

La programmazione operativa della produzione: evoluzione e prospettive¹

Maria Caridi ^①, Andrea Sianesi ^②

^① Dottoranda all'Università degli Studi di Parma e collaboratrice di ricerca al Politecnico di Milano ed al Libero Istituto Universitario Carlo Cattaneo

^② Politecnico di Milano, Dipartimento di Economia e Produzione

1. Introduzione

In questo lavoro viene affrontato il tema della programmazione operativa (o programmazione di breve o scheduling), con particolare riguardo alle applicazioni nelle piccole e medie imprese manifatturiere.

Da alcuni decenni le ricerche sullo scheduling hanno proposto numerosi algoritmi o modelli che adottano differenti approcci risolutivi. Per contro, le applicazioni industriali di successo di tali ricerche sono assai poco numerose e relative soprattutto a contesti “semplici” o poco turbolenti; in particolare, le piccole e medie imprese solo raramente sono interessate da tali applicazioni e, conseguentemente, le loro attività di programmazione della produzione rimangono connotate da un elevato grado di empirismo. Questo stesso scenario si ripropone in aziende di dimensioni maggiori ove i singoli reparti (o stabilimenti) hanno una grandezza paragonabile a quella di una piccola o media impresa.

Il lavoro in oggetto si propone di esaminare le cause della dicotomia esistente tra l'ampiezza di offerta di modelli presenti nella letteratura scientifica e la carenza di applicazioni di successo nei contesti industriali.

Nel prosieguo, dopo un doveroso richiamo ai principali concetti di programmazione operativa e la proposta di una nuova classificazione dei problemi di scheduling, viene esaminato il processo di evoluzione della domanda e dell'offerta di soluzioni di scheduling negli ultimi anni, per individuare, da un lato, i principali sentieri di evoluzione delle tecniche e, dall'altro, l'evolversi dei fabbisogni nelle piccole e medie imprese; successivamente si illustrerà come si sia evoluta nel tempo l'integrazione tra sistema informativo aziendale e sistema di schedulazione e, infine, verranno analizzati i principali problemi che ostacolano le applicazioni informatiche in contesti industriali.

2. La programmazione operativa

Come noto, la programmazione operativa si inserisce a valle della programmazione aggregata e della pianificazione dei fabbisogni (MRP) con lo scopo di tradurre gli ordini di produzione (intesi come richieste di produrre determinate quantità di certi prodotti nei periodi stabiliti) in ordini di produzione operativi (intesi come

¹ Questo lavoro è frutto della collaborazione tra gli autori, in sede di stesura finale M.Caridi ha curato i capitoli 1 e 2 mentre A.Sianesi ha curato i restanti capitoli.

decisioni di effettuare in determinati momenti le necessarie operazioni produttive su determinati centri di lavoro o macchine).

Nella programmazione operativa si possono distinguere tre momenti (fasi) concettualmente diversi, anche se generalmente strettamente correlati, che determinano la struttura del problema di scheduling (Brandolese, Pozzetti, Sianesi, 1991; Baker, 1974):

- allocazione delle operazioni sulle singole risorse produttive disponibili;
- allocazione nel tempo della produzione, da risolversi nel rispetto dei limiti fissati dal piano di produzione proposto da MRP;
- sequenziamento dei lavori sulle risorse, da affrontare tenendo conto delle caratteristiche dei lavori stessi, delle caratteristiche dell'impianto e dell'obiettivo della programmazione.

L'importanza della singola fase e, quindi, la struttura stessa del problema di scheduling dipendono fortemente da due aspetti:

- il sistema fisico, classificabile in funzione sia dagli *obiettivi* dell'azienda a cui il sistema produttivo appartiene², sia dalle *caratteristiche tecnologiche* del sistema produttivo, sia dal *mix* dei *prodotti* lavorati e dalla loro *struttura*, sia infine dalle tipologie di *flusso* e di *processo* esistenti all'interno del sistema³;
- il modello logico, classificabile in funzione del *flusso del controllo*, dell'*approccio* e della tipologia di *tecnica risolutiva*.

In questo lavoro verrà approfondito in particolare il secondo dei due aspetti citati (vedi Tabella 1).

Tabella 1. Classificazione della struttura del problema di scheduling.

Classificazione in funzione del modello logico	
ELEMENTI DI CLASSIFICAZIONE	ALTERNATIVE
sistema di controllo	gerarchico/distribuito
approccio al problema	automatico/interattivo
tecnica risolutiva	ottimizzazione/euristico

E' utile innanzitutto introdurre le tipologie (paradigmi) di sistema di controllo; le più significative sono:

- controllo *gerarchico centralizzato*, in cui esiste una chiara gerarchia di risoluzione dei problemi, ossia è prestabilito l'ordine non solo con cui

² Principalmente gli obiettivi di un sistema di schedulazione sono classificabili in obiettivi di efficacia ed obiettivi di efficienza; per una trattazione dettagliata degli obiettivi, si rimanda a (Brandolese, Pozzetti, Sianesi, 1991)

³ Per una trattazione dettagliata dei profili di classificazione dei sistemi produttivi si rimanda a (Brandolese, Brugger, Garetti, Misul, 1985) e (Hayes, Wheelwright, 1979).

vengono risolte le tre fasi che compongono lo scheduling, ma anche le priorità con cui devono essere considerati i prodotti, le risorse, gli obiettivi, ecc.; a sua volta il controllo gerarchico è suddivisibile in:

- controllo *top down*: è senz'altro la tipologia più diffusa; un esempio classico (anche se non prettamente di scheduling) di questo tipo di sistema è l'MRP, in cui i prodotti sono pianificati livello per livello partendo dal prodotto finito fino alle materie prime, seguendo nell'elaborazione una sequenza pre-calcolata e memorizzata in strutture dati ad hoc, denominate catene di attività per livello (Orlicky, 1975);
- controllo *bottom up*: senz'altro più complesso dal punto di vista architetturale, esso mira a massimizzare la congruenza dei piani generati in termini di fattibilità (Sianesi, 1996);
- controllo *distribuito*, in cui non è definita nessuna gerarchia di priorità, ma i vari attori che compongono il sistema (processi, prodotti, ecc.) concorrono a soddisfare un obiettivo comune, cercando nel contempo di ottimizzare propri obiettivi locali.

Per quanto riguarda i tipi di *approccio* al problema, i sistemi di scheduling sono classificabili come:

- sistemi *automatici* (o, in ogni caso, automatizzabili), la cui caratteristica è l'esistenza di un metodo formalizzato che dà la garanzia che, per quante volte venga risolto il medesimo problema con gli stessi dati, la soluzione sarà sempre la stessa; essi sono a loro volta suddivisibili in:
 - sistemi basati su *tecniche* (ottimizzanti o euristiche) anche estremamente complesse, è l'impostazione classica per i sistemi a controllo gerarchico;
 - sistemi basati su *regole* di carico, in cui ogni elemento del sistema fisico è programmato con regole che possono anche essere specifiche del singolo elemento;
- sistemi *interattivi*, in cui il metodo di soluzione è delegato al decisore umano ed il sistema informativo di scheduling opera essenzialmente come sistema di supporto per l'effettuazione di verifiche di congruenza o per l'elaborazione di indici di valutazione della bontà del piano impostato dal decisore.

