



UNIVERSITÀ DI PISA

FACOLTÀ DI INGEGNERIA
Corso di Laurea Magistrale in INGEGNERIA MECCANICA

*“Confronto di modelli di scheduling: il caso
Husqvarna-Motorcycles”*

RELATORI:

Prof. Dott. Ing. *Lanzetta Michele*
Dipartimento di Ingegneria Civile ed Industriale
Dott. *Rossi Andrea*
Dipartimento di Ingegneria Civile ed Industriale

IL CANDIDATO:

Pandolfi Andrea

TUTOR AZIENDALE:

Ing. *Rigolio Stefano*
Production Planning Responsible
Husqvarna-Motorcycles

Anno Accademico 2012 - 2013

Sommario

Il moderno mondo produttivo è caratterizzato da una crescente ansia competitiva che si traduce in ricerca di sistemi produttivi volti a minimizzare i costi delle attività non a valore aggiunto, che vadano ad unire le esigenze di politiche gestionali basate su economie di scala e di politiche basate sulla reattività e flessibilità.

Esigenze di minimizzazione dei costi ed elevata flessibilità, sono in generale contrastanti tra di loro, tuttavia può essere raggiunto un buon compromesso tramite un opportuna pianificazione di medio termine.

In questo elaborato viene affrontato il caso reale Husqvarna-Motorcycles di pianificazione e scheduling della produzione volto ad ottenere piani fattibili ed economici.

All'arrivo in azienda la pianificazione di medio termine dell'assemblaggio veicoli e motori veniva effettuata manualmente con criteri di ottimizzazione legati al buon senso e con l'obiettivo di soddisfare la domanda e allo stesso tempo saturare il più possibile le risorse produttive.

Nella realtà in esame le linee di montaggio veicoli possono essere modellate come una singola macchina su cui viene effettuato un singolo task, con tempi di setup dipendenti e con una finestra temporale di consegna dei job. Ogni job che verrà prodotto al di fuori della finestra temporale sarà soggetto a costi aggiuntivi, che saranno di immobilizzazione e immagazzinamento nel caso in cui il job venga concluso in anticipo, mentre i costi di ritardo non sono valorizzabili ma hanno un forte impatto sull'immagine dell'azienda dato che i job in oggetto nascono da ordini clienti o da previsioni di vendita.

Il lavoro è volto ad automatizzare tale procedura, allo scopo di ottimizzare i tempi persi per il setup e minimizzare i costi di magazzino e immobilizzazione limitando gli eventuali ritardi di consegna del prodotto finito, derivanti da vincoli di capacità produttiva.

La procedura utilizzata combina un algoritmo formalizzato da Dorigo et al nel 1997 denominato ACS (Ant Colony System) per risolvere il problema della sequenza di setup ottima e un algoritmo euristico per ricercare lotti economici e livellare la produzione per fare in modo che si riesca a produrre quanto richiesto dal reparto commerciale.

L'elaborato riguarderà quindi, la presentazione dell'azienda e del suo sistema produttivo, i concetti generali di programmazione della produzione e di scheduling, e la soluzione adottata per ottenere un piano produttivo fattibile ed economico.

Indice

Introduzione	1
Generalità sulla pianificazione di medio periodo in Husqvarna-Motorcycles	1
Linee di assemblaggio	2
Il problema	3
Proposta di una soluzione	5
Risultati e validazione	8
Conclusioni	8

Introduzione

Il lavoro di tesi in oggetto è stato svolto all'interno dell'azienda Husqvarna Motorcycles, casa produttrice di moto off-road e on-road, con l'obiettivo di realizzare uno strumento innovativo per la pianificazione di medio termine della produzione.

In generale, il flusso informativo del processo di pianificazione inizia con le richieste di motoveicoli da parte dell'ufficio commerciale, elaborate a partire da ordini cliente, previsioni di vendita e stock di prodotti finiti a magazzino. Tali richieste ("Sales Request") vengono condivise una volta al mese fra i reparti commerciale e pianificazione della produzione, e fungono da input per la generazione del piano principale di produzione (MPS, master production schedule) da parte del reparto pianificazione della produzione, sulla base del piano MPS precedente e tenendo conto dei vincoli esistenti (capacità produttiva, disponibilità materiali, accordi commerciali con la catena di fornitura). Il piano così elaborato viene inserito nel sistema gestionale per l'esecuzione del modulo MRP.

