UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI **INGEGNERIA**

Corso di Laurea triennale in **INGEGNERIA GESTIONALE L-9**

LA SCHEDULAZIONE DELLE ATTIVITA' PRODUTTIVE: STRUMENTI E TECNICHE

THE SCHEDULING OF PRODUCTION ACTIVITIES: TOOLS AND TECHNIQUES

Relatore Chiar.mo:

Prof. **Maurizio Bevilacqua**

Tesi di Laurea di:

Franchilli Elena

Matr. 1089843

A.A. **2021** /**2022**

INDICE

Introduzione 3

CAPITOLO 1

1. La schedulazione delle attività produttive 5
   1.1 Contesto di riferimento 5
   1.2 Problema di scheduling 8
   1.3 Notazione a tre campi 11
   1.4 Soluzioni di un problema di scheduling 15

CAPITOLO 2

2. Tecniche per la schedulazione 17
   2.1 Metodi esatti 18
      2.1.1 Metodo di Branch e Bound 18
      2.1.2 Formulazioni matematiche 20
   2.2 Metodi euristici 21
      2.2.1 Priority Dispatch Rules 22
      2.2.2 Bottleneck Based Heuristics 26
      2.2.3 Artificial Intelligence 28
      2.2.4 Algoritmi Greedy 28
      2.2.5 Ricerca locale 29
      2.2.6 Algoritmi metaeuristici 30
         2.2.6.1 Tabu Search 30
         2.2.6.2 Variable Neighborhood Search 30
         2.2.6.3 Algoritmi naturali 31
         2.2.6.4 Algoritmi genetici 31
         2.2.6.5 Sistema formiche 35

CAPITOLO 3

3. Strumenti per la schedulazione 36
   3.1 Schedulatori interattivi 36

3.2 Evoluzione degli strumenti 38
3.3 Software MES 42
3.4 Software APS 43
3.4.1 Struttura e funzionalità di APS 45
3.5 APS basati su cloud 48

Conclusione 52
Bibliografia 53

INTRODUZIONE

La schedulazione della produzione è un elemento fondamentale all'interno dell'Industry 4.0, poiché permette di riesaminare e modificare costantemente i dati di produzione. Attraverso l'ottimizzazione e la ricerca della soluzione ottima, la schedulazione riduce errori ed inefficienze dovute dovuto alle problematiche della pianificazione della produzione. Il processo di schedulazione ha un duplice obiettivo, la minimizzazione dei costi di produzione e il raggiungimento dell'efficienza produttiva

La tesi è composta da quattro capitoli:

- Nel primo verrà presentato il problema di scheduling in generale con le caratteristiche relative alle attività e alle risorse; verrà trattata la notazione a tre campi principalmente utilizzata per rappresentare un problema di scheduling. Infine, si passerà alle soluzioni dei problemi, ovvero alle funzioni obiettivo da minimizzare.
- Il secondo capitolo sarà incentrato sui metodi impiegati per raggiungere la soluzione ottima. Vengono classificati in base al grado di esattezza della soluzione in metodi esatti e metodi approssimativi o euristici. Tra i primi, ovvero i metodi che in uscita forniscono una soluzione ottima, si hanno il metodo di Branch e Bound e le formuzioni matematiche. Per

quanto riguarda i metodi approssimativi, ne verranno presentati diversi come le regole di dispacciamento prioritario (PDRS), il metodo basato sui “colli di bottiglia”, la tecnica di ricerca locale, gli algoritmi metaeuristici.

- L’ultimo capitolo verterà sugli strumenti adoperati dalle aziende per schedulare la propria produzione in modo efficace grazie allo sviluppo della tecnologia. I principali sono i software APS e i software MES.

CAPITOLO 1

1. LA SCHEDULAZIONE DELLE ATTIVITA' PRODUTTIVE

In termini generali, la produzione può essere definita come il processo di conversione delle materie prime in prodotti finiti. I sistemi di produzione sono generalmente composti da diversi elementi che interagiscono tra loro per raggiungere un obiettivo, ossia generare i prodotti finiti nelle quantità necessarie nei tempi richiesti e a costi adeguati. La gestione della produzione coinvolge un elevato numero di aspetti decisionali delle organizzazioni produttive.

1.1 contesto di riferimento

La programmazione della produzione può essere definita come quel "processo con cui si stabilisce ed impegna (se le risorse esistono o sono ottenibili) l'ammontare delle risorse (attività, manodopera, macchinari, attrezzature, materiali, servizi generali d'impianto, ecc.) di cui l'azienda avrà bisogno per le sue attività produttive future e l'allocazione di tali risorse per ottenere il prodotto desiderato nelle quantità stimate, nel tempo giusto, al posto giusto ed al minore costo totale possibile" (Melloni).

La programmazione della produzione rappresenta dunque un aspetto fondamentale nell'ambito della logistica integrata[1] e nella gestione dei flussi fisici ed informativi. Il Flusso fisico inizia con l'acquisto dei materiali dai fornitori, procede all'interno dell'azienda con la movimentazione del prodotto e termina con la vendita del prodotto al cliente. Mentre il flusso informativo fluisce dal cliente al fornitore; consiste inizialmente nella raccolta di informazioni relative alla quantità e alla tipologia di prodotto richiesto dai potenziali clienti e successivamente nella programmazione della produzione.

In riferimento alla definizione suggerita, si può allora affermare che "la programmazione della produzione si presenta come un processo costituito da un insieme di attività mediante le quali si ottiene la trasformazione di un input principale costituito dalla domanda (espressa da previsioni e/o ordini clienti) in una serie di output quali ordini di produzione, ordini di approvvigionamento esterno e decisioni riguardo le risorse produttive necessarie in futuro" (Melloni).

La programmazione della produzione può strutturata in quattro fasi principali:

1. *pianificazione strategica della produzione*. Eseguita su orizzonte temporale a lungo termine (1-2 anni), di conseguenza con una precisione

[1] *La logistica integrata avviene quando i due flussi, fisico e informativo, sono organizzati in modo tale che le aree aziendali interessate (approvvigionamento, stoccaggio, produzione, vendite) siano connesse in modo efficace.*

e affidabilità dei dati disponibili bassa, poiché si devono ipotizzare scenari lontani nel tempo. Si tratta della fase in cui vengono fissati gli obiettivi aziendali, vale a dire serve a definire i prodotti da realizzare, il tipo mercato a cui sono indirizzati, il processo di marketing, le vendite e la distribuzione.

2. *programmazione aggregata della produzione*. Eseguita su orizzonte temporale a medio termine, il livello di precisione è medio. Ha lo scopo di verificare la domanda e allocare le risorse esistenti.
3. *programmazione principale della produzione*. Eseguita su orizzonte temporale a medio termine con un livello di precisione maggiore. Ha lo scopo di definire il Piano Principale di Produzione o Master Production Schedule (MPS) tramite l'utilizzo di sistemi di tipo MRP.
4. *programmazione operativa e controllo della produzione*. Eseguita su orizzonte temporale a breve termine: giorno, settimana o mese; infatti, il livello di precisione è elevato.

La programmazione operativa determina la struttura del processo di scheduling (Brandolese, Pozzetti, Sianesi, 1991; Baker, 1974):

- allocazione delle attività sulle singole risorse produttive disponibili;

- allocazione nel tempo della produzione, rispettando i limiti fissati dal piano di produzione proposto da MRP;
- sequenziamento delle attività sulle risorse, tenendo conto delle caratteristiche delle varie attività, delle caratteristiche dell'impianto e dell'obiettivo della programmazione.

Oltre a ricevere in input i dati e le informazioni derivanti dalla pianificazione operativa, lo scheduling riceve altre informazioni come lo stato dei magazzini, la disponibilità dei materiali, gli ordini dei clienti con i rispettivi vincoli sui tempi di consegna e le distinte basi dei prodotti. In possesso di tutte queste informazioni la schedulazione, che permette di attribuire una sequenza di attività ad una o più risorse in base a disponibilità, priorità e capacità produttiva, può avvenire in maniera efficiente. Come risultato si ha un insieme di tempi di inizio e di fine per tutte le operazioni richieste da ogni ordine di produzione.

1.2 problema di scheduling

Il problema di scheduling è dunque definito da due componenti principali: attività e risorse.

1. attività (task)

Un' attività è una sequenza di operazioni da eseguire per poter trasformare un input in un output con maggiore valore economico.

L'Enciclopedia Treccani fornisce la seguente definizione: "*Analisi delle a., l'analisi della trasformazione di beni o fattori in altri beni o prodotti, accompagnata dalla definizione dei rapporti fissi in cui si verifica il processo di trasformazione*"

2. risorse

Nello scheduling ogni attività deve essere assegnata ad una o più risorse necessarie per il processamento.