Per quanto riguarda le *tecniche*, in Figura 1 si riporta una classificazione proposta in letteratura e a cui si rimanda per approfondimenti sui contenuti. Sinteticamente, si illustrano qui le differenze tra le principali tecniche:

- le tecniche di *ottimizzazione* garantiscono sempre la miglior soluzione in rapporto ai vincoli ed agli obiettivi prefissati e sono sempre corredate da una dimostrazione che assicura questa ottimalità; in particolare, i metodi *analitici* individuano una formula risolutiva (sotto forma di un insieme di equazioni algebriche o differenziali) che permette di calcolare il valore ottimale delle variabili decisionali, mentre i metodi *algoritmici* pervengono alla soluzione

ottima mediante una serie di passi da svolgere in una sequenza predeterminata;

- le tecniche *euristiche* si limitano a fornire una soluzione “buona” in relazione agli obiettivi considerati, ossia una soluzione che rappresenta un buon compromesso tra efficienza dell’elaborazione (misurata in termini di tempi di elaborazione della procedura risolutiva) e efficacia della stessa (misurata in termini di vicinanza della soluzione individuata alla soluzione ottima del problema); la modalità con cui si raggiunge la soluzione è differente a seconda del tipo di tecnica euristica utilizzata ma, in generale, la bontà della soluzione è certificabile solo con campagne sperimentali e non attraverso dimostrazioni.

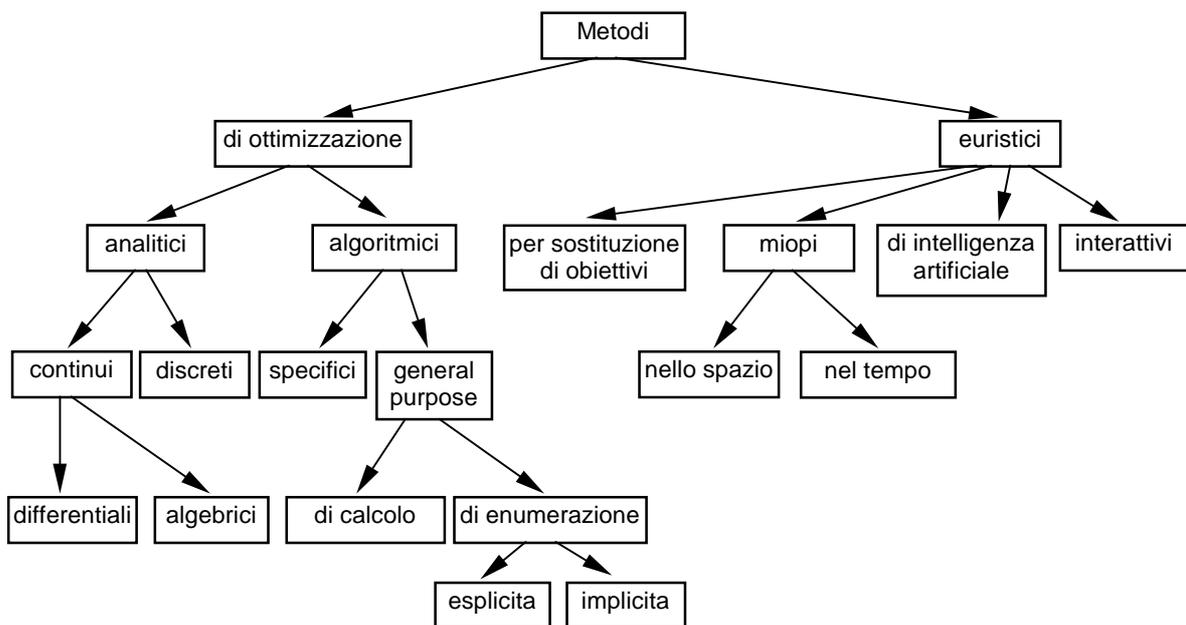


Figura 1. I metodi di scheduling, fonte: (Garetti, Lanza, Pozzetti, 1989).

3. Analisi critica dell’evoluzione della ricerca e dell’offerta di soluzioni di scheduling

Tralasciando per ovvi motivi di sinteticità lo sviluppo storico e cronologico dei vari modelli ed algoritmi di scheduling, è possibile identificare quattro momenti (*ere*) fondamentali di sviluppo:

- l’era del paradigma *CIM*, Computer Integrated Manufacturing (anni ‘70-’80), caratterizzata dalla ricerca dell’ottimizzazione integrata di tutte le attività produttive in un ciclo chiuso di pianificazione, programmazione e controllo avanzamento; come noto (Bartezzaghi, Spina e Verganti, 1994; Mariotti, 1994), tranne che per alcuni casi sporadici, il CIM si è rivelato essere un paradigma utopico nella pratica;
- l’era dei sistemi *euristici* (anni ’80), caratterizzata dalla ricerca di algoritmi che permettessero di automatizzare i processi decisionali svolti dai programmatori di reparto, con l’obiettivo non tanto di ottimizzare funzioni decise a priori, quanto di velocizzare e rendere più frequente e ripetitiva l’esecuzione delle fasi di

- programmazione;
- l'era della *complessità* o del *virtual manufacturing* (dalla seconda metà degli anni '80, in parte tuttora in corso almeno come filone di ricerca), caratterizzata dalla ricerca di soluzioni che consentissero di riconfigurare in modo automatico il sistema a fronte di mutate condizioni esogene (sistemi esperti), o che permettessero, attraverso la ricerca di analogie tra sistemi produttivi ed altri sistemi, quali quelli biologici o sociali, ecc., una modellizzazione flessibile del sistema produttivo (reti neurali, algoritmi genetici, reti di Petri);
- l'era dei vari paradigmi *lean*, *agile*, *versatile manufacturing*, ecc. (iniziata nei primi anni '90 e tuttora in corso), che rappresenta un evidente momento di *riflessione* e *ripensamento* a fronte dell'evidente crisi dei sistemi automatici basati sul paradigma di controllo gerarchico centralizzato top down; in quest'era, applicazioni industriali e ricerca scientifica conoscono un momento di evidente dicotomia: se da un lato le prime sono caratterizzate dalla ricerca di soluzioni sempre più interattive e ricche di informazioni a supporto dell'operatore, dall'altro la seconda si muove verso paradigmi di controllo innovativi (controllo gerarchico bottom up o addirittura controllo distribuito) che, per contro, sono caratterizzati ad oggi da un'elevata complessità dell'architettura.

Una classificazione delle soluzioni presenti nelle differenti *ere* esaminate è riportata in Figura 2.

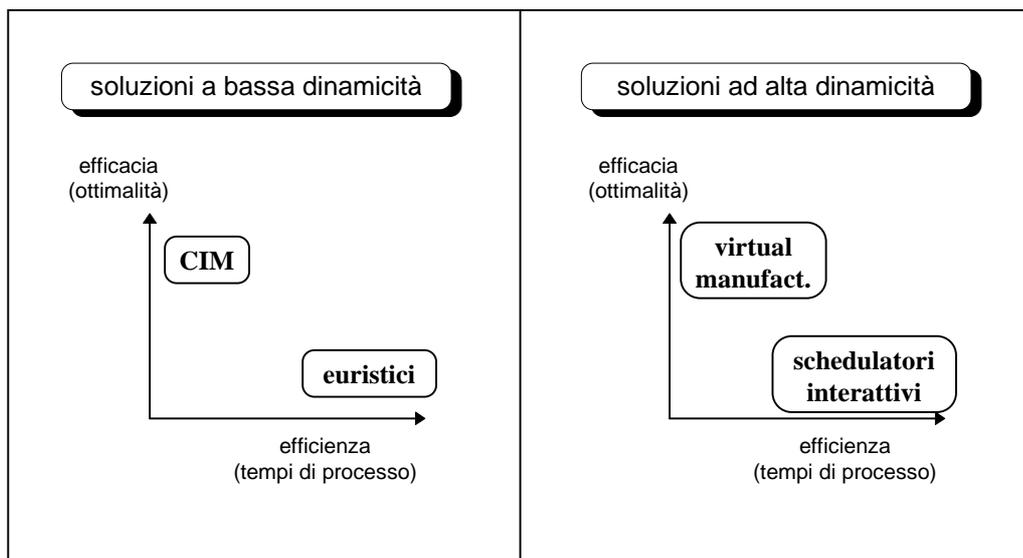


Figura 2. Caratteristiche dei paradigmi di scheduling.