In Husqvarna Motorcycles è emersa la necessità di dotarsi di strumenti avanzati che permettano la stesura di piani produttivi fattibili, e che permettano di minimizzare i costi di produzione, ed effettuino la schedulazione di dettaglio della produzione, attività svolta tuttora a mano.

Per poter verificare se il piano di produzione sia fattibile o meno, è necessaria una schedulazione puntuale dei job, che non dovranno essere ordinati secondo le classiche regole euristiche volte a minimizzare il makespan, il flow time, la tardiness ecc., ma dovranno essere ordinati secondo criteri di minimo costo di produzione. Secondo tale esigenza, è quindi necessario ricercare una procedura che possa individuare eventuali lotti economici e che realizzi un piano produttivo di minimo costo. Tale strumento non deve essere quindi uno schedulatore puro che vada a sequenziare i job, ma dovrà effettuare prima operazioni di *Lot Sizing* ed infine una schedulazione di dettaglio che fissi delle release date per ogni job e quindi permetta di organizzare la Supply Chain. Ottenuta una pianificazione di medio termine coerente con la capacità produttiva disponibile, sarà possibile avviare l'MRP che effettuerà il calcolo dei fabbisogni.

I classici sistemi gestionali *Enterprise Resource Planning* (ERP), fanno uso di moduli che sono di ausilio alla programmazione della produzione ma non nascono come strumenti per la pianificazione; per colmare la lacuna stanno nascendo software denominati *Advanced Planning Scheduling* (APS) in grado di gestire gli ordini di produzione, i tempi di fornitura e la capacità del plant contemporaneamente, permettendo all'utente di effettuare delle simulazioni su diversi scenari produttivi. Tali strumenti sono in grado di evidenziare le macchine critiche dal punto di vista del carico di lavoro, forniscono date di consegna previste dei singoli job, ma non sono in grado di effettuare analisi economiche se non attraverso simulazioni successive.

Le caratteristiche principali del lavoro in oggetto, rispetto alle metodologie attualmente in uso in campo industriale posso essere riassunte come segue:

- Ricerca di una soluzione vicina all'ottimo dal punto di vista dei costi di setup su tutto il periodo di pianificazione senza la necessità di frammentare l'intero periodo;
- Previsione di eventuali fermi produzione o ore di straordinario;
- Pianificazione effettuata su criteri di minimo costo invece che di minimo tempo;
- Ricerca della combinazione ottima del modo di funzionamento delle linee.

Generalità sulla pianificazione di medio periodo in Husqvarna-Motorcycles

Husqvarna-Motorcycles fa uso della tecnica Material Requirements Planning (MRP), la quale, parte dalla domanda del mercato e in base ad essa calcola i fabbisogni netti, gli ordini di produzione e di acquisto. L'orizzonte temporale su cui viene calcolato l'MRP è 12 settimane, congelando i fabbisogni

per 6 settimane. Tuttavia vengono trasmessi ai fornitori i fabbisogni per periodi superiori a quelli esposti per dare un'indicazione su cosa gli verrà richiesto ai prossimi invii degli ordini di fornitura. Alla base della stesura degli ordini di fornitura c'è appunto la pianificazione aggregata di produzione, che definisce quali articoli produrre, quando, e quanti, ovvero va a realizzare il master production scheduling (MPS). Tale attività, in un'organizzazione come quella descritta, è fondamentale e vincolante dato che sarà la base di partenza dell'MRP e quindi dell'arrivo dei materiali necessari per avviare la produzione.

La performance aziendale è fortemente legata al MPS, poichè consentire modifiche al piano originale, significherebbe introdurre costi aggiuntivi per l'azienda dovendo ricorrere a spedizioni più rapide e quindi più costose, o in alternativa tenere in magazzino una scorta di sicurezza maggiore da cui attingere nel momento del bisogno.