Nei problemi di scheduling, attività e risorse vengono indicate con i termini di task (singola attività) e macchina, mentre il termine job si riferisce in genere a insiemi di task tecnologicamente o logicamente legate. Viene definito anche il termine operazione come la parte di un job eseguita su una macchina (un job può richiedere più macchine e quindi una operazione su ognuna).

In generale i dati di un problema di schedulazione consistono in un insieme di *n* jobs J_j (*j=1, ..., n*) ed un insieme di m macchine M_i (*i=1, ..., m*). Ogni attività viene eseguita da una risorsa assegnata. Con m_j si indica la risorsa assegnata all'attività j e con J_m l'insieme di attività eseguite dalla risorsa m.

Ad ogni J_j job possono essere associate varie informazioni:

3. *numero di operazioni* m_j
4. *Tempo di processamento o durata* $p_{i,j}$: tempo che il job j richiede alla macchina i per essere eseguito.
5. *Tempo di rilascio* (*release date*) r_j: l'istante di tempo prima del quale non è possibile iniziare l'esecuzione del job j.
6. *Tempo di consegna* (*due date*) d_j: l'istante di tempo entro il quale l'esecuzione del job j dovrebbe essere terminata. Prende il nome di *deadline* nel caso in cui la *due date* deve essere rispettata assolutamente.
7. Peso w_j: rappresenta l'importanza relativa del job j rispetto agli altri.

In generale m_j , $p_{i,j}$, r_j , d_j, w_j sono le variabili intere.

Vi sono ulteriori specifiche che contribuiscono a definire un problema di scheduling (Agnetis, 2000), quali:

8. Tempo di set up s_{jk}: nel caso dei problemi a macchina singola, tra il completamento del job j e l'inizio del job k è necessario riconfigurare la macchina, questo richiede un tempo s_{jk}.

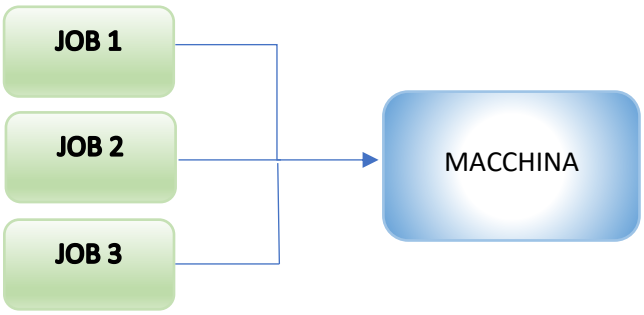
9. Blocking e no-wait: nel caso dei flow shop, in particolare, in cui i job sono caratterizzati dallo stesso processo di lavorazione. I job in attesa di essere eseguiti sono fermi dei buffer. Se a un dato istante il buffer della macchina *i* è pieno, un job terminato sulla macchina *i*-1 non può sostare nel buffer della macchina *i*, quindi deve attendere nella macchina *i*-1 bloccandola.

1.3 notazione a tre campi

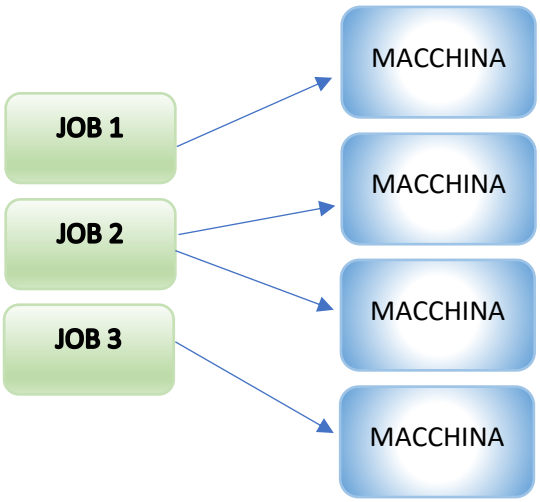
Esistono molti tipi di problemi di scheduling, che attraverso le caratteristiche del job, delle macchine e della schedulazione possono essere classificati con la notazione a tre campi α/β/γ (Graham e altri (1979)).

1. Campo α: il primo campo indica il sistema di macchine

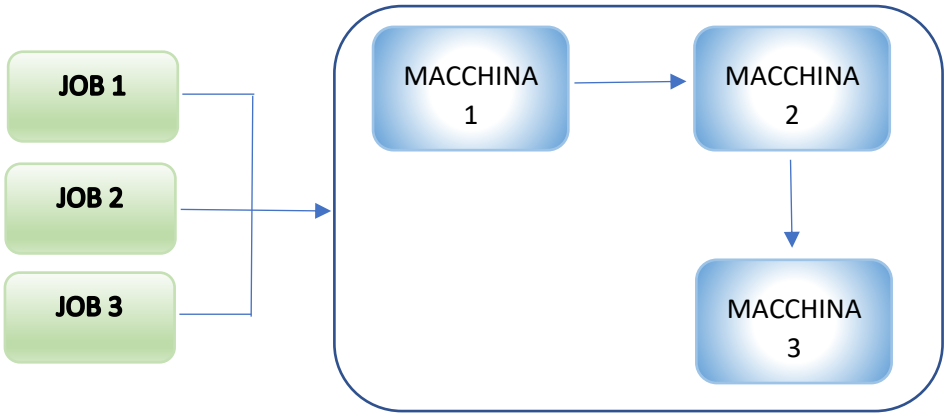
- α=°: Macchina singola. È il caso più semplice, in cui i job richiedono tutti la stessa risorsa per essere eseguiti. In questo caso in genere ciascun job consiste di un singolo task



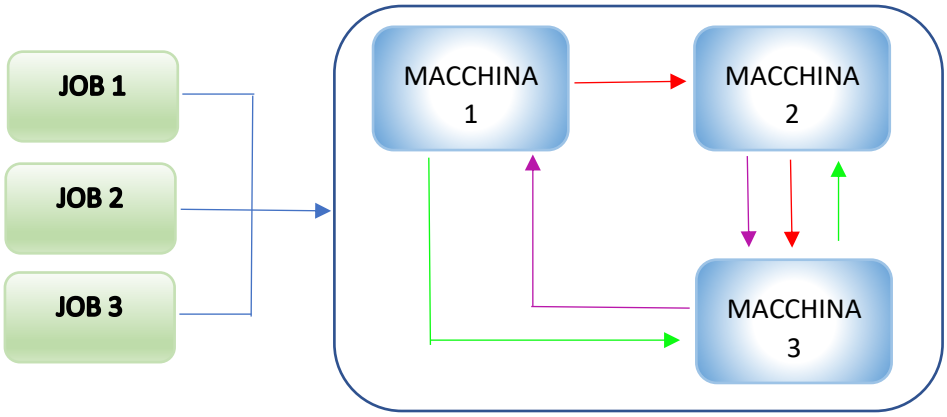
- α =P_m: Macchine identiche parallele: le macchine svolgono tutte la stessa funzione ed hanno la stessa velocità di processamento.
- α=Q_m: macchine "uniform parallele
- α=R_m: unrealed parallel machine



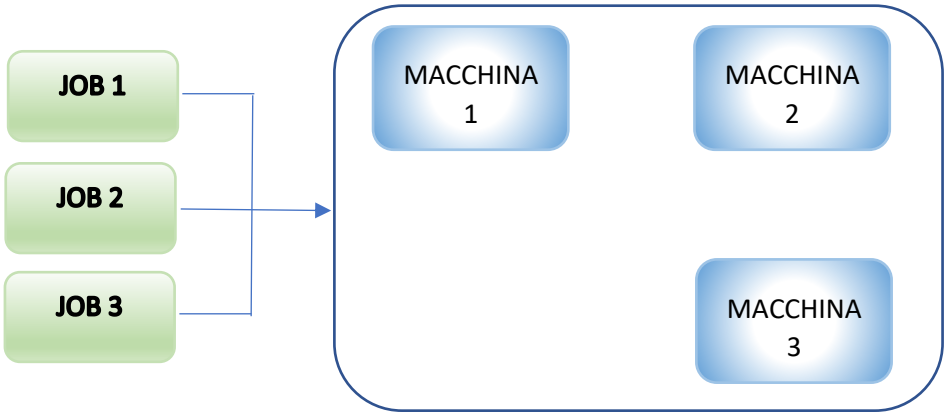
- α=F_m: Flow shop. Il sistema consiste in m macchine disposte in serie, e ciascun job deve essere eseguito da ciascuna delle m macchine successivamente. Dunque, tutti i job sono caratterizzati dal medesimo processo di lavorazione, determinato a priori.



- α=J_m: Job shop. Anche qui ci sono m macchine, ma ciascun job ha una propria sequenza di lavorazione



- Open shop: ogni job deve essere processato su tutte le macchine, ma senza una precisa sequenza in quanto non è determinata a priori.