Le differenti *ere* verranno ora sinteticamente ripercorse in un'ottica critica, in modo da mettere in evidenza i risultati empirici ottenuti nel tempo dalle varie applicazioni industriali. In particolare, si cercherà di comprendere i motivi per cui alcuni paradigmi non abbiano portato ai benefici attesi; si indagherà su quali aspetti di ciascun paradigma (in termini di modalità di approccio ai problemi) abbiano generato quali effetti in termini di soluzioni; infine, si tenterà di identificare quanto dei passati paradigmi sia ancora valido nell'attuale era di ripensamento e perché.

Tabella 2. Classificazione dei paradigmi di scheduling.

ERA	CONTROLLO	APPROCCIO	TECNICA
CIM	gerarchico	automatico	di ottimizzazione o euristica
Euristici	gerarchico	automatico	euristica
Virtual Manufact. Intelligenza artificiale reti neurali Algoritmi genetici Agenti autonomi	gerarchico gerarchico gerarchico distribuito	automatico automatico automatico automatico	euristica euristica euristica euristica
Schedulatori interattivi	distribuito (delega all'operatore)	interattivo	euristica + operatore

I sistemi CIM

Il paradigma CIM, sviluppatosi in seguito ai significativi progressi dell'automazione industriale, dell'informatica e dell'elettronica verificatisi a partire dai primi anni '70, è caratterizzato sinteticamente dai concetti di:

- sistema di controllo gerarchico top down, sia a livello software, sia a livello hardware: è presente infatti una architettura informatica distribuita su più livelli che, partendo dallo shop floor dove sono presenti macchine dotate di elevato grado di automazione, integra tutti i livelli decisionali aziendali; le decisioni prese a livello "top" vengono via via dettagliate in piani di fabbrica, reparto, centro, macchina e ad ogni livello decisionale è presente un'applicazione che ha il compito di effettuare la pianificazione e lo scheduling per quel livello assumendo come input il piano schedulato a livello superiore; dai livelli inferiori risalgono invece le consuntivazioni delle operazioni effettuate ed eventuali allarmi che permettono di innescare quindi automaticamente le rischedulazioni necessarie;
- l'approccio è di automazione completa; ogni procedura deve essere codificata e formalizzata in modo che sia quindi possibile processarla in automatico;
- le tecniche utilizzate per la schedulazione sono sia di tipo ottimizzante, sia di tipo euristico a seconda del livello di complessità del sistema fisico da programmare.

L'analisi di molti progetti CIM lanciati in aziende di differenti settori industriali mostra come i benefici ottenuti (quando il progetto è stato portato a termine) siano stati sensibilmente inferiori alle aspettative iniziali.

Le motivazioni dei molteplici insuccessi sono però insite nelle caratteristiche del paradigma stesso:

- l'automazione integrata della produzione porta come conseguenza diretta un irrigidimento, in quanto è noto come, per ottenere benefici dall'automazione, sia necessario procedere a onerosi processi di standardizzazione, alla revisione molto spesso della struttura del prodotto, delle attrezzature, degli utensili e dei processi produttivi in generale; appare chiaro come da un lato queste attività comportino costi difficilmente quantificabili ed in ogni caso non trascurabili, dall'altro come questi processi siano onerosi in termini di tempo;
- la competizione sulla differenziazione del prodotto mette in crisi i sistemi produttivi CIM che, per quanto detto sopra, hanno come prerequisito la standardizzazione;
- l'ambizione di realizzare un sistema di programmazione che preveda solo l'utilizzo *integrato* (cioè su tutti i prodotti e processi) di sistemi di scheduling algoritmici si

scontra con la realtà: in qualsiasi azienda industriale esistono infatti processi che sono difficilmente codificabili e regole decisionali difficilmente formalizzabili né con l'utilizzo in termini algoritmici e la cui modellizzazione in un sistema automatico comporta fatalmente approssimazioni tali che fa sì che il modello non sia poi più aderente alla realtà modellizzata;

- infine l'utilizzo di modelli ottimizzanti monoobiettivo che schedulano una risorsa critica⁴ produce un disallineamento tra il modello e la realtà che, praticamente sempre, richiede approcci multiobiettivo, con numerose risorse critiche da programmare (si pensi al caso del job shop in cui le risorse critiche possono essere, in funzione del mix, la manodopera, gli attrezzi, le macchine, gli utensili).

Come esemplificazione delle difficoltà di implementazione di un sistema CIM, si riporta qui un estratto del Caso Loro & Parisini, tratto da (Grando, Sianesi, 1990).

Loro & Parisini S.p.A., una delle aziende italiane leader del settore della fabbricazione, assemblaggio ed installazione di macchinari ed impianti per frantumazione utilizzati in cave, e impianti per la fabbricazione del calcestruzzo, sul finire degli anni '80 iniziò un progetto di automazione integrata del proprio sistema produttivo.

Uno degli elementi cardine del progetto CIM era costituito da uno schedulatore ottimizzante di fabbrica che avrebbe dovuto coordinare tutte le fasi di fabbricazione ed assemblaggio, garantendo una completa integrazione sia con il sistema di pianificazione dei fabbisogni dei materiali MRP aziendale, sia con i sistemi di raccolta dati di avanzamento produzione installati sulle macchine operatrici (centri di lavoro ad elevato livello di automazione).

Il progetto CIM in Loro & Parisini non ha mai visto la luce nella sua globalità sia per errori di impostazione (l'azienda operava tipicamente su commessa poco ripetitiva e questo fatalmente si è scontrato con la necessità di standardizzare prodotti e processi, derivante dall'utilizzo pervasivo dell'automazione), sia per il dilatarsi dei tempi di progetto, tra le cui cause senz'altro va annoverata anche la difficoltà di mettere a regime lo schedulatore ottimizzante. Solo a titolo di esempio, si riportano alcune delle problematiche che si sono dovute affrontare in Loro & Parisini:

- *lo schedulatore era "unico" per una serie di processi produttivi differenti, mentre la stessa logica di ottimizzazione non si addiceva per tutte le operazioni;*
- *alcuni centri di lavoro erano modellizzati dallo schedulatore come se fossero stati in serie, in realtà in officina alcune operazioni venivano accorpate ed eseguite in parallelo su un solo centro, per evidenti motivi di ottimizzazione dei tempi di setup e dei tempi di lavorazione. Poiché lo schedulatore non gestiva questi accorpamenti (praticamente impossibili da ricondurre ad una logica di ottimizzazione secondo modelli matematici), questi ultimi venivano gestiti con "forzature manuali" generando una serie di problemi di controllo avanzamento delle lavorazioni, di verifica del carico dei centri, del rispetto della due date, ecc.;*
- *mentre in officina era prassi comune l'utilizzo di cicli alternativi (per evidenti ragioni di flessibilità), lo schedulatore aveva difficoltà a gestire queste situazioni, soprattutto per problemi di sincronizzazione con i cicli gestionali (che, prima dell'introduzione dello schedulatore non prevedevano cicli alternativi essendo stati definiti a livello di reparto e non a livello di singola risorsa).*

⁴ Alla luce della complessità dei contesti reali, l'utilizzo di tecniche multi-obiettivo non è compatibile con i fabbisogni di tempestività di elaborazione.