I documenti indispensabili per la redazione del MPS sono quindi:

- la domanda del mercato, quindi le richieste quantitative fornite dal commerciale;
- il calendario di lavoro, ovvero la descrizione quantitativa del tempo a disposizione mensilmente;
- eventuali vincoli tecnologici tra le varie macro attività;
- tempi di setup se non sono trascurabili rispetto al tempo ciclo del prodotto;
- tempi ciclo dei prodotti;
- capacità produttiva.

Per quanto riguarda il budget-obiettivo richiesto dal commerciale, nel caso in esame, vengono fornite scadenze mensili. Tale documento viene aggiornato mensilmente, prima dell'avvio del modulo MRP e quindi della stesura del nuovo MPS. Il budget per il mese immediatamente successivo non potrà subire modifiche eccessive poichè parte dei fabbisogni sono già stati programmati e inviati ai fornitori (ad es. se gli ordini di fornitura vengono inviati ogni 4 settimane e congelano i fabbisogni per 6 settimane, ad ogni invio ci saranno dunque due settimane congelate che non possono subire modifiche sostanziali).

In questo lavoro si vogliono applicare le tecniche di scheduling a monte del MRP e applicarle quindi nella fase di pianificazione di medio termine. Tradizionalmente la fase di scheduling è a valle della pianificazione di medio termine e immediatamente successiva alla stesura del MRP. L'obiettivo è di poter pianificare la produzione in maniera più dettagliata dando l'opportunità al pianificatore di effettuare simulazioni, ottenendo dei piani di minimo costo. In questa fase della pianificazione non si terrà conto della reale disponibilità degli impianti o della disponibilità delle materie prime che saranno analizzate nella schedulazione operativa.

Al mio arrivo in azienda, la pianificazione aggregata di produzione veniva effettuata manualmente cercando di saturare operatori e macchine, richiedendo, quindi, tempi elevati data la complessità delle diverse combinazioni di funzionamento del sistema produttivo. Inoltre un'elaborazione manuale non consente un'ottimizzazione accurata.

Linee di assemblaggio

I modelli Husqvarna-Motorcycles sono suddivisi in famiglie in base al progetto di derivazione e al motore utilizzato. In particolare possiamo distinguere 6 grandi famiglie:

- H10: veicoli enduro e cross 2 tempi da 125cc
- H20: veicoli enduro 2 tempi da 250 a 300 cc
- H25: veicoli enduro e cross 4 tempi da 250 a 300 cc
- HV16: veicoli enduro 4 tempi 450 e 500 cc
- H61: veicoli adventure 4 tempi da 650 cc

line	Family	Operating mode	Redundancy	Flex	Line														
					y1 or y7						Flex + 4 Strokes piena	Flex + 4 Strokes doppia	Flex + 4 Strokes tripla	Flex + 2 Strokes piena	Flex + 2 Strokes doppia	Flex + 2 Strokes tripla			
					4 Strokes			2 strokes											
					piena	doppi a (10)	tripla	piena	doppi a (8-7)	tripla									
HR	H25	TE	piena	9	2			1		12	23								
			doppia	20	13	1	10	12	4(6)	13(13)	13(14)								
		TC	piena	10	3		0	2		3(7)	3(4)								
	doppia	19	12	0	9	11	3(5)	11(12)	12(13)			2	4				4(5)	5(6)	
	TXC	piena	10	3		0	2		3(7)	3(4)									
	doppia	22	15	3	12	14	6(8)	14(15)	15(16)			5	7			1(2)	5(6)	6(7)	
HV16	piena	9	2			1		12	23										
	doppia	19	12	0	9	11	3(5)	11(12)	12(13)			2	4				4(5)	5(6)	
H3	H91	piena	7	0					10	0									
		doppia	20	13	1	10	12	4(6)	13(13)	13(14)			3	5				5(6)	6(7)
	H61	piena	7	0					10	0									
		doppia	19	12	1	9	11	3(5)	11(12)	12(13)			2	4				4(5)	5(6)