2. campo β: il secondo campo indica alcune caratteristiche dei job, come vincoli e modalità di processamento

- Prmp: preemption, è possibile interrompere un job per consentire l'esecuzione di un altro più urgente e poi riprenderlo successivamente. Se questo vincolo non è specificato questa operazione non è consentita ed ogni risorsa può eseguire un'attività alla volta.
- Res / res1: indicano la presenza di risorse limitate che vanno attribuite al singolo job o la presenza di una singola risorsa.
- Prec: indica i vincoli di precedenza, un job può essere processato solo se tutti i job precedenti sono stati completati. I vincoli vengono espressi attraverso i grafi orientati in cui i nodi corrispondono ai job e gli archi ai vincoli.

3. campo γ: il terzo campo indica il criterio di ottimalità scelto

- C_j : tempo di completamento del job. Se il problema non ammette interruzioni, la somma dell'instante in cui inizia esecuzione dell'ultimo task del job e del tempo di processamento dell'ultimo task, corrisponde al tempo di completamento.
- $L_j = C_j - d_j$: *lateness* del job rispetto al tempo di consegna d_j del job. Corrisponde alla differenza tra il tempo di completamento e la data di consegna del job. Se il valore è positivo allora la lateness sta ad indicare un

ritardo, al contrario se è negativo la lateness indica un anticipo rispetto alle due date.

- $T_j = \max(L_j, 0)$: *tardiness* del job, corrisponde alla *lateness* quando è positiva, e vale 0.
- U_j: *unit penalty,* $U_j = 1$ se $C_j > d_j$,mentre se $U_j = 0$ se $C_j \leq d_j$

1.4 soluzioni di un problema di scheduling

Una soluzione di un problema di scheduling è chiamata schedule o piano di produzione. Una schedula può essere definita come una descrizione completa di come vengono utilizzate le macchine dai job che devono essere processati.

Alcune delle funzioni obiettivo da minimizzare sono:

- minimizzazione del *makespan*. Con *makespan* si indica il tempo di completamento dell'ultimo job in lavorazione. Minimizzare questo valore comporta un utilizzo delle macchine elevato e permette di bilanciare il loro uso.
- minimizzazione del *numero di job in ritardo*
- minimizzazione del *lateness*. Il maximum *lateness* L_{max} indica la massima violazione della data di consegna (*due date*), cioè lo scarto maggiore tra il

tempo in cui si termina di lavorare un job e il tempo in cui il job dovrebbe essere già consegnato.

- minimizzazione del *tardiness*. *Maximum tardiness* indica il ritardo del job processato con maggior ritardo rispetto al tempo di consegna. Minimizzando questa funzione significa contenere il ritardo del job più penalizzato.
- minimizzazione del flow time o tempo di attraversamento. Con flow time di fa riferimento alla quantità $\sum w_j C_j$, definita come la somma pesata dei tempi di completamento dei job.
- minimizzazione del work in process WIP, cioè del numero di job in lavorazione
- minimizzazione del tempo di setup complessivo $\sum S\,U_j$. Dove SU_j è il tempo di setup sulla macchina i-esima per lavorare i job assegnati.

CAPITOLO 2

2. TECNICHE PER LA SCHEDULAZIONE

In questo capitolo vengono introdotti alcuni degli algoritmi di scheduling più noti, che permettono di determinare la miglior schedula per la produzione all'interno di un'officina.

Molti problemi di scheduling sono stati definiti come problemi NP-hard, i cosiddetti problemi "difficili". Proprio per la loro complessità sono state sviluppate varie tecniche euristiche che permettono di arrivare in tempi relativamente brevi ad una soluzione non ottima ma buona. Grazie a queste tecniche è possibile ottenere le soluzioni di una classe di problemi più ampia e non limitata come per i metodi esatti.

Le tecniche, dunque, si dividono principalmente in (A.S.Jain e S.Meeran):

- tecniche di ottimizzazione forniscono la soluzione migliore ai vincoli ed agli obiettivi prefissati e forniscono sempre una dimostrazione che la soluzione sia ottima. Questi metodi giungono alla soluzione attraverso una serie di regole e di passi da seguire in una determinata sequenza.
- metodi approssimativi: non forniscono una soluzione esatta ma analizzano una o più proprietà della soluzione ottimale, in modo da restringere il

campo delle possibili soluzioni e arrivare ad una soluzione “buona”. Sono adatti per risolvere problemi più grandi.

2.1 Metodi esatti

I metodi esatti più comuni e noti sono gli algoritmi Branch and Bound e le formulazioni matematiche. I problemi di schedulazione rientrano nei problemi di classe NP-hard, per questo motivo si può avere una soluzione ottima e quindi questi metodi sono destinati esclusivamente a problemi di modeste dimensioni.

2.1.1 Metodo di branch e bound

Questo metodo utilizza una struttura ad albero per rappresentare o spazio della soluzione di tutte le possibili sequenze. Si basa sul concetto di divide et impera: ricondurre la soluzione di un problema difficile a quella di sottoproblemi più semplici. La ricerca della soluzione inizia dalla radice, il nodo più in alto, scendendo verso il livello più basso, cioè i nodi figli. Non è necessario risolvere esplicitamente tutti i sottoproblemi fino a trovare una soluzione ottima intera ma è possibile scartare alcuni sottoalberi mediante il criterio di *bounding*, quando il lower bound di un nodo è peggiore del valore della migliore soluzione intera trovata sino a quel momento il nodo può essere chiuso. Il lower bound corrisponde

alla limitazione inferiore nei problemi di minimo, nel caso di un problema di massimo si valuta l'upper bound. La ricerca si interrompe una volta che tutti i noti sono stati cercati e la soluzione ottima è stata trovata. Questo metodo è anche noto come metodo di enumerazione implicita.

Il nome Branch and Bound rimanda alle due procedure che caratterizzano il metodo, *bounding* e *branching*.

La prima, come già accennato, fornisce mediante un rilassamento una stima inferiore del valore della soluzione ottima intera del sotto problema, restituendo anche una soluzione e un valore logico, *infeasible*, che vale *true* se il rilassamento del sotto problema non ammette soluzioni. Se *infeasible=true* bisogna arrestarsi nel cercare la soluzione nel sotto sottoalbero perché non ne contiene. Analogamente, se Bound restituisce una soluzione a componenti intere allora si ha il valore della soluzione ottima.

La seconda, la procedura Branch, viene effettuata per decomporre il problema in sottoproblemi. La strategia di branching più usata è quella di scegliere come variabile, in caso di soluzione con componenti non intere ma frazionarie, quella con parte frazionaria più vicina a 0,5. In questo modo si elimina la parte del sottoproblema che non contiene soluzioni intere.

Per la realizzazione dell'algoritmo B&B è necessario stabilire anche l'ordine in cui i sottoproblemi devono essere studiati. Le strategie per stabile l'ordine in cui visitare gli alberi sono principalmente due:

1. Depth first (a priorità di profondità): si sceglie il nodo ancora non elaborato più profondo. Partendo da un nodo, si considera il primo dei suoi figli, poi il primo figlio di quest'ultimo finché non si arriva a chiudere un nodo che consente di risalire ai livelli precedenti.
2. Best bound first (a priorità di miglior bound): si sceglie il nodo non ancora elaborato con lower bound minimo che ha la più alta probabilità di generare la soluzione ottima.

2.1.2 Formulazioni matematiche

I problemi di scheduling possono essere risolti anche utilizzando tecniche di programmazione matematica, una delle più comuni è la programmazione lineare intera mista (MIP). È uno dei metodi esatti usati per trovare la soluzione ottima per i problemi di piccola e media grandezza.

Consiste in un programma lineare caratterizzato da una singola funzione obiettivo lineare e da un insieme di vincoli lineari, ma alcune delle variabili decisionali o tutte devono assumere valori interi oppure essere variabili binarie.

Altri approcci sono il rilassamento lagrangiano (LR) e i metodi di scomposizione. L'approccio Lagrangiano consiste nel vedere un problema di programmazione lineare intera "difficile" come un problema "facile", eliminando i vincoli indesiderati e inserendoli nella funzione obiettivo in modo da considerarli nella soluzione.

I metodi di scomposizione invece suddividono il problema originale in sotto problemi più piccoli e facili da gestire per arrivare alla soluzione. Ma secondo A.S.Jain e S.Meeran entrambi gli approcci generano soluzioni lontane dalla soluzione ottima anche integrandoli con altre tecniche. I risultati indicano che i limiti inferiori non sono molto buoni, possono essere difficili da calcolare e in alcuni casi il tempo necessario per il calcolo è elevato. Si può concludere che le formulazioni matematiche non sono propriamente adatte per risolvere in modo ottimale i problemi di scheduling e la tecnica più efficace è Branch and Bound.

2.2 Metodi approssimativi/euristici

Come già accennato non generano una soluzione ottima ma un'alternativa accettabile che si avvicina ad essa.