I sistemi euristici

Lo sviluppo dei sistemi euristici nelle applicazioni industriali a partire dagli anni '80 trae spunto dalla constatazione delle difficoltà incontrate sia in sede di definizione della funzione obiettivo da modellizzare in sede di scheduling, sia in sede di modellizzazione dei vincoli da considerare.

Gli obiettivi *minimi* che più frequentemente sono richiesti ad un sistema automatico di schedulazione infatti sono:

- l'affidabilità e ragionevolezza dei piani di produzione elaborati, delle date di inizio e fine lavori proposte, delle sequenze di esecuzione delle varie fasi, ecc., il che richiede di considerare la capacità di più risorse critiche, di quantificare il tempo perso per l'esecuzione dei setup, (spesso i setup dipendono dalla sequenza e, quindi, non possono essere trattati semplicemente come una maggiorazione del tempo di ciclo), di verificare la disponibilità di materiali e componenti o la congruenza con la programmazione delle fasi a monte e a valle;
- l'ottimizzazione delle risorse critiche, il che spesso comporta il dover considerare vincoli specifici difficilmente modellizzabili in modo generale;
- il supporto al programmatore nell'elaborare piani di produzione alternativi che permettano di descrivere differenti scenari, il che impone di considerare livelli di aggregazione dati differenti in funzione degli orizzonti selezionati.

Gli obiettivi sopra sinteticamente elencati possono essere assai difficili da raggiungere in quanto è spesso arduo modellizzare correttamente la realtà in termini di vincoli: ad esempio, in caso di fasi successive svolte in sequenza, spesso è necessario dover gestire l'overlapping tra le varie fasi e questo, a sua volta, comporta il dover definire quali sono i quantitativi minimi di trasporto tra fase e fase, che non sono necessariamente fissi (pari a un pallet, ad esempio), ma possono dipendere dal contesto, dal carico, dalla disponibilità di trasportatori, ecc..

A fronte delle difficoltà incontrate dagli approcci ottimizzanti nel soddisfare pienamente le esigenze degli utenti, l'approccio per modelli euristici rappresenta un cambiamento completo di filosofia di soluzione: si abbandona l'utopia di riuscire a modellizzare la realtà in modo finissimo e si rivaluta l'esperienza del programmatore cercando di mettergli a disposizione un set di strumenti che gli permetta di svolgere i propri compiti in maniera sostanzialmente più veloce ed efficiente.

L'euristico molto spesso non è altro infatti che la trascrizione informatica del flow chart delle operazioni svolte in manuale dall'operatore in sede di programmazione.

Il progetto di un sistema euristico richiede quindi l'analisi assieme all'utente delle modalità di programmazione utilizzate, la codifica di queste modalità secondo regole di tipo "if then" e, spesso, l'adeguamento del data base di produzione in modo che contenga anche tutte le informazioni non formalizzate utilizzate dal programmatore. Nei sistemi euristici l'architettura è quindi caratterizzata da:

- sistema di controllo gerarchico top down, i modelli euristici si pongono normalmente "a valle" delle elaborazioni di pianificazione MRP;
- approccio di parziale automazione; le regole di programmazione "standard" devono essere codificate e formalizzate in modo che sia quindi possibile processarle in

automatico; tuttavia, per far fronte ad imprevisti o a variazioni di regole e criteri imposti da fenomeni di contesto, deve essere possibile lasciare al programmatore la possibilità di intervenire sul piano elaborato, al fine di poter variare sequenze di prodotti, allocazioni prodotto-macchina, ecc.;

- le tecniche utilizzate per la schedulazione sono ovviamente di tipo euristico alla luce del normale livello di complessità del sistema fisico da programmare.

Il successo dell'algoritmo euristico dipende essenzialmente da quanto bene è stata svolta la fase di analisi assieme all'utente e dal livello di complessità in termini di numero di decisioni alternative che si possono prendere e grado di interrelazione esistente tra queste decisioni. Gli esempi di successi di sistemi di scheduling basati su euristici ad hoc sono senz'altro assai più numerosi di quelli dei sistemi CIM in quanto:

- codificare i flussi decisionali in essere con programmi ad hoc permette di evitare di dover ricorrere ad approssimazioni in sede di modello;
- l'esperienza del programmatore fa sì che spesso nel flow chart utilizzato in sede di programmazione le situazioni multiobiettivo siano già state risolte in modo implicito dal programmatore stesso con regole ad hoc sviluppate autonomamente;
- il sistema di scheduling è senz'altro più snello, non richiede l'automazione integrata dei processi produttivi o il ridisegno dei prodotti e quindi può facilmente adattarsi anche ad aziende di medio piccole dimensioni che non dispongono di macchinari sofisticati o che non possono permettersi onerosi processi di standardizzazione; peraltro è evidente che quanto più lo shop floor è automatizzato in termini di procedure di consuntivazione dell'avanzamento produzione, tanto più il sistema di scheduling ha possibilità di fornire piani corretti ed allineati con l'evoluzione reale del sistema.

Per contro, anche i sistemi euristici presentano una serie di difetti intrinseci che, nel medio periodo, portano spesso all'abbandono della soluzione oppure al cambio del sistema di schedulazione o, ancora, alla riprogettazione delle regole di programmazione. I difetti principali sono:

- normalmente i modelli euristici sono realizzati "per reparto", delegando al sistema MRP (nella fase di fissazione delle date di inizio-fine dei vari job da processare) la garanzia di congruenza tra i vari reparti della stessa fabbrica; questo comporta il fatto che spesso i sistemi euristici debbano affrontare problemi irrisolvibili, in quanto l'elaborazione MRP effettuata a monte può aver generato date di inizio-fine non congruenti con i vincoli di capacità produttiva o di disponibilità di materiali e/o risorse ausiliarie;
- i programmi che implementano il sistema di scheduling sono *statici*, nel senso che in essi sono rispecchiate le regole, le convenzioni, le priorità in essere al momento in cui è stata svolta l'analisi: l'evoluzione in termini di cicli, prodotti, processi, esigenze del mercato, strategia dell'azienda impongono quindi, per poter essere considerate, una continua e onerosa manutenzione del sistema di scheduling;
- in sede di analisi è pressoché impossibile individuare e quindi codificare in forma di "if-then" tutte le possibili risposte che il sistema deve dare a fronte di guasti, variazioni di ordini cliente, ritardi o anticipi dei fornitori, ecc.;
- molte decisioni sono soggette a parametri che dipendono dal contesto temporale (un dato cliente o prodotto che normalmente non sono considerati prioritari possono

diventarlo in modo episodico per uno specifico ordine per ragioni imprevedibili a priori).

Come esemplificazione dei limiti di un modello euristico si riassumono qui i punti fondamentali dell'algoritmo utilizzato per la schedulazione delle linee di assemblaggio dei reparti Just In Time di Toyota. Per la trattazione analitica si rimanda a (Monden, 1983) e (Sianesi, 1996).