x n. redundancy x n. redundancy
NOT OK NOT OK
125 engine OK 125 engine OK
OK OK

* 125 engine

Figura 1: Modi di funzionamento linee

- H91: veicoli on-road 4 tempi 900 cc

Le famiglie H25-HV16 e H61-H91 sono assemblate rispettivamente sulla linea di montaggio H3 e HR ad avanzamento continuo, mentre le famiglie H10 e H20 sono assemblate su isole di montaggio ad assemblaggio interamente manuale con logiche produttive completamente diverse dalle precedenti. Le famiglie H25-HV16-H61-H91, occupano gran parte dei volumi produttivi dell'organizzazione, mentre H10 e H20 ne coprono una parte molto ridotta, per questo sono state destinate ad isole di montaggio.

Per quanto riguarda l'assemblaggio motori, viene effettuato su linee di montaggio (y1 e yy) a trasferimento manuale e viene effettuato esclusivamente per i motori che equipaggiano le famiglie H20-H25, le restanti famiglie sono equipaggiate con motori preassemblati esternamente.

Le linee motori e veicoli, con il personale attualmente in azienda, sono attivabili contemporaneamente variando le velocità di avanzamento e quindi variando il numero di operatori occupati su ciascuna linea.

I modi di funzionamento delle linee sono:

1. "piena": tempo ciclo pari a quello di progetto, con un operatore su ciascuna stazione;
2. "doppia": tempo ciclo pari al doppio di quello di progetto, ciascun operatore svolge le mansioni di due stazioni adiacenti;
3. "tripla" (solo per linea motori): tempo ciclo pari al triplo di quello di progetto, ciascun operatore svolge le mansioni di tre stazioni adiacenti;

I possibili modi di combinazione delle linee veicoli sono riportati in figura 1, dove in verde si indicano le combinazioni attuabili, in rosso quelle non attuabili e in arancio quelle attuabili solo con un particolare modello. I numeri riportati all'interno di ciascuna cella indicano il numero di operatori in esubero con un organico di 42 operatori in totale.

Il passaggio dall'assemblaggio di una famiglia all'altra è soggetto a tempi di setup, che tuttavia non sono imputabili al solo riattrezzaggio delle stazioni, ma anche al cambio tempo ciclo e al tempo necessario all'operatore per spostarsi nella nuova stazione a cui è stato assegnato.

In figura 2 sono riportati i costi di setup passando da una famiglia all'altra, e si può osservare che essi sono dipendenti dalla sequenza scelta (se fossero stati indipendenti dalla sequenza avremmo avuto colonne identiche). I tempi/costi di setup passando da un modello all'altro all'interno della stessa famiglia sono invece indipendenti. In figura 2 è inserita anche la famiglia "fittizio" che va ad identificare il caso di passaggio da linea scarica a linea carica.

		TO				
Family		Fittizio	H25	HV16	H91	H61
FROM	Fittizio	0	1100	1260	1955	2210
	H25	1100	0	330	1410	1410
	HV16	1260	180	0	1310	1310
	H91	1955	300	300	0	255
	H61	2210	300	300	255	0

Figura 2: Tempo di setup da famiglia a famiglia

Il problema

La pianificazione di medio termine della produzione Husqvarna-Motorcycles, viene effettuata manualmente, l'obiettivo è automatizzare tale procedura andando a realizzare un piano di produzione di minimo costo.

La funzione obiettivo che dovrà essere minimizzata sarà:

$$\min \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N c_{ij} x_{ij} \quad \forall i, j \in N$$

dove:

$c_{ij} = c_{p_j} + c_{s_{ij}} + H_j^t + A_j^t$ rappresenta il costo di produzione del job j se prodotto dopo il job i , comprensivo del costo di produzione, del costo di setup, del costo di magazzino e del costo degli interessi mancati per l'immobilizzazione

x_{ij} 1 se il job j è prodotto dopo il job i , 0 altrimenti

E' evidente che il costo di magazzino e di immobilizzazione è dipendente dall'istante in cui viene prodotto l'articolo, e il costo di setup è dipendente dalla sequenza di produzione scelta, per cui è indispensabile conoscere lo scheduling dei job.