2.2.1 Priority Dispatch Rules (pdrs)

Le regole di dispacciamento prioritario vengono utilizzate per determinare qual è la successiva operazione da selezionare tra tutte le operazioni in fila.

In generale gli ordini arrivano in modo casuale a seconda delle richieste complessive. Tali ordini richiedono una serie di attività o operazioni da eseguire e questo impone vincoli sulle sequenze di flusso, sulle macchine necessarie e sulla manodopera. Con il tempo gli ordini si accumulano creando delle code che vanno gestite in modo da rispettare i tempi di consegna di ogni ordine e rispettare gli obiettivi di ridurre il tempo di flusso minimo, di flusso massimo, la variazione del tempo di flusso, la proporzione di lavori in ritardo, il ritardo medio, il ritardo massimo e la variazione del ritardo (Oliver Holthaus, Chandrasekharan Rajendran, 1997). Dunque, sono necessarie delle regole per definire le priorità delle attività. Per ogni lavoro viene calcolato un indice di priorità $Z_i(t)$ utilizzando una funzione di attributi dei job presenti sulla macchina corrente e nelle immediate vicinanze (C.D. Geiger, R.Uzsoy, H.Aytug).

- FIFO (first in first out)

La logica FIFO consiste nel dare la precedenza alle attività in base alla sequenza. La prima attività in coda è la prima ad essere processata, in questo modo si evita

anche di avere in magazzino, per tempi molto lunghi, materie prime o semilavorati.

- LIFO (last in first out)

Al contrario della logica FIFO, la LIFO consiste nel processare l'ultima attività della coda.

- SPT (shortest processing time)

I job sono classificati in ordine crescente in base al tempo di processamento. La prima attività ad essere processata è dunque quella più breve.

- LPT (Longest processing time)

Al contrario del SPT, classifica i job da elaborare io ordine decrescente in base al tempo di processamento. Dunque, ha la precedenza il job che impiega più tempo ad essere elaborato.

- WSPT (Weighted shortest processing time)

Classifica i job ancora da elaborare in ordine decrescente in base al rapporto tra il loro peso e il tempo di lavorazione. Vengono processati prima i job con pesi elevati e tempi di lavorazione ridotti.

- EDD (earliest due date)

I job in coda in attesa di elaborazione vengono ordinati in base alle date di consegna e si inizia a processare il job con il tempo di consegna più breve.

- MST (minimum slack time)

I job in coda sono elencati in ordine crescente rispetto al loro slack, cioè la differenza tra il tempo di elaborazione sulla macchina e il tempo dalla sua data di scadenza.

- LTWK (least total work)

Si ordinano i job in base al tempo di processamento e si inzia a processare il job con quello più breve.

- LWKR (least work remaining)

Le operazioni non terminate vengono processate in base al minor tempo di processamento.

- MOPNR (most operation remaining)

Si seleziona il job che ha il maggior numero di operazioni nella sequenza non ancora processate.

- MWKR (most work remaining)

I job si ordinano in base al tempo di elaborazione totale che rimane.

- RANDOM

Si selezionano I job in ordine casuale.

- WINQ (work in next queue)

Si seleziona il job la cui macchina successiva ha la coda più corta.

- COVERT (cost over time)

Si tratta di una combinazione di due regole, MST e WSPT (Weighted Shortest processing Time). Quando si nota che un job è in ritardo, cioè il suo slack è nullo, il suo indice di priorità[2] sarà w_i/p_i (WSPT). Al contrario se un job è in anticipo il valore dell'indice di priorità aumenta con il diminuire dello slack. La regola COVERT si basa sulla stima del ritardo nel caso peggiore moltiplicata per la somma dei tempi di processamento del job. Viene processato per prima il job con il più alto indice di priorità.

---

[2] *L'indice di priorità* $Z_i(t)$ *viene calcolato per ogni lavoro utilizzando una funzione di attributi dei job presenti sulla macchina corrente e nelle immediate vicinanze (C.D.Geiger, R.Uzsoy, H.Aytug).*

- CR (Critical Ratio)

Si calcola il rapporto tra il tempo rimanente per la consegna, ovvero il tempo necessario per completare l'attività, e il tempo ancora disponibile. In genere il tempo a disposizione sia maggiore della durata dell'attività si pone $CR \geq 1$ e i job che vengono processati per primi sono quelli con valore di CR più vicino all'unità.

2.2.2 Bottleneck Based Heuristics

Per molti anni gli unici metodi approssimativi erano le regole di dispacciamento prioritario ma con lo sviluppo della tecnologia si è arrivati a dalle nuove tecniche più sofisticate che permettono di risolvere i problemi dovuti al PDRS e al dispendio di tempo. Un esempio è la Shifting Bottleneck Procedure (SBP) di Adams et al. (1988). Tale approccio richiede un tempo di calcolo relativamente basso, ma la qualità della soluzione prodotta non è sempre ottima. È utilizzato principalmente nelle officine con un numero finito di lavori e un numero finito di macchine.

Questo approccio permette di indentificare il sottoproblema, di selezionare il collo di bottiglia e di trovare una soluzione per la pianificazione. Lo fa attraverso il rilassamento del problema in m problemi di una macchina e risolvendo iterativamente ogni sottoproblema uno alla volta.

Per prima cosa è necessario rappresentare tutti i vincoli di precedenza in un grafo in cui le righe di nodi rappresentano i vari lavori e ciascun nodo le varie attività. L'algoritmo procede trovando uno schedule dei vari job su ciascuna delle m macchine, in modo da avere un grafo aciclico e la lunghezza del percorso più bassa possibile sul grafo.

Ad ogni iterazione viene individuata la macchina che costituisce il "collo di bottiglia" del sistema cioè nel modo in cui i job sono sequenziati, su questa macchina il valore del makespan influisce in modo più consistente rispetto ad altre macchine. Il valore del makespan viene determinato dal tempo di processamento più lungo tra tutti i job. L'algoritmo, quindi identifica il bottleneck corrente e determina il sequenziamento migliore su essa e tutte le macchine precedentemente schedulate vengono riottimizzate risolvendo il problema di una nuova macchina. Questo metodo permette di ridurre il tempo necessario per svolgere un'attività.

Nel dettaglio, indicando con M l'insieme delle m macchine e con M_0 quelle che sono state già sequenziate dopo l'iterazione. Il grafo iniziale è caratterizzato dai nodi che rappresentano le attività e da archi che rappresentano il sequenziamento sulle macchine di M_0, questo grafo si indica con $G(M_0)$.

Per ogni job è necessario determinare il tempo di rilascio r_j e il tempo di consegna d_j. A questo punto si calcola la lunghezza del percorso critico su $G(M_0)$ e si indica

con $C_{max}(M_0)$. [3]Man mano che le macchine vengono sequenziate per arrivare alla soluzione finale ammissibile vengono aggiunti archi al grafo $G(M_0)$.

2.2.3 Artificial Intelligence

L'intelligenza artificiale integra l'intelligenza umana all'informatica. Dei processi o delle attività sono in grado di simulare, imitare l'uomo attraverso la creazione e l'applicazione di algoritmi integrati in un ambiente informatico. Dunque, l'IA serve a rendere i computer più utili nella risoluzione dei problemi.

2.2.4 Algoritmi greedy

Gli algoritmi greedy sono gli algoritmi euristici più semplici. Sono detti greedy= ingorgo perché forniscono la soluzione attraverso iterazioni successive, ad ogni iterazione scelgono quella più compatibile con i vincoli del problema. Questo metodo non garantisce di trovare la soluzione ottima poiché si basa sull'idea di fare sempre scelte che sembrano ottime in quel momento, senza tener conto delle conseguenze sulla soluzione finale. Ma d'altro canto sono algoritmi facili da implementare e veloci da eseguire.

[3] *Con C_{max} si indica la massima distanza tra nodo di inizio e nodo finale del grafo.*

2.2.5 Ricerca locale

La tecnica di ricerca locale permette di arrivare ad una soluzione anche non ottima ma in breve tempo. Tale tecnica consiste nel valutare una soluzione ammissibile per il problema e con varie iterazioni migliorarla confrontandola con le soluzioni vicine, cioè ottenibile attraverso piccole trasformazioni. In questo modo la ricerca è circoscritta ad un intorno della soluzione, per questo motivo viene chiamata ricerca locale. Per intorno $I(x)$ di una soluzione ammissibile x si intende il sottoinsieme di soluzioni che si possono ottenere da x mediante una trasformazione elementare su di essa, chiamata mossa. Inizialmente x' è una soluzione ammissibile, se la miglior soluzione nell'intorno di x' (ovvero x'') è diversa da x' allora si passa ad esaminare l'intorno di x'', altrimenti la soluzione corrente x' rappresenta l'ottimo locare del problema. L'algoritmo di ricerca locale genera per ogni intorno la soluzione migliore, dunque esamina tutte le soluzioni dell'intorno. Per ridurre i tempi di calcolo spesso si accetta la prima soluzione che migliora quella attuale anziché studiare tutte le soluzioni dell'intorno, in questo caso si parla di *first improvement*.