Le ipotesi di applicabilità dell'algoritmo euristico sono essenzialmente le ipotesi base della filosofia JIT (Brandolese, 1994) e, in particolare, domanda livellata, tempi di setup trascurabili, insaturazione della capacità produttiva ed elevato grado di disponibilità dei macchinari.

L'algoritmo euristico persegue l'obiettivo di mantenere il più possibile uniforme il consumo dei componenti che devono alimentare la linea di assemblaggio oggetto di schedulazione. L'euristico è particolarmente interessante in quanto non persegue un obiettivo di ottimizzazione della linea finale, bensì cerca, attraverso la schedulazione della linea stessa, di mettere i reparti a monte nelle migliori condizioni per servirla.

I limiti di questo approccio risiedono fondamentalmente da un lato nella difficoltà di tenere in considerazione casi particolari di reparti a monte in cui obiettivi di lottizzazione siano preferibili a obiettivi di regolarizzazione dei consumi, dall'altro nell'impossibilità di adattarsi a situazioni in cui non tutte le ipotesi base del just in time siano verificate (ad esempio: esistenza di setup non trascurabili sulla linea o necessità di programmare sulla base dei componenti disponibili in occasione di situazioni "croniche" di mancanti al montaggio).

Per far fronte ai difetti dei sistemi euristici, l'offerta si è successivamente sviluppata seguendo due direttrici differenti:

- una prima direttrice ha sposato il principio che "per gestire situazioni produttive complesse e turbolente è necessario aumentare il livello di complessità dei sistemi software"; a questa direttrice appartengono senz'altro i sistemi basati su reti neurali, algoritmi genetici ed anche (almeno per quanto riguarda la complessità dell'architettura software) gli approcci di controllo distribuito basati sugli agenti autonomi intelligenti, che non verranno però trattati in questo lavoro in quanto rappresentano una delle applicazioni più promettenti dell'attuale ricerca scientifica nel settore ma, al momento, non si sono ancora concretizzati in applicazioni industriali significative;
- una seconda direttrice ha invece sposato il principio della "ricerca della semplicità del sistema"; a questa direttrice (congruente con le filosofie produttive *just in time* e con il paradigma della *lean production*) appartengono senz'altro gli schedulatori interattivi.

I sistemi esperti, gli algoritmi genetici, le reti neurali, ecc.

La direttrice che ha perseguito la strada dell'incremento della complessità ha visto nella seconda metà degli anni '80 un fiorire di soluzioni applicative mirate al superamento dei difetti dei sistemi euristici. Le tecniche che hanno trovato maggior

diffusione verranno passate ora in breve rassegna:

- i sistemi esperti (in particolare i sistemi a regole) sono sistemi software in cui si cerca di codificare in modo parametrico la conoscenza del programmatore (che nei sistemi euristici veniva cablata in un programma software rigido), non in termini di flow chart, ma in termini di un insieme di regole di comportamento; a fronte del verificarsi di un determinato evento, ciascuna regola concorre con tutte le altre secondo una gerarchia assegnata, per essere eletta come la regola da essere utilizzata. Particolari moduli curano poi la *stratificazione* della conoscenza, cercando di mettere in grado il sistema di rispondere a condizioni impreviste mediante deduzioni operate su come in passato erano state risolte situazioni assimilabili. Se dal punto di vista della ricerca scientifica i sistemi esperti rappresentano senz'altro un argomento assai stimolante, dal punto di vista delle applicazioni industriali le loro applicazioni sono invece estremamente limitate, per lo più a causa della complessità del software, dei tempi di risposta (che impediscono l'esecuzione di frequenti rischedulazioni) e della lunghezza del periodo di codifica della conoscenza dell'esperto (il programmatore) nella base di dati del sistema software;
- le reti neurali sono particolari sistemi esperti in cui la conoscenza non è codificata attraverso regole comportamentali, bensì attraverso un'architettura *pseudo cerebrale* composta da nodi binari (neuroni), pesi (eccitatori e inibitori) e connessioni; sebbene tale tecnica faciliti il processo di apprendimento (e quindi la gestione di scenari turbolenti) rispetto ai sistemi a regole, le sue applicazioni sono generalmente limitate a casi particolari (taglio dei metalli, sistemi di diagnostica, sistemi di ispezione qualità), mentre non sono note applicazioni complete di scheduling a reparti complessi; la causa di ciò risiede, analogamente a quanto detto per i sistemi esperti, nel considerevole sforzo di modellizzazione e nella conseguente *distanza* che rischia di crearsi tra il sistema di scheduling e il sistema fisico da programmare;
- gli algoritmi genetici infine rappresentano una particolare classe di euristici *adattativi* basati su principi derivati dall'evoluzione dei sistemi biologici; l'algoritmo è in pratica un sistema di ricerca che assimila il problema da modellizzare ad un problema di sviluppo: solo gli individui (soluzioni) che possiedono determinate caratteristiche genetiche sopravvivono in determinati contesti e meglio si adattano a turbolenze dell'ambiente esterno; quanto detto a proposito delle reti neurali vale, dal punto di vista qualitativo, anche per gli algoritmi genetici.

In conclusione, è opportuno evidenziare un limite che accomuna le diverse tecniche afferenti alla classe esaminata: per quanto complesse possano essere le loro applicazioni, ben difficilmente esse possono gestire situazioni episodiche o difficilmente modellizzabili (quali, ad esempio, la maggior abilità di un operatore rispetto ad un altro nell'eseguire una data operazione).

Gli schedulatori interattivi

Gli schedulatori interattivi rappresentano dal punto di vista logico, il sistema più semplice in assoluto, in quanto la schedulazione non è operata da nessun sistema, bensì dal programmatore.

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

Ovviamente gli schedulatori interattivi hanno tratto grande beneficio dallo sviluppo delle funzionalità offerte dagli elaboratori in termini di potenzialità di rappresentazione grafica, gestione multifinestra, architetture ad oggetti, ecc., tanto che la maggior parte degli schedulatori oggi in commercio (ed utilizzati largamente nelle realtà industriali) è strutturata secondo questo tipo di approccio (l'automazione è spesso limitata alla formulazione di un piano di massima iniziale secondo semplici regole).