I modelli tradizionali, pluriprodotto su modelli a macchina singola, di pianificazione della produzione quali *programmazione lineare a numeri interi*, *Karni-Roll* e *Magee-Boodman*, sono inadatti poichè affrontano il problema setup independent.

In letteratura per il problema setup dependent si possono trovare due tipologie di approcci:

1. Se si considerano i singoli modelli, o frazioni intere dei batch come jobs, allora il problema può essere ricondotto al *single machine problem setup dependent with common due date* o al *travel salesman problem with time windows* (TSPTW), dove l'obiettivo è quello di trovare lo scheduling dei jobs minimizzando la funzione obiettivo. In questa classe di problemi il *lot sizing* e lo scheduling possono essere ottenuti tramite metauristiche come algoritmi genetici, ant colony system, reti neurali, o tramite algoritmi greedy, local search ecc.

La funzione obiettivo più utilizzata in questa classe di problemi è la minimum earliness and tardiness penalty $\min[\sum(\alpha_i E_i + \beta_i T_i)]$. In [1] viene utilizzato un algoritmo DP (dynamic programming algorithms) per trovare la finestra temporale ottima che minimizzi la funzione obiettivo; [2] propongono un Beam-ACO (combinazione di un ACO con tre metodi di ricerca Beam) ipotizzando un lower-bound casuale per poter applicare le tecniche Beam; per la risoluzione del classico TSP e la minimizzazione del flow time e la total tardiness, [4] usano un algoritmo Branch-and-Bound, mentre [5] usano un ACO con funzione obiettivo la somma pesata della earliness e tardiness usando una nuova visibility funzione del tempo a disposizione prima della due date, e del rapporto

tra il peso di ciascun job e il tempo di processamento dello stesso. [6] confronta un algoritmo genetico, con un algoritmo a reti neurali, e un ACO per la risoluzione del classico TSP dimostrando che ACO è l'algoritmo che fornisce migliori soluzioni rispetto agli altri in letteratura;

2. Se si considera invece il modello come un problema di lot sizing e scheduling allora il problema viene in generale affrontato con euristiche, o con l'accoppiamento di metaeuristiche e euristiche. Gli approcci più diffusi generano prima una buona soluzione dal punto di vista del costo di setup, e poi effettuano il lot sizing tramite delle euristiche. La funzione obiettivo utilizzata in letteratura è il minimo della somma dei costi di setup e dei costi di magazzino, $\min(\sum_j \sum_i s_{ij}x_{ij} + \sum_i h_i z_i)$.

La prima classe di problemi non riescono a modellare eventuali fermi produzione e rilasciano sempre il vincolo di *no-back-log* (spostamento in avanti di lotti di produzione). Inoltre gli algoritmi utilizzati non permettono di modellare la combinazione dei modi di funzionamento delle macchine, se non imponendo a priori quali lotti di veicoli produrre in piena e quali in doppia e schedulare poi separatamente l'assemblaggio motori.

La seconda classe di problemi sembra molto più adatta al caso di studio e di seguito presenterò una breve descrizione delle soluzioni proposte dagli autori.

[6] separano il problema del setup-dependent dal lot-sizing trovando prima una sequenza che ottimizzi i costi di setup (il periodo di pianificazione viene suddiviso in tanti sottoperiodi, e per ciascuno viene trovata una sequenza ottima), e poi effettuano degli shift di lotti di prodotto che vanno a rendere fattibile il programma produttivo secondo delle regole di priorità. In [8] il periodo di programmazione viene suddiviso in tanti sotto periodi e per ciascuno viene trovata la sequenza ottima con un algoritmo enumerativo. [9] risolvono il problema applicando una Local Search e un Simulated Annealing, mentre [10] risolvono il problema usando un algoritmo genetico, una tabo search e un simulated annealing. In [11] modellano il problema con un TSPTW trovando la sequenza ottima tramite un DP (dynamic programming). In [11] vengono testati due tipologie di algoritmi, uno per risolvere problemi di piccole dimensioni e uno per quelli di grandi dimensioni; per il primo caso usano un Backward Search, mentre per il secondo caso un Sequencing with Optimal Timing e un Genetic Algorithm. Come in molti altri casi, [13], separano il problema del sequencing da quello del lot-sizing usando per quest'ultimo un memetic algorithm. Infine [14] risolve il problema in tre step: nel primo step trascura i tempi di setup e ordina i job secondo volumi di produzione decrescenti, se viene superata la capacità produttiva la parte in eccesso viene spostata nel periodo precedente; nel secondo step si trova la sequenza ottima tramite un algoritmo Greedy; nel terzo step cerca i lotti economici.

