Computer Engineering and Technology, 1, 383-389).
- Juran Knowledge Base. (2019). *Pareto Principle (80/20 Rule) & Pareto Analysis Guide*.
<https://www.juran.com/blog/a-guide-to-the-pareto-principle-80-20-rule-pareto-analysis/>
- Kaizen Institue. (2020. online). <https://www.kaizen.com/what-is-kaizen.html>
- Kanban. (2020). Kanban. <https://www.kanban.it/it/>
- Kanchanasevee, P., Biswas, G., Kawamura, K., & Tamura, S. (1997). Contract-net-based scheduling for holonic manufacturing systems. *Architectures, Networks, and Intelligent Systems for Manufacturing Integration*, 3203, 108-115. International Society for Optics and Photonics.
- Kawamura, K. (1997). *Holonic Manufacturing Systems: An Overview and Key Technical Issues*. 4th IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems: IMS'97, Seoul, Korea, 33-36.
- Kidd, P. T. (2000). *Agile Manufacturing: Forging New Frontiers*, Cheshire Henbury.
<http://www.cheshirehenbury.com/agility/agilitypapers/paper1095.html>.
- Kusiak, A. (1986). *Flexible manufacturing Systems. Methods and Studies*, North-Holland, Amsterdam: Elsevier.
- Lee, C. Y. (1993). A Recent Development of The Integrated Manufacturing System: A Hybrid of MRP and JIT, *International Journal of Operations & Production Management*, 13(4), 3-17.
- Lei, D., & Goldhar, J. D. (1991). Computer-integrated Manufacturing (CIM): Redefining the Manufacturing Firm into a Global Service Business, *International Journal of Operations & Production Management*, 11(10), 5-18.
- Leitão, P. & Restivo, F. (2006). ADACOR: A holonic architecture for agile and adaptive manufacturing control. *Computers in Industry*, 57(2), 121-130.
- Lewin, K. (1947a). *Frontiers in group dynamics*. In D. Cartwright (Ed.), *Field theory in social science: Selected theoretical papers* (pp. 188-237). London, UK: Tavistock.
- Lewin, K. (1947b). *Group decisions and social change*. In T. M. Newcomb & E. L. Hartley (Eds.), *Readings in social psychology* (3rd ed., pp. 197-211). New York, NY: Holt.
- Liker, J. K. & Meier, D. L. (2005). *The Toyota Way Fieldbook. A Practical Guide for Implementing Toyota's 4Ps*. New York, McGraw-Hill Education.
- Liker, J. K. & Morgan, J. M. (2006). The Toyota Way in Services: The Case of Lean Product Development. *Academy of Management Perspectives*, 20(2), 5-20.
- Mařík, V., Vrba, P., & Leitão, P. (Eds.). (2011). *Holonic and Multi-Agent Systems for Manufacturing*. HoloMAS 2011, Toulouse, France, Proceedings. Springer.
- Mason-Jones, R., & Towill, D. R. (1999). Total Cycle Time Compression and the Agile Supply Chain. *International Journal of Production Economics*, 62(1), 61-73.
- Mella, P. (1997). *Management Control* [original: Controllo di gestione]. Turin, Italy, Utet.
- Mella, P. (2005). Performance indicators in business value-creating organizations. *Economia Aziendale Online*, 2, 25-52.
- Mella, P. (2009). *The Holonic Revolution. Holons, Holarchies and Holonic Networks. The Ghost in the Production Machine*. Pavia, Pavia University Press.
- Mella, P. (2014a). *The Magic Ring*. New York, NY: Springer.

- Mella, P. (2014b). *Teoria del controllo*. Milano, Italy, Franco Angeli.
- Mella, P. (2018a). I Sistemi di controllo nelle imprese. Macro e micro controllo di gestione. *Economia aziendale Online*, 9(1), 23-45.
- Mella, P. (2018b). Quality, a Key Value Driver in Value Based Management. *Economia Aziendale online*, 9(4), 439-462.
- Mella, P., & Navaroni, M. (2012). *Analisi di bilancio* [Financial statements analysis]. Santarcangelo di Romagna, Italy: Maggioli Editore.
- Mentzer, J. T. et al. (2001). Defining Supply Chain Management. *Journal of Business Logistics*, 22(2), 1-25.
- Moisello, A. M. (2012). Costing for Decision Making: Activity-based Costing vs. Theory of Constraints. *International Journal of Knowledge, Culture & Change in Organizations: Annual Review*, 12, 1-13.
- Moisello, A. M., & Mella, P. (2020). Matching Revenues and Costs: The Counter-Intuitive Rationality of Direct Costing. *International Journal of Business and Management*, 15(1), 202-222.
- Nahmias, S. (1982). Perishable inventory theory: A review. *Operations research*, 30(4), 680-708.
- Neal, F. L. (1962). Controlling Warehouse Handling Costs by Means of Stock Location Audits. *Transportation and Distribution Management*, 2, 31-33.
- Neely, A. (2007). *Measuring Performance: The Operations Management Perspectives*. In: A. Nelley Ed., Business Performance Measurement. Unifying Theory and Integrating Practice, 2nd Ed., Cambridge University Press, Cambridge, 64-81.
- Oakland, J. S. (1989.) *Total Quality Management*. London: Heinemann Professional Publishing.
- Oakland, J. S. (2014). *Total quality management and operational excellence: text with cases*. London: Routledge.
- Ohno, T. (1988). *The Toyota Production System; beyond Large-Scale Production*. Productivity Press, Portland.
- OPT - Optimized Production Technology. (2000). In: Swamidass, P.M. (eds). (2000). *Encyclopedia of Production and Manufacturing Management*. Springer, Boston, MA .
- Pierre, D. A. (1987). *Optimization Theory with Applications*. New York, NY: Dover Publications.
- Pyke, D. F., & Cohen, M. A. (1990). Push and pull in manufacturing and distribution systems. *Journal of Operations Management*, 9(1), 24-43.
- Plenert, G. (1999). Focusing Material Requirements Planning (MRP) towards Performance. *European Journal of Operational Research*, 19(1), 91-99.
- Ptak, C. A. (1991). MRP, MRPII, OPT, JIT, and CIM. Succession, Evolution, or Necessary Combination. *Production and Inventory Management Journal*, 32(2), 7-11.
- Raouf A., & Ben-Daya M. (1995). *Flexible Manufacturing Systems: Recent Developments*. Amsterdam: Elsevier.
- Rich, N., & Hines, P. (1997). Supply-Chain Management and Time-Based Competition: The Role of the Supplier Association. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 27(3/4), 210-225.
- Sanchez, L. S. & Nagi, R. (2001). A review of agile manufacturing systems. *International Journal of Production Research*, 39(16), 3561-3600.
- Saputra, R. P., & Rijanto, E. (2012, April). *Automatic Guided Vehicles System and Its Coordination Control for Containers Terminal Logistics Application*. In Proceedings of the conference on international logistic seminar and workshop
- Sharma, M., & Kodali, R. (2008). TQM implementation elements for manufacturing excellence. *The TQM Journal*, 20(6), 599-621.
- Schmenner, R. W. (1993). *Production/Operations Management: From the Inside Out*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall.

- Schmitt, T. G. (1984). Resolving Uncertainty in Manufacturing Systems. *Journal of Operations Management*, 4(4), 331-345.
- Senge, P. (2006). *The fifth discipline: The Art and practice of the learning organization*. New York, NY: Doubleday/Currency (last edition, revised and enlarged).
- Shetty, Y. K. (1987). Product Quality and competitive strategy. *Business horizons*, 30(3), 46-52.
- Sierksma, G., & Zwols, Y. (2015a). *Linear and integer optimization: theory and practice*. CRC Press. Taylor and Francis.
- Sierksma, G., & Zwols, Y. (2015b). *Linear optimization solver*.
<https://online-optimizer.appspot.com/?model=builtin:default.mod>.
- Silver, E. A. (1981). Operations research in inventory management: A review and critique. *Operations Research*, 29(4), 628-645.
- Silver, E. A., Pyke, D. F., & Peterson, R. (1998). *Inventory management and production planning and scheduling*. New York: Wiley.
- Smith, P. G., & Reinartson, D. G. (1991). *Making Products in Half the Time*. New York: Van Nostrand Reinhold.
- Song, J., & Zipkin, P. (1993). Inventory Control in a Fluctuating Demand Environment. *Operations Research*, 41(2), 351-370.
- Stylios, C., Langer, G., Iung, B., Hyun, Y. T., Sorensen, C., Weck, M., & Groumpos, P. (2000). Discipline research contributions to the modelling and design of Intelligent Manufacturing systems. *Studies in Informatics and Control*, 9(2), 111-132.
- Swamidass, P. M. (Eds). (2000). *Inventory Holding Costs. Encyclopedia of production and manufacturing management*. Springer Science & Business Media.
- Taguchi, G. (1986). *Introduction to quality engineering: Designing quality into products and processes*. Asian Productivity Organization. Un. of Michigan: The Organization.
- Taguchi, G. (1988). The development of quality engineering. *The ASI Journal*, 11(1), 5-29.
- Tanaka, T. (1994). Kaizen budgeting: Toyota's cost-control system under TQC. *Journal of Cost Management for the Manufacturing Industry*, (Fall), 56-62.
- Tersine, R. J. (1988). *Principles of inventory and materials management*, New York: North Holland.
- Towill, R. (1996). Time Compression and Supply Chain Management. A Guided Tour. *Logistics Information Management*, 9(6), 41-53.
- Veinott, Jr, A. F. (1966). The status of mathematical inventory theory. *Management Science*, 12(11), 745-777.
- Wagner, H. M. (1980). Research portfolio for inventory management and production planning systems. *Operations Research*, 28(3-part-i), 445-475.
- Wakamatsu, Y. (2009). *The Toyota mindset: the ten commandments of Taiichi Ohno*. Enna Products Corporation.
- Waters, C. D. (1992). *Inventory control and management*. Chichester, Wiley.
- Wellemin, J. H. (1990). *Customer Satisfaction Through Quality*. Chartwell-Bratt (Publishing & Training) Ltd.
- Wight, O. (1995). *Manufacturing resource planning: MRP II: unlocking America's productivity potential*. John Wiley & Sons.
- Wilson, R. H. (1934). A scientific routine for cost control. *Harvard Business Review*, 13, pp. 116-128.
- Wilson, H. G. (1977). Order quantity, product popularity, and the location of stock in a warehouse. *AIIE transactions*, 9(3), 230-237.
- Whitin, T. M. (1954). Inventory control research: A survey. *Management Science*, 1(1), 32-40.

Wolfram | Alpha (2020). *Mathematica Linear Programming Solver*.

<https://www.wolframalpha.com/widgets/view.jsp?id=daa12bbf5e4daec7b363737d6d496120>.

Woolsey, R. & Maurer, R. (2005). *Inventory Control*. Marietta, USA: Lionheart Publishing, Inc.

Zairi, M. (2010). *Benchmarking for best practice*. London, Routledge.