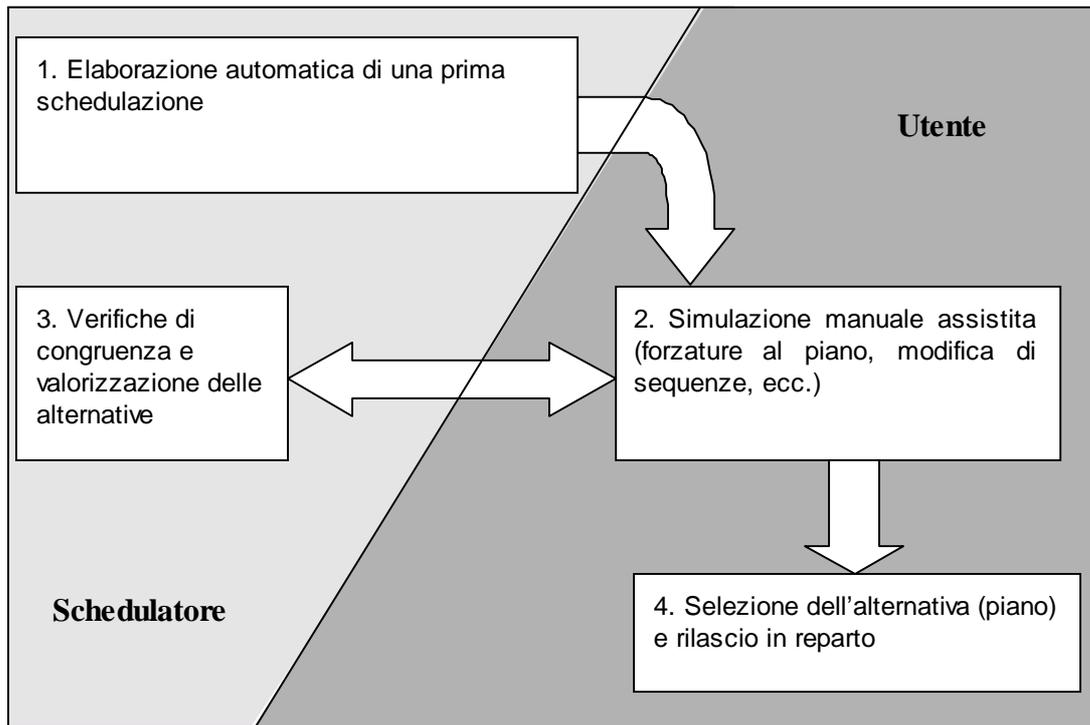


Figura 3. Architettura di funzionamento di uno schedulatore interattivo.

L'architettura di funzionamento di uno schedulatore interattivo è rappresentata in Figura 3. I passi in cui si sviluppa una sessione di schedulazione sono esposti di seguito, tralasciando ovviamente quelli relativi all'interfacciamento con il restante sistema informativo per l'acquisizione degli ordini da programmare e per la restituzione dei piani rilasciati.

1. Elaborazione automatica di una prima schedulazione; questa prima fase è mirata ad automatizzare le operazioni di allocazione dei lavori alle risorse produttive ed è eseguita basandosi su algoritmi (ottimizzanti, euristici, ecc.) che operano in modalità trasparente per l'utente e che forniscono una soluzione che non ha l'ambizione di essere la soluzione finale da rilasciare ai reparti, bensì solo una prima soluzione "di partenza", per successivi affinamenti e/o variazioni da compiere a cura del programmatore. In questa fase pertanto si "recuperano" le tecniche menzionate in precedenza; gli schedulatori interattivi più evoluti dispongono infatti di "librerie" di queste tecniche, il che rende estremamente importante la fase di parametrizzazione dello strumento, in quanto è in questa fase che si selezionano le tecniche più

adatte a generare questa prima soluzione. Tanto più questa delicata fase è gestita in modo adeguato, tanto più efficace sarà ovviamente l'utilizzo dello strumento in azienda.

2. Simulazione; in questa fase l'utente, a partire dalla prima soluzione generata dallo schedatore interattivo e sfruttando le potenzialità di interfaccia offerte dai moderni schedatori, opera in modalità interattiva tutte le variazioni e/o affinamenti richiesti dal contesto. Ogni variazione rappresenta dal punto di vista logico l'emissione di un'alternativa di piano (ad esempio il programmatore può decidere di anticipare un ordine rispetto a quanto proposto dal sistema, oppure può decidere di variare l'allocazione dei prodotti alle macchine o, infine, può variare le sequenze di realizzazione, ecc.). Ciascuna di queste alternative viene quindi "verificata" e "valorizzata" nella fase successiva.
3. Verifica di congruenza e valorizzazione; il sistema in questa fase opera fondamentalmente un controllo che le forzature o le variazioni apportate dal programmatore siano congruenti con i vincoli del problema, cioè, ad esempio, sia rispettata la sequenza delle fasi di lavorazione da eseguire su un dato particolare, siano verificati i vincoli di disponibilità dei materiali e semilavorati, siano rispettati i vincoli relativi alla capacità produttiva (macchine e/o manodopera) ed alla disponibilità delle risorse ausiliarie (attrezzisti, utensili, pallet, trasportatori, ecc.). Ogni alternativa viene quindi in modo automatico "valorizzata" dallo schedatore interattivo, nel senso che è immediato ottenere informazioni circa il profilo delle giacenze derivante dal rilascio del piano impostato, i ritardi, il tempo da dedicare all'esecuzione dei setup, la saturazione delle macchine, le code, i tempi di attraversamento, ecc.
4. Rilascio; questa fase consiste fondamentalmente nella selezione dell'alternativa di piano giudicata "migliore" dal programmatore, nel congelamento di tale decisione e nell'emissione di tutta la documentazione operativa di fabbrica.

Come si può notare, l'approccio dello schedatore interattivo è in sintesi un approccio di tipo simulativo: all'utente vengono forniti un insieme di strumenti che permettono di testare velocemente differenti alternative di programmazione, valorizzandole sulla base di indicatori di efficacia ed efficienza, verificandone la congruenza (rispetto dei vincoli interni – es. capacità produttiva, sequenza delle fasi - ed esterni – es. lead time dei fornitori, date richieste dai clienti) e confrontando tali alternative sia in modo tabellare, sia in modo grafico, per procedere quindi alla scelta dell'alternativa (piano) da rilasciare in reparto.

4. L'evoluzione dell'integrazione tra sistema di scheduling e sistema informativo aziendale

Può essere interessante accennare in questa sede al problema di come integrare il sistema di scheduling di reparto (o più sistemi di scheduling di differenti reparti o unità produttive) nel più ampio sistema informativo aziendale.

Per far ciò si intende analizzare come è stato risolto in passato questo problema, al fine di identificare quale possa essere oggi un assetto di integrazione congruente.

Storicamente, la prima applicazione di sistema informativo nell'area tecnico produttiva è stato il sistema MRP (*Material Requirements Planning*), ossia il sistema che consente la definizione dei fabbisogni datati di prodotti finiti sottassiemi, componenti e materie prime, noto il piano di vendita in un orizzonte temporale che può variare dal mese all'anno. Tale applicazione rappresenta tuttora, soprattutto nei moderni sistemi informativi integrati (o ERP, *Enterprise Resources Planning*) la *spina dorsale* del sistema informativo di qualsiasi azienda manifatturiera in quanto molte applicazioni (ad esempio la contabilità industriale) si appoggiano a dati tecnici specifici di MRP (anagrafiche, distinte) o produttivi in generale (cicli, dichiarazioni di avanzamento, ecc.). Questa situazione fa sì che oggi la procedura MRP sia ormai considerata facente parte a tutti gli effetti del sistema informativo gestionale.

Partendo da questo assetto (sistema gestionale con MRP), gli sviluppi in termini di integrazione dei sistemi di schedulazione a cui in passato hanno teso le aziende sono stati:

- integrazione del sistema tradizionale MRP con un sistema di schedulazione a capacità finita, tipicamente realizzato mediante il trasferimento dal sistema gestionale di dati relativi a ordini, anagrafiche, distinte, ecc. e spesso integrato solo in una direzione (da sistema gestionale a schedulatore); la considerazione che per operare buone schedulazioni è necessario avere una corretta visibilità dell'avanzamento e che tale integrazione non è spesso compatibile con le frequenze di aggiornamento dei sistemi gestionali, ha spinto spesso allo spostamento dell'applicazione controllo avanzamento nel mondo schedulazione, favorendo la migrazione verso la successiva fase;
- integrazione con controllo avanzamento, in cui tutti i dati dello shop floor sono raccolti on line (con sistema di identificazione automatica bar code e device di lettura sempre più sofisticati) direttamente nel mondo scheduling, in modo da poter operare rischedulazioni su fotografie il più possibile aggiornate degli avanzamenti produttivi;

Gli sviluppi più recenti sono invece avvenuti nel mondo gestionale: il disporre di sistemi gestionali integrati di tipo ERP lascia qualche dubbio sulla necessità di inserire in azienda sistemi di scheduling di reparto; in effetti l'integrazione tra ERP e sistema di schedulazione porta normalmente benefici purché ben progettata in termini di reciproco dominio delle applicazioni, in quanto la schedulazione fine di reparto non è normalmente coperta dalle funzionalità ERP, soprattutto quando i reparti presentano specifiche peculiarità.