Effettuando un'analisi critica delle metodologie utilizzate si possono fare le seguenti considerazioni: la suddivisione del periodo di programmazione in sottoperiodi è una semplificazione del problema a causa dell'elevata complessità di risoluzione di problemi di calcolo combinatorio di una certa dimensione, e questa non costituisce un ottimo dal punto di vista dei costi di setup, poiché l'ottimo globale non è costituito dalla somma di ottimi locali. Dall'altro lato tentare di livellare la produzione prima, e ricercare lotti economici poi, è una strategia, a mio parere, poco vantaggiosa, poiché si può perdere l'opportunità di anticipare lotti economici nella prima fase.

Nel caso di studio, il periodo di pianificazione minimo richiesto è di 6 mesi, mentre il numero di famiglie in programmazione per quanto riguarda la linea veicoli è pari a 4. Allo stato attuale il problema potrebbe essere risolto in tempi ragionevoli anche con un semplice algoritmo enumerativo che vada ad analizzare tutte le possibili sequenze, tuttavia aumentando il numero di famiglie il problema non può essere più affrontato con queste metodologie. Il numero minimo di famiglie da prendere in esame richiesto dall'azienda è pari a 6 (4 famiglie attualmente in produzione sulla linea veicoli, più 2 in produzione sulla linea flex), per cui è necessario utilizzare algoritmi in grado di risolvere problemi di calcolo combinatorio di una modesta dimensione in modo ottimale.

Proposta di una soluzione

Una semplificazione del problema può essere effettuata separando la ricerca ottima dal punto di vista dei costi di setup e il lot sizing.

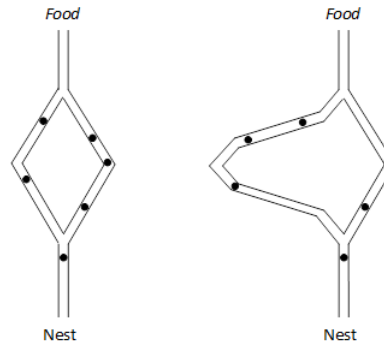


Figura 3: Esperimento di Deneubourg

Il problema può essere quindi risolto in 4 step:

1. Ricerca della sequenza ottima dal punto di vista dei costi di setup
2. Ricerca di lotti economici
3. Livellamento della produzione
4. Routing finale

Il problema della ricerca della sequenza ottima può essere ricondotto al problema del travel salesman problem (TSP), dove il costo di setup sommato ai costi di magazzino e immobilizzazione rappresenta la distanza tra i nodi, e il costo di processamento il tempo di permanenza su ogni nodo.

La risoluzione di tale problema per un caso a 6 famiglie e 6 periodi, può essere risolto con algoritmi metaeuristici o con algoritmi di enumerazione implicita (Branch-and-Bound) o con algoritmi Greedy. Nel caso in esame si è scelto di utilizzare una tecnica metaeuristica denominata Ant Colony System teorizzata da Dorigo et. al nel 1997 ([13]), poichè secondo la ricerca condotta in [14], dove vengono confrontati un ACS, un algoritmo genetico e uno a reti neurali, ACS è l'algoritmo che meglio risolve il TSP.