2.2.6 Algoritmi metaeuristici

Gli algoritmi metaeuristici risolvono il principale difetto degli algoritmi di ricerca locale, ovvero trovare ottimi locali lontani, di qualità peggiore rispetto all'ottimo globale. Rispetto ad altri algoritmi, questi non garantiscono la qualità delle soluzioni trovate, ma spesso risultano essere decisamente migliori.

2.2.6.1 Tabu Search

È una tecnica metaeuristica deterministica sviluppata da F.Glover alla fine degli anni 80. Consiste nell'applicare l'algoritmo di ricerca locale in un intorno, in cui viene accettata sempre la miglior soluzione, sebbene ciò possa comportare un peggioramento della soluzione finale. L'obiettivo è quello di raggiungere la soluzione stando il più lontano possibile da quelle che possano sembrare uguali o simili a quelle ottenute in precedenza. Per evitare di ritornare alla soluzione precedente a causa del peggioramento è presente una lista di soluzioni tabu. In tale lista vengono inserite le soluzioni precedenti per evitare che l'algoritmo le esamini ripetutamente e vada in loop.

2.2.6.2 Variable Neighborhood Search

È una tecnica sviluppata da P.Hansen e N.Mladenovic nel 1997. Anche questa utilizza come elemento di base la ricerca locale ma durante la ricerca cambia

intorni. Ovvero studia intorni sempre più ampi della soluzione migliore trovata. Da ogni intorno viene presa una soluzione a caso e a partire da essa viene eseguita una ricerca locale se è la miglior soluzione trovata fino a quel momento.

2.2.6.3 Algoritmi naturali

Gli algoritmi naturali si ispirano ai fenomeni naturali per risolvere problemi complessi. Sono ad esempio le *reti neurali* che si ispirano al sistema nervoso umano, o il *simulated annealing* che segue il processo di raffreddamento di un metallo. Nel secondo caso agli stati fisici del sistema corrispondono le soluzioni di un problema da ottimizzare e all'energia corrisponde il valore della funzione obiettivo; quindi, raffreddare il sistema meccanico significa minimizzare la funzione obiettivo. Viene utilizzato per risolvere problemi difficili in cui le dimensioni eccessive rendono complicata la risoluzione con altri metodi.

2.2.6.4 Algoritmi genetici

Gli algoritmi genetici (AG) sono stati sviluppati da J.H. Holland nel 1975, sono ispirati alla teoria dell'evoluzione di Darwin e quindi alle mutazioni genetiche delle popolazioni.

(Jain, Meeran) L'analisi presentata qui è basata vagamente sulla classificazione fatta da Cheng et al. (1996) che indicizzano tutti gli schemi di rappresentanza in 9 categorie:

1. Basati sull'operazione
2. Basati sul job
3. Basati sulla relazione di coppia di job
4. Basati sul tempo di completamento
5. Chiavi random
6. Basati sull'elenco delle preferenze
7. Basati sulle regole di priorità
8. Basati sul grafico disgiunto
9. Basati sulle macchine

Tali rappresentazioni possono essere classificate in base a due approcci, diretto e indiretto. L'approccio diretto codifica un problema di schedulazione come un cromosoma e attraverso gli operatori genetici, il cui funzionamento verrà trattato successivamente, si raggiunge una schedulazione ideale. Le categorie dalla 1 alla 5 sono esempi di questo approccio.

Nell' approccio indiretto una sequenza di preferenze decisionali è codificata del cromosoma e gli operatori sono applicati per migliorare l'ordinamento delle varie

preferenze (Jean, Meeran). Viene quindi generata una schedula dalla sequenza di preferenze. Le categorie da 6 a 9 sono esempi di questo approccio.

Negli AG la ricerca della soluzione finale avviene sia esplorando nuove regioni dello spazio delle soluzioni (*exploration*) e sia esaminando attraverso la ricerca locale le informazioni già a disposizione (*exploitation*).

Come per la genetica delle popolazioni, ogni soluzione rappresenta un individuo e l'insieme delle soluzioni all'istante t viene detto popolazione.

Di seguito il funzionamento dell'algoritmo. Innanzitutto, viene generata in maniera casuale una popolazione iniziale di *m* individui che prendono il nome di *cromosomi.* Ad ogni cromosoma è possibile associare una funzione di fitness che indica la qualità della soluzione considerata. Ad ogni iterazione l'algoritmo genera una nuova popolazione a partire da quella precedente applicando alcuni operatori genetici. Tali operatori modificano alcuni individui per ottenere una nuova popolazione con cromosomi migliori, cioè con valori di funzione di fitness più alti. Questo significa spostare la ricerca del massimo della funzione obiettivo verso zone della regione ammissibile che hanno una probabilità maggiore di avere la soluzione ottima.

Gli operatori utilizzati da un algoritmo genetico sono principalmente tre:

1. Selezione

Seleziona i cromosomi con i più alti valori di funzione di fitness.

2. Crossover

Si sceglie come input due individui diversi (genitori) in modo casuale e si ricombinano generando due figli. La ricombinazione avviene scegliendo un punto di taglio nei due cromosomi genitori, il taglio divide i cromosomi in due parti che vengono poi scambiate e ricombinate tra loro per formare i figli.

Il crossover è l'operatore più vantaggioso perché permette di unire le caratteristiche dei due genitori per ottenere almeno un figlio con un valore di funzione di fitness più elevato rispetto a quello dei due genitori.

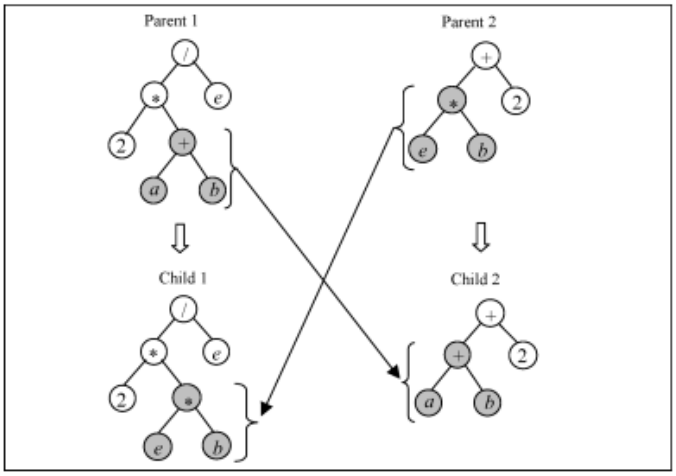


FIGURE 1. ILLUSTRAZIONE DELL'OPERATORE CROSSOVER (C. D. GEIGER, R. UZSOY, H. AYTUG)

3. Mutazione

L'operatore di mutazione agisce modificando casualmente il valore allelico di un gene di un individuo della popolazione (per *gene* si intende ogni posizione nel cromosoma e il valore assunto da ogni gene è detto *allele* che di solito assume valori binari). Se gli alleli assumono valore binario significa che in presenza del valore 0 si modifica in 1 e viceversa.

Utilizzando questo operatore si ha la possibilità di studiare l'intero spazio di ricerca indipendentemente dalla popolazione iniziale.

2.2.6.5 Sistema formiche

L'algoritmo delle formiche si basa sulla vita delle formiche che nonostante non abbiano l'organo della vista riescono a trovare spesso il tragitto più breve per trasportare il cibo nel formicaio. Tutto questo è possibile grazie al feromone, una sostanza che le formiche depositano quando si muovono. Le altre formiche percepiscono la sostanza e marcano il cammino seguito.

CAPITOLO 3

3. STRUMENTI PER LA SCHEDULAZIONE

3.1 Schedulatori interattivi

Gli schedulatori interattivi rappresentano il sistema più semplice, poiché la schedulazione è condotta dal programmatore stesso.

La filosofia sottesa da questo tipo di prodotti è fondamentalmente quella di lasciare il compito decisionale all'operatore, delegando al sistema solo le verifiche di congruenza e accettando eventuali forzature (M. Caridi, A.Sianesi).