In effetti i sistemi ERP ed i sistemi APS (*Advanced Planning System*, acronimo con cui si identificano usualmente i sistemi di schedulazione integrata interattivi) presentano significative differenze. In Tabella 3 sono sintetizzate alcune caratteristiche che contraddistinguono i due sistemi.

Tabella 3. Alcuni elementi di confronto tra le caratteristiche dei sistemi ERP e APS

	ERP	APS
Focalizzazione su	Gestione ed integrazione dati aziendali mediante elaborazioni spesso di tipo	Analisi e simulazioni di reparti o catene logistiche effettuate anche in real time

	batch	
Modellizzazione della capacità produttiva	Infinita (o gestita in modo indiretto tramite i lead time)	Finita e dettagliata in risorse produttive (es. macchine e manodopera) ed ausiliarie (es. attrezzisti, utensili, ecc.)
Controllo	Gerarchico top – down	Controllo integrato delle risorse produttive, possibilità di avere controllo distribuito per i vari reparti e possibilità di approcci bottom-up
Logiche di calcolo	Semplici (esempio: esplosione della distinta base), completamente automatizzate e ripetitive	Algoritmi di ottimizzazione, euristici, di intelligenza artificiale utilizzati per proporre le “soluzioni di partenza”, da modificare a cura del programmatore

Anche dall’analisi delle poche caratteristiche riportate in tabella, appare evidente come i fabbisogni di pianificazione, programmazione e controllo della produzione possano essere maggiormente soddisfatti da sistemi quali gli APS, contraddistinti da un’impostazione orientata alla simulazione, alla modellizzazione di dettaglio del problema ed alla gestione interattiva dell’emissione delle soluzioni (piani di produzione). Al fine di soddisfare sia i fabbisogni aziendali di centralizzazione del controllo ed integrazione delle informazioni, sia i fabbisogni logistico-produttivi, si rende pertanto necessario analizzare le migliori modalità di integrazione tra i sistemi aziendali (ERP) ed i sistemi logistico-produttivi (APS).

Sono qui riportate alcune considerazioni relative al posizionamento di alcune informazioni e di alcune attività di frontiera tra ERP e schedulazione.

La prima considerazione riguarda i criteri di posizionamento di eventuali dati di completamento in termini di magazzini, cicli, distinte, ecc. richiesti dal sistema di scheduling ma che necessariamente servono ad altre applicazioni ERP. A giudizio degli autori è necessario catalogare i dati richiesti dalla schedulazione e mancanti nell’ERP in funzione della loro *valenza*:

- dati quali i magazzini (saldi e movimenti), i codici di alcuni prodotti intermedi, le distinte ed i cicli standard abbiano una *valenza aziendale*, devono pertanto essere gestiti a livello ERP ed il sistema informativo di produzione deve acquisirli (codici, distinte, cicli standard) o preoccuparsi di aggiornarli (magazzini); la motivazione di questo è che i dati sopra citati potrebbero avere in futuro rilevanza anche ai fini di costing di prodotto in particolare e contabilità industriale in generale, pertanto sembra corretto che essi vengano gestiti in modo congruente ai restanti dati utilizzati per il costing;
- dati quali macchine alternative, tempi di setup, distinte alternative, ecc. hanno invece una *valenza prettamente produttiva*, e quindi possono essere di proprietà (e gestione) anche del solo sistema di schedulazione;

La seconda e più importante considerazione riguarda il posizionamento del sistema di gestione dell’ordine cliente, soprattutto quando sono richieste funzionalità di

tipo ATP (Available To Promise)⁵: a giudizio degli autori si ritiene che questa attività sia di competenza ERP e non debba quindi essere gestita dal sistema di schedulazione; a supporto di tali funzionalità, infatti, lo schedulatore dovrebbe operare sempre in modalità “slave” rispetto all’ERP, trasmettendo al più informazioni di ritorno, quali slack di capacità, ordini di produzione pianificati, date di prevista disponibilità dei prodotti a magazzino in funzione dei piani, ecc..

Tale scelta permette di evitare la creazione di duplicazioni informative tra i sistemi dedicati di schedulazione, che per loro natura sono sistemi *locali* in modo da riuscire a gestire al meglio realtà produttive anche significativamente differenti, e l’ERP, che per definizione è un sistema *aziendale*, nel quale devono quindi essere presenti le logiche di gestione degli enti che fanno front end con il mercato, quali il Commerciale e la Logistica, e che è auspicabile siano *omogenee* a livello azienda e non personalizzate per unità produttiva.

5. Conclusioni.

L’analisi effettuata, permette di identificare i motivi principali per i quali esiste una forte dicotomia tra sforzo di ricerca ed applicazioni industriali di sistemi di scheduling automatizzati (ottimizzanti, euristici, basati su tecniche di intelligenza artificiale, ecc.) tale da giustificare il successo che recentemente stanno avendo i sistemi di scheduling interattivi:

- molto spesso in azienda si riscontra la presenza di dati non congruenti (dati non formalizzati o difficilmente formalizzabili, procedure e norme affidate all’esperienza degli operatori, ecc.) per la generazione e l’analisi del piano di produzione; questo porta come risultato ad avere piani di produzione tanto più inutilizzabili quanto più i modelli ottimizzanti sono di dettaglio. Gli schedulatori interattivi invece, delegando all’uomo la funzionalità di generazione del piano, riescono a superare questi problemi; tuttavia è ovviamente *consigliabile* procedere in ogni caso ad un adeguamento della qualità dei dati utilizzati per la programmazione;
- negli schedulatori ottimizzanti (ed anche in quelli euristici) i piani di produzione spesso non sono validati sull’effettiva disponibilità delle risorse (macchine, manodopera, attrezzature) e dei materiali perché i sistemi di scheduling non riescono a tenere contemporaneamente in considerazione più risorse critiche; ne conseguono infattibilità dei piani, ritardi non previsti e necessità di frequenti rischedulazioni, il che porta di fatto ad una gestione per urgenze (i programmatori diventano sollecitatori), a situazioni di “emergenza cronica” ed al peggioramento dei parametri di prestazione (lead time, work in progress, ecc.). Anche in questo caso, gli schedulatori interattivi forniscono una soluzione al problema, in quanto l’interattività dello strumento di programmazione permette di supportare l’utente in modo più efficace che non uno strumento di generazione automatica di piani “ottimi”;
- la complessità ed i tempi di elaborazione degli schedulatori automatici rendono spesso difficile la valutazione di alternative in termini di costi e di opportunità con

⁵ Il calcolo dell’ATP definisce le quantità di prodotti disponibili per la consegna in uno specifico orizzonte temporale.

- approcci simulativi di tipo *what if*;
- nei sistemi produttivi in genere è presente un ampio spettro di tipologie di risorse (macchine singole, *job shop*, linee, ecc.); da ciò nasce l'esigenza di uno strumento di schedulazione che sia *configurabile*, ossia che possa essere facilmente adattato a differenti contesti produttivi; gli schedulatori interattivi rispondono a questa esigenza: la configurabilità è ottenuta agendo su specifici parametri e minimizzando quindi le personalizzazioni, che dovrebbero essere limitate al solo interfacciamento tra sistema di schedulazione e restante sistema informativo aziendale.