Ant colony system è un algoritmo introdotto da Dorigo nel 1997, risultato dell'evoluzione di Ant system (AS). AS e ACS traggono ispirazione dal comportamento delle colonie di formiche, le quali sono in grado di trovare il percorso a minor dispendio "di energia" per raggiungere un obiettivo (cibo) utilizzando come unica informazione il feromone depositato dalle formiche stesse lungo i possibili percorsi. Tali algoritmi si basano sulle osservazioni di Deneubourg, il quale riuscì a dimostrare tramite l'esperimento in figura 3, che la scelta di un percorso o dell'altro (nei due casi rappresentati) era riconducibile al numero di formiche (e quindi dal feromone depositato) che li avevano attraversati, e a seguito di un transitorio iniziale tutte le formiche percorrevano lo stesso percorso.

AS fa uso di una *transition rule* tramite la quale è possibile definire la probabilità che una formica scelga un arco piuttosto che un altro. Tale parametro è funzione del feromone depositato precedentemente e di una funzione di *visibility* (la quale esprime il legame tra due nodi successivi e può essere funzione di una distanza temporale o spaziale). Introducendo un tasso di evaporazione del feromone è possibile fare in modo che gli archi che vengono esplorati meno frequentemente diventino sempre meno appetibili. Ogni volta che viene trovato un percorso migliore dei precedenti, la formica deposita un feromone aggiuntivo. In questo modo è possibile selezionare le parti di soluzione che più contribuiscono a trovare una buona soluzione finale.

Nella versione ACS, Dorigo introdusse una nuova *transition rule* allo scopo di favorire l'esplorazione di nuovi percorsi, una nuova *global pheromone trail update rule* e *local pheromone trail update rule*, le quali a differenza di AS permettono l'aumento del feromone solo quando viene trovato un nuovo percorso, e la sua evaporazione ad ogni iterazione.

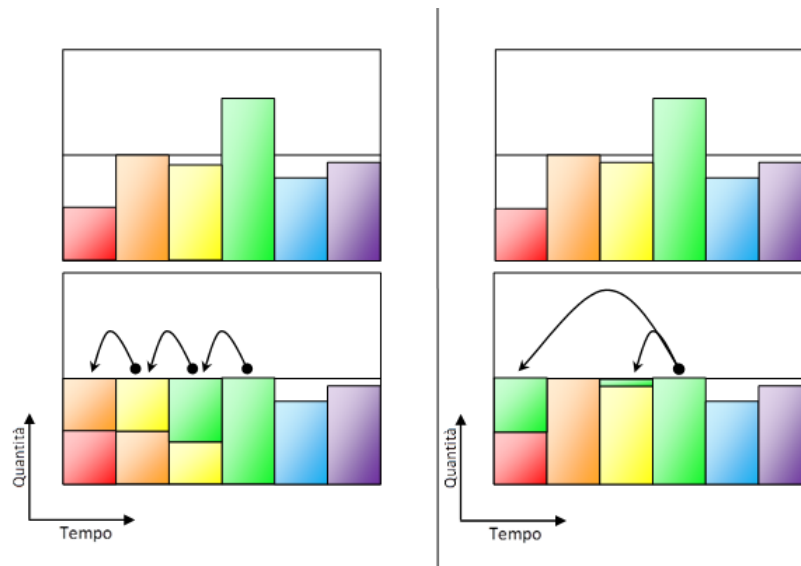


Figura 4: Shift strategico

L'applicazione di ACS al caso in esame permette di trovare la sequenza ottima delle famiglie dal punto di vista dei costi di setup, modellando questa parte del problema come un TSP.

Per poter applicare ACS al caso in esame è stato necessario, tuttavia, costruire un opportuna *candidate list* affinché la stessa famiglia non venisse schedulata 2 volte nello stesso mese.

Ottenuta la sequenza ottima delle famiglie si è passati al secondo step, con la ricerca di lotti economici, dove il trade-off tra la scelta o meno dell'anticipo, sarà la differenza del costo di setup che non verrà sostenuto se viene anticipato il lotto, e il costo di immagazzinamento e immobilizzazione che si andrà a sostenere anticipando il lotto; se tale differenza risulterà positiva allora