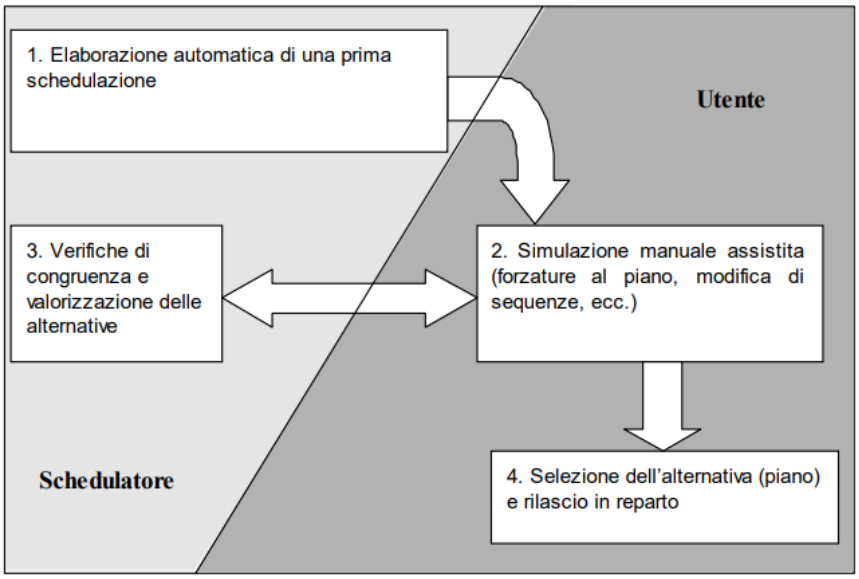


FIGURA 1 ARCHITETTURA DI FUNZIONAMENTO DI UNO SCHEDULATORE INTERATTIVO (M. CARIDI, A.SIANESI)

La figura rappresenta il funzionamento di uno schedulatore interattivo, caratterizzato da 4 fasi:

1. Elaborazione automatica di una prima schedulazione: in questa prima fase l'obiettivo è automatizzare le operazioni di allocazione dei lavori alle risorse produttive e ciò avviene con il supporto di algoritmi, esatti o euristici. Si genera una soluzione non corrispondente a quella finale ma che sia una base per i miglioramenti e le variazioni che verranno effettuate dal programmatore. Dovendo far uso delle tecniche esposte nel capitolo precedente, i più moderni schedulatori interattivi possiedono delle librerie con le tecniche più adatte per formulare questa soluzione iniziale.
2. Simulazione manuale assistita: partendo dalla soluzione iniziale generata nella prima fase, l'utente, servendosi dell'interfaccia offerta dai moderni schedulatori apporta tutti i miglioramenti e le variazioni necessarie. Ogni cambiamento apportato alla soluzione iniziale rappresenta un'alternativa la piano.
3. Verifica di congruenza e valorizzazione: in questa fase il sistema controlla che i miglioramenti e le variazioni apportate rispettino i vincoli del problema, ad esempio i vincoli relativi alla capacità produttivi, alla disponibilità dei materiali e semilavorati, alla disponibilità di risorse ausiliarie. Quindi ogni alternativa al piano viene valorizzata dallo schedulatore, cioè è possibile ottenere le informazioni inerenti alle

giacenze, ai tempi di setup, alla saturazione delle macchine, alle code, ecc.

4. Rilascio: in questa fase, il programmatore sceglie l'alternativa che si ritiene più opportuna e migliore. Infine, viene emessa tutta la documentazione di fabbrica corrispondente.

3.2 Evoluzione degli strumenti

Con l'avanzamento della concorrenza globale nel passare degli anni, i produttori e i distributori nella catena di approvvigionamento delle varie aziende hanno riscontrato la necessità di rispondere rapidamente alla domanda del mercato in tempi brevi e con scarse giacenze in magazzino. Inoltre, è essenziale fornire ai clienti la possibilità di effettuare ordini in base alla domanda del mercato, alla quantità e al tempo di spedizione. Per rispondere a tutte queste necessità, molte aziende manifatturiere hanno implementato sistemi MRP (Materials Requirement Planning o Manufacturing Resource Planning), ERP (Enterprise Resource Planning) e MES (Manufacturing Execution System)

I sistemi MRP sono software per la pianificazione della produzione e controllo delle scorte. Tali sistemi hanno tre obiettivi principali:

1. Assicurarsi che i materiali e i prodotti siano disponibili per la produzione e per la consegna ai clienti
2. Mantere il più basso possibile il livello di magazzino
3. Pianificare le attività di produzione, le schede di consegna e le attività d'acquisto.

L'MRP quindi pianifica i fabbisogni dei materiali partendo dalle informazioni date in input dalla BOM[4] (Bills of Materials), dallo stato delle scorte e dall'MPS che definisce per ogni prodotto le quantità necessarie e le sequenze di lavoro da svolgere nei rispettivi reparti di produzione. Il risultato dell'utilizzo di tale sistema è una migliore pianificazione e schedulazione del piano di produzione e degli approvvigionamenti.

Successivamente i sistemi MRP si sono evoluti in sistemi MRP II, si differenziano dai primi perché hanno integrato anche funzionalità di gestione degli spetti finanziari; quindi, si lavora anche sulle informazioni relative alla vendita dei prodotti.

I software ERP, evoluzione dei sistemi MRP, sono i più ricorrenti per gestire i principali settori di attività aziendale in cui è possibile l'integrazione con sistemi informatici gestionali. Si tratta di sistemi di gestione che integra tutti gli aspetti

[4] *La BOM o distinta base descrive tutti i componenti di un prodotto in modo dettagliato e progressivo.*

del business e i suoi cicli, inclusa la pianificazione, la realizzazione del prodotto, le vendite, gli approvvigionamenti, gli acquisti, la logistica di magazzino e il marketing.

Tuttavia, molti autori hanno menzionato che esiste un divario tra ciò che un ERP può fare per un'azienda di produzione in termini di pianificazione e schedulazione dei suoi processi produttivi, ciò che la teoria consente di fare e ciò di cui le organizzazioni hanno veramente bisogno (Melina C. Vidoni, Aldo R.Vecchietti, 2015). Dal momento che i sistemi ERP e MRP non soddisfacevano completamente le esigenze funzionali, si è sviluppata la necessità di avere a disposizione nuovi strumenti per migliorare l'ottimizzazione e il controllo della programmazione della produzione.

La pianificazione del fabbisogno di materiale (MRP) segue un approccio gerarchico di tipo dop-down:

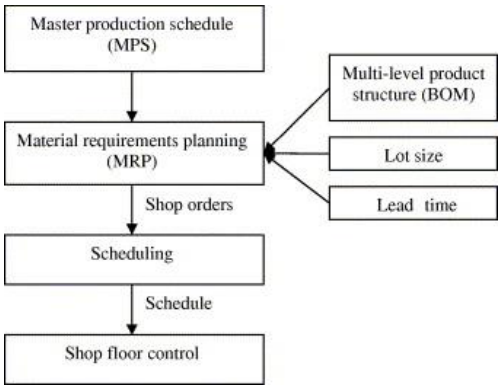


FIGURA 2: SCHEMA DELL'MRP TRADIZIONALE E DELLA PROGRAMMAZIONE (KEJIA CHEN, PING JI)

Nella parte superiore si parte con il piano principale si produzione (MPS) che determina quali prodotti l'azienda produrrà, in quali quantità e la data, collegando quindi la domanda di vendita con la capacità produttiva. Lo scopo della pianificazione della produzione principale è creare un piano realistico che riduca al minimo le scorte in eccesso e rispetti le date di consegna; infatti, l'MPS viene tradotto in date di inizio e di scadenza pianificate per tutti i sottoassiemi e componenti sulla base della BOM.

Lo svantaggio del MRP è che ignora i vincoli di capacità e presuppone che i tempi di consegna siano fissi e non considera le sequenze operative degli articoli. (Kejia Chen, Ping Ji, 2006). Ciò causa dei problemi per la produzione successiva nelle officine.

Sicuramente MRP e programmazione della produzione sono legati tra loro, per questo sarebbe ideale integrarli insieme per realizzare dei piani di produzione (o schedule) realistici per le officine. Si arriva, dunque al problema della pianificazione e programmazione avanzata (APS).

3.3 Software MES

Un sistema MES è un sistema che controlla e gestisce il reparto produttivo in azienda laddove è implementato un sistema connesso[5] in modo automatizzato e integrato.

Grazie all'acquisizione di informazioni delle attività produttive (dal lancio dell'ordine al prodotto finito) e all'utilizzo in tempo reale dei dati, un software MES supporta l'ottimizzazione dei processi produttivi. Quindi se prima i dati relativi all'avanzamento della produzione avveniva in maniera manuale, il MES fornisce le informazioni automaticamente.

Il MES svolge tre funzioni principali:

- Raccogliere i dati in tempo reale
- Organizzare e archiviare i dati in un unico database centralizzato
- Rendere i dati accessibili e integrando anche i dati provenienti da altri sistemi informativi, come ad esempio pianificazione e contabilità.

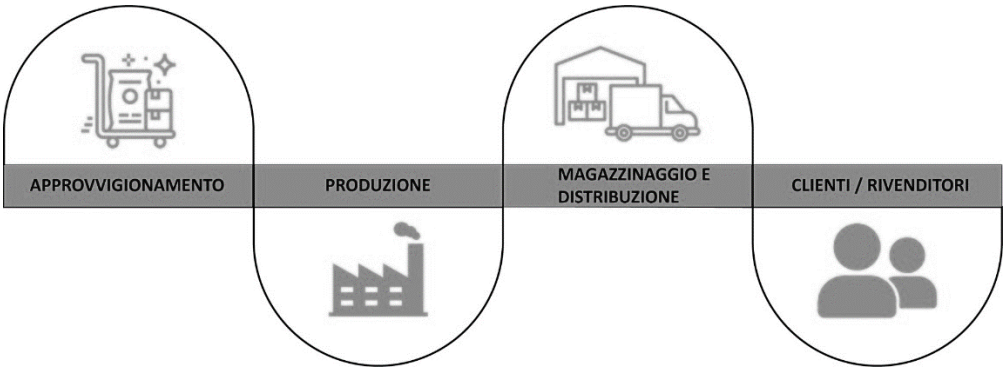
Lo scopo principale del sistema MES è quello di collegare il sistema gestionale aziendale (ERP) con i sistemi di controllo delle macchine presenti nei reparti

[5] *L'impianto è costituito da macchine che attraverso l'integrazione di una serie di sensori di varia natura trasmettono dati l'uno rispetto all'altro creando questo sistema connesso*

produttivi e logistici per ottimizzare i processi favorendo il controllo delle risorse, la qualità e i costi dei beni prodotti.

3.4 Software APS

I software APS (Advanced Planning & Scheduling) sono strumenti utilizzati dalle aziende per un supporto decisionale nel contesto dei processi di produzione e logistici. APS non sostituisce l'ERP, ma viene integrato ad esso in modo da poter estrarre i data dal database ERP e fornire i piani risultanti per la distribuzione e l'esecuzione. Attraverso algoritmi il sistema APS permette di simulare e ottimizzare le varie fasi della supply chain, la catena di approvvigionamento, la produzione, la schedulazione, la pianificazione della distribuzione e del trasporto con l'obiettivo di ridurre i costi, ridurre le scorte ed aumentare la produttività.



In figura è rappresentato il processo di supply chain management, cioè il processo che va dalla materia prima al prodotto completato che viene distribuito.

- La prima fase si tratta dell'approvvigionamento delle materie prime necessarie per la produzione. È fondamentale definire la quantità giusta di materie prime in modo da rispettare le esigenze ma allo stesso tempo evitare le rimanenze in magazzino.
- La seconda fase, di produzione è l'attività che consente di ottenere il prodotto necessario per soddisfare la richiesta.
- L'ultima fase è quella di distribuzione. Una volta completato, il prodotto deve essere distribuito e consegnato al cliente. È importante organizzare il magazzino in modo da evitare giacenze, e ottimizzare la logistica cioè gli spostamenti delle merci da un punto all'altro dell'azienda e poi fino ai distributori.

I sistemi APS, quindi utilizzati come supporto dei processi di pianificazione e schedulazione della produzione, determinano quando produrre ciascun ordine, in quale sequenza operativa e quali macchine utilizzare per soddisfare le date di scadenza richieste dal cliente.

Tra pianificazione e schedulazione c'è differenza. La pianificazione ha l'obiettivo di determinare e datare delle attività future e quindi ha come orizzonte temporale

il medio/lungo periodo. La schedulazione, invece, opera sul breve periodo con l'obiettivo di assegnare una data e ora precisa ad attività già pianificate.

3.4.1 Struttura e funzionalità di APS

Come già affrontato nel primo capitolo la maggior parte delle aziende è caratterizzata da una gerarchia di processi aziendali in cui il livello superiore è collegato ai successivi livelli inferiori. La pianificazione strategica al contrario della pianificazione operativa non si basa su un livello di dettaglio elevato poiché si tratta di decisioni prese considerando informazioni aggregate e un orizzonte temporale più lungo. Successivamente queste decisioni prese ad un livello gerarchico più alto corrispondono all'input per la pianificazione di livello inferiore, in cui man mano che si attraversa la struttura gerarchica per arrivare al livello più basso, le informazioni sono più dettagliate e l'orizzonte temporale considerato è più breve.

Un modo per classificare l'APS standard consiste nel classificare diversi moduli in base alla lunghezza dell'orizzonte di pianificazione, da un lato, e al processo della catena di approvvigionamento supportato dal modulo, dall'altro (P. Jonsson, L. Kjellsdotter, M. Rudberg). L'immagine rappresenta i diversi moduli dei sistemi APS che supportano le diverse fasi del processo di pianificazione.

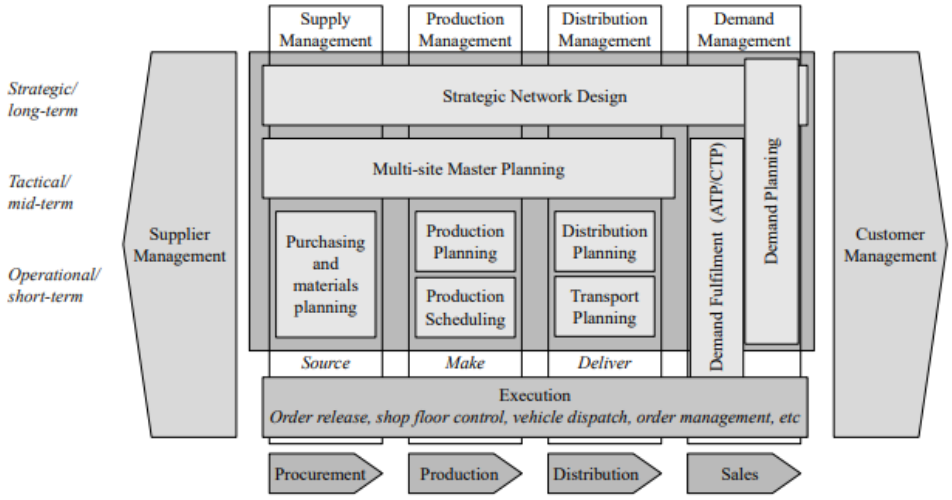


FIGURA 3 TYPICAL APS PLANNING STRUCTURE AND CATEGORIZAZTION OF APS MODULES

In un sistema APS si possono distinguere i seguenti moduli (la maggior parte delle implementazioni non contengono tutti i moduli) (Entrup, 2005):

- *Strategic Network Design (SND)*, determina la struttura della Supply Chain con una pianificazione a lungo termine fino a 10 anni.
- *Multi-site Master Planning (MMP)*, ha lo scopo di bilanciare in modo efficiente le capacità dell'azienda con la domanda; dunque, le funzioni di acquisto e produzione sono pianificate contemporaneamente prendendo delle decisioni a medio termine. Da questo modulo si ottiene l'MPS (piano principale di produzione).
- *Demand Planning (DP)*, tale modulo incorpora sia la stima della domanda a lungo termine che la pianificazione delle vendite a medio termine.

- *Purchasing & Materials Requirements Planning (P&MRP)*, in tale modulo sono integrate la maggior parte delle funzioni dei sistemi ERP che riguardano la pianificazione della produzione e gli acquisti. Tuttavia, questo modulo non è sempre presente nei pacchetti APS poiché molte aziende sono già in possesso di queste funzioni fornite dai sistemi ERP.
- *Production Planning (PP) e Production Scheduling (PS)*, i moduli hanno l'obiettivo di determinare le quantità da produrre e i piani di produzione dettagliati.
- *Distribution Planning (DisP) e Transportation Planning (TP)*, si tratta dei moduli incaricati di trovare i modi di trasporto più efficienti. Il modulo DisP può essere visto come una rappresentazione più dettagliata della pianificazione che riguarda la distribuzione del prodotto al cliente, il modulo TP, invece, si basa su decisioni a breve termine inerenti al percorso o alla disponibilità di un veicolo.
- *Available to Promise (ATP)*, tale modulo consente di rispondere in modo rapido e affidabile alle richieste relative agli ordini dei clienti.

3.5 APS basato su cloud

All'interno dell'Industry 4.0 si sviluppano sempre di più dei servizi cloud, cioè server a cui si accede tramite Internet in cui si possono archiviare e gestire dati, eseguire applicazioni o distribuire contenuti o servizi. Quindi per accedere a file o a dati relativi all'azienda vi si accede online attraverso un qualsiasi dispositivo connesso ad Internet e tali informazioni saranno disponibili sempre e ovunque.

Sono stati sviluppati dei software APS basati sul cloud, chiamati C-APS che permettono una programmazione di qualità superiore. Il sistema C-APS considera le caratteristiche/vincoli pratici di produzione in officina e la logica di spedizione per generare l'effettivo programma di produzione e operazioni giornaliero/settimanale/mensile (Wang, Chen, Liu, Chu).

Di seguito verrà presentata l'architettura del sistema APS basato un cloud caratterizzata da quattro livelli (Wang, Chen, Liu, Chu):

1. *Livello utente*. Un'interfaccia utente per i pianificatori della produzione, gli operatori dell'officina che hanno ricevuto il piano di pianificazione e hanno aggiornato l'MRP per il piano; il personale addetto agli acquisti e il personale che ha acquistato i materiali per gli ordini.

2. *Livello di applicazione*. Include le funzioni del sistema, come la gestione degli ordini, la pianificazione, l'aggiornamento dell'MRP, la pianificazione dei materiali, ecc.
3. *Livello di servizio*. Contiene principalmente il motore di pianificazione basato sulla simulazione del modello di pianificazione per generare la pianificazione della produzione e delle operazioni in base ai parametri di pianificazione.
4. *Livello di risorse*. Contiene risorse virtuali e risorse fisiche. Le prime comprendono i dati e le informazioni provenienti dai sistemi MES ed ERP. Le seconde, chiamate anche dispositivi hardware, includono server Web, server informatici, memorie e sensori.

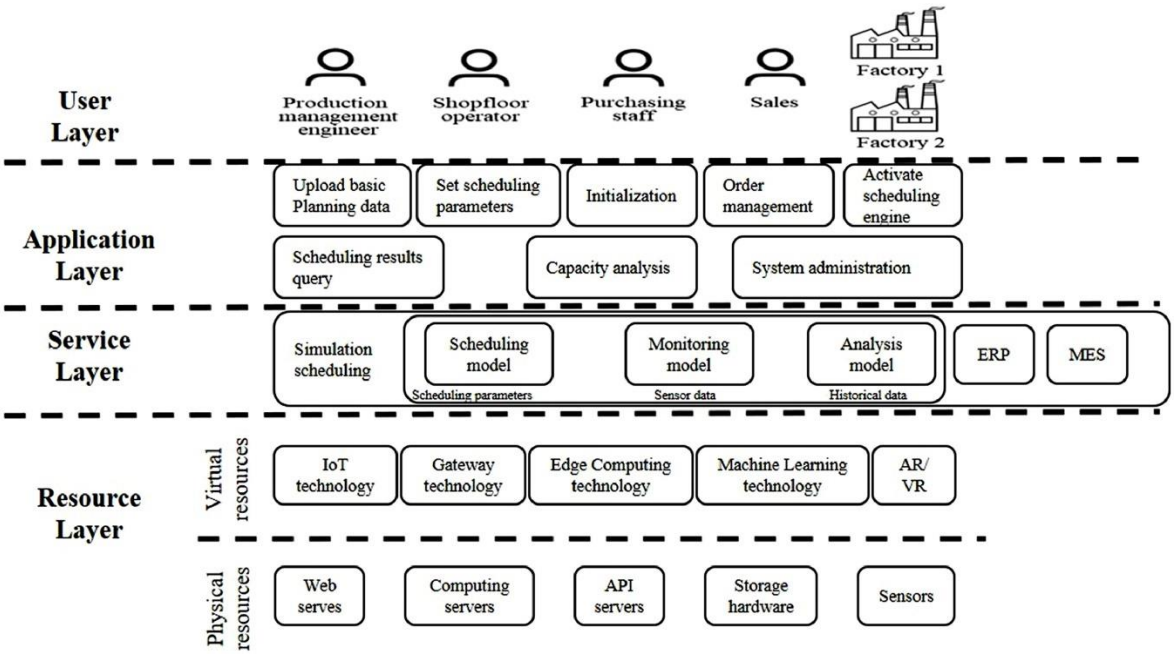


FIGURA 4 L'ARCHITETTURA DEL SISTEMA C-APS

Il sistema C-APS può comprendere cinque moduli principali:

1. *Modello di caso di settore*. Prima dell'utilizzo di C-APS per la schedulazione, i dati relativi alla produzione e alla pianificazione devono essere inseriti nel sistema in modo tale che esso crei un cloud e memorizzi i file.
2. *Modulo interfaccia utente*. Fornisce una pagina Web e un'interfaccia per la trasmissione di dati.
3. *Modulo di immissione dati di base*. Questo modulo deve essere aggiornato ogni volta che si verifica una variazione dell'ambiente esterno (ad esempio, i prodotti, le linee di produzione o i processi appena rilasciati) per garantire che ogni volta la produzione la programmazione è in linea con le effettive condizioni di fabbrica. Questo modulo è composto da file di dati e file di logica di schedulazione, i dati relativi al materiale (es. ordine cliente, MO, inventario, tecnologia prodotto, ciclo) possono essere importati da ERP e dati relativi alla macchina utensile (es. tempo disponibile macchina utensile, Stato WIP, runtime, ricetta, PM programmato) provengono principalmente da MES. I file della logica di pianificazione memorizzano i vincoli di produzione (ad es. Qtime, corrispondenza delle specifiche) e le regole di spedizione (es. dosaggio, priorità) (Wang, Chen, Liu, Chu).

4. *Modulo di pianificazione della simulazione basato su cloud*. Questo modulo fornisce il servizio di pianificazione cloud del sistema C-APS. Comprende un motore di pianificazione basato sulla simulazione, un controller delle regole di invio della simulazione e un pianificatore della capacità.
5. *Modulo di uscita*. Gli utenti possono ottenere due tipi di informazioni archiviate nel database cloud tramite il sito Web del modulo di output, inclusi il programma di produzione e le prestazioni di output (es. somma giornaliera, tempo di ciclo, foglio di esecuzione, WIP per flusso, spostamento per flusso) e risultato dell'analisi (es. macchine utensili chiave, PM programmato). Gli utenti possono scaricare regolarmente le informazioni sull'output della pianificazione nel file Excel o nel database del sito locale oltre ad effettuare gli adeguamenti necessari del programma di produzione e delle operazioni in risposta alla domanda del cliente e alla fornitura di materiali/capacità (Wang, Chen, Liu, Chu).

CONCLUSIONE

Con l'avanzare della tecnologia e della digitalizzazione le aziende manifatturiere, sia grandi che medio piccole, hanno dovuto far fronte ai cambiamenti improvvisi del mercato rispondendo rapidamente e efficacemente.

Per rispondere a questa esigenza, le imprese hanno adottato inizialmente i sistemi informatici ERP, MRP e MRP II, successivamente hanno implementato ad essi i sistemi MES e APS per ottenere un perfetto funzionamento e un piano di produzione ottimo e affidabile, oltre a risolvere problemi di schedulazione.

Concludendo si può affermare che l'uso di sistemi APS ha portato ad una corretta gestione delle informazioni, in modo da minimizzare i costi di produzione e ottimizzare l'utilizzo dei materiali, sia le macchine necessarie alla produzione e sia le materie prime cioè cercare di mantenere basso il livello del magazzino.

Ma non solo, risolvere i problemi di scheduling delle officine comporta anche una riduzione dei tempi di attesa tra una macchina e l'altra, tra i reparti, la riduzione dei tempi di setup delle macchine utilizzate e il rispetto delle date di consegna ai clienti.

BIBLIOGRAFIA

A. Agnetis “Introduzione ai problemi di Scheduling”, December 12, 2000

Kuznetsov, A. S., e E. E. Noskova. «Assessment of planning methods at job-order manufacturing facilities» IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 862. IOP Publishing, 2020.

Jain, A. S., e S. Meeran. «A State-of-the-Art Review of Job-Shop Scheduling Techiques» 1999

Oliver Holthaus, Chandrasekharan Rajendran, Efficient dispatching rules for scheduling in a job shop, International Journal of Production Economics,Volume 48, Issue 1,1997

Young Hae Lee, Chan Seok Jeong, Chiung Moon, “advanced planning and scheduling with outsourcing in manufacturing supply chain”, 29 April 2002

C. D. Geiger, R. Uzsoy, H. Aytug, “Rapid modeling and discovery of priority dispatching rules: an autonomous learning approach”, 2006

M. Bruglieri, A. Colorni, “Ricerca Operativa”, Zanichelli

P. Jonsson, L. Kjellsdotter, M. Rudberg, “Applying advanced planning systems for supply chain planning: three case studies”, 2007

M.Caridi, A. Sianesi, “La programmazione operativa della produzione: evoluzione e prospettive”

M. C. Vidoni, A. R. Vecchietti, “A systemic approach to define and characterize Advance Planning Systems (APS)”, 2015

Kejia Chen, Ping Ji, “A mixed integer programming model for advanced planning and scheduling (APS)”

Matthias Lütke Enturp, “Advanced Planning in Fresh Food Industries”

R. Melloni, “La programmazione della produzione”

Li-Chih Wang, Chun-Chih Chen, Jen-Li Liu, Pei-Chun Chu, “Framework and deployment of a cloud-based advanced planning and scheduling system”