Analogamente a quanto successo in passato per i sistemi MRP, l'insieme di questi fattori, unito alla turbolenza dello scenario, alla sempre maggior frequenza con cui si presentano nuovi problemi e soluzioni innovative, al ridursi del ciclo di vita delle soluzioni stesse, porta a situazioni in cui le soluzioni algoritmiche adottate (o gli strumenti inseriti) nel contesto produttivo non forniscono i risultati attesi, non per errori intrinseci degli strumenti, quanto per problemi di *start-up*, causando fatalmente il *rigetto* da parte della struttura aziendale preesistente.

Oltre alle difficoltà di tipo "tecnico", che orientano verso la scelta di schedulatori interattivi piuttosto che non di soluzioni automatiche, sono da valutarsi anche gli aspetti connessi all'architettura del sistema informativo ed alle ricadute organizzative.

Nel capitolo precedente si è esaminata l'evoluzione delle soluzioni, facendo intravedere come una architettura "di riferimento" possa essere l'integrazione di sistemi ERP con sistemi APS; mentre le difficoltà "tecniche" sopra elencate accomunano aziende di piccole, medie e grandi dimensioni, gli aspetti legati all'assetto del sistema informativo ed ai problemi "organizzativi" di *start-up* sono spesso una criticità peculiare delle piccole e medie imprese. Innanzitutto si constata che l'architettura ERP-APS è senz'altro sovradimensionata, non tanto per aspetti legati alla tecnologia o all'investimento nei sistemi informativi, quanto per aspetti di tipo "organizzativo". La gestione anche di un semplice progetto di informatizzazione delle procedure di scheduling (non quindi di un più ambizioso progetto ERP) richiede infatti sotto il profilo organizzativo (Secchi, 1997) una chiara assegnazione di responsabilità e compiti, nonché una disponibilità di professionalità capaci di gestire un processo aziendale complesso ed articolato. Questo può costituire un elemento di criticità nelle piccole e medie imprese, dove la struttura organizzativa è spesso sottodimensionata rispetto ai fabbisogni di un progetto di revisione o implementazione del sistema informativo di schedulazione, in quanto differenti responsabilità e compiti fanno capo a poche persone fisiche, la cui disponibilità di tempo si rivela dunque critica prima ancora di iniziare il progetto.

Alla luce delle difficoltà sia "tecniche", sia soprattutto "organizzative" che si incontrano nella introduzione di sistemi di programmazione operativa della produzione (soprattutto nelle piccole e medie imprese), la soluzione che oggi sembra meglio coniugare i fabbisogni di tempestività di informazione e di utilizzo efficiente delle risorse (ivi compreso il responsabile della programmazione) è rappresentata senz'altro dagli schedulatori interattivi, eventualmente integrati con sistemi ERP nel caso di aziende di medio-grandi dimensioni. Questa soluzione permette infatti di arricchire significativamente il patrimonio di dati ed informazioni che il programmatore normalmente utilizza per predisporre i piani, consente di gestire in modo efficiente i problemi legati alla difficoltà di trovare una soluzione "ottima" al problema (delegando

all'operatore le scelte influenzate da parametri non formalizzabili) e permette l'esecuzione di frequenti rischedulazioni a fronte di urgenze o imprevisti.

Per contro, a fronte dell'aumento di complessità in termini di volumi di dati da gestire (incremento del numero di codici prodotto e delle tipologie di differenti processi produttivi), è sempre più necessario porre attenzione non solo alle funzionalità di interattività proprie di questi strumenti, ma anche alle funzionalità di generazione automatica di piani di produzione, che effettuano ottimizzazioni grossolane su una grande mole di dati (per l'emissione delle prime soluzioni da modificare in seguito a cura del programmatore). Questo ovviamente rende assai critica la fase di modellizzazione e parametrizzazione del sistema, nonché la selezione della soluzione informatica da adottare; quest'ultima considerazione vale indipendentemente dalla dimensione aziendale ed è peraltro in linea con i risultati di recenti ricerche che paiono dimostrare come la dimensione aziendale non sia un criterio di differenziazione significativo in termini di soluzioni gestionali da adottare e come sia senz'altro più rilevante il grado di complessità (Caridi, Funari, Secchi, 1997).

Bibliografia

Baker K.R.

1974 *Introduction to sequencing and scheduling*. John Wiley & Sons.

Bartezzaghi E., Spina G., Verganti R.

1994 *Nuovi modelli di impresa e tecnologie di integrazione*. Franco Angeli.

Bechte W.

1985 "Theory and practice of load-oriented manufacturing control". *International Journal of Production Research*. vol. 26, n. 3, 375-395

Brandolese A.

1994 "Analisi critica di alcuni aspetti del Just In Time". *Economia & Management*. n.5, 9-20

Brandolese A., Brugger G., Garetti M., Misul E.

1985 "Analisi dei sistemi di produzione manifatturieri". *Finanza, Marketing & Produzione*. n. 1

Brandolese A., Pozzetti A., Sianesi A.

1991 *Gestione della produzione industriale*, Hoepli

Caridi M, Funari S., Secchi R.

1997 "Sistemi Informativi di Produzione, risultati dell'indagine empirica". *Rapporto interno della ricerca "Sistemi informativi di produzione integrati"*. SDA Bocconi, Divisione Ricerche

Foley R.D., Suresh S.

1984 "Minimizing the expected flowtime in stochastic flow shops". *IIE Transactions*. vol. 16, n. 4, 391-395

Garetti M., Lanza C., Pozzetti A.

1989 "Tecniche di scheduling per la fabbrica integrata: una proposta di classificazione". *PIXEL*, n.5, 27-37

Grando A.

1995 *Organizzazione e gestione della produzione industriale*. Egea

Grando A., Sianesi A.

1990 *Casi di gestione della produzione industriale*. Egea

Hayes R.H., Wheelwright S.C.

1979, *The dynamic of Process-Product Life Cycles*, Harvard Business Review, marzo-aprile

Johnson S.M

1954 "Optimal two and three stage production schedules with setup times included". *Naval Research Logistics Quarterly*. vol. 1, n. 1, 61-68

Karg R., Thompson G. L.

1964 "A heuristic approach to solving travelling salesman problems". *Management Science*. vol. 10, n. 2, 225-248

Mariotti S. (a cura di)

1994 *Verso una nuova organizzazione della produzione - Le frontiere del post-fordismo*. ETAS Libri

Monden Y.

1983 *Toyota production system*. Institute of Industrial Engineering Press

Moore J.M.

1968 "An n job, one machine sequencing algorithm for minimizing the number of late jobs". *Management Science*. vol. 15, n. 1, 102-109

Nunnikhoven T.S., Emmons H.

1977 "Scheduling on parallel machines to minimize two criteria related to job tardiness". *AIIE Transactions*. vol. 9, n. 3, 288-296

Orlicky J.

1975 *Material Requirements Planning*. McGraw-Hill

Schmenner R.W.

1981 *Production and operations management*. S.R.A.

Secchi R.,

1997 "Pianificazione e programmazione della produzione: quale modello per le piccole e medie imprese?". *Economia & Management*. n. 4, 111-126

Sianesi A.,

1996 "Mixed-model production systems design: an analysis of the impact of plant and management-dependent variables". *9th International Workshop on Production Economics*, Igls, 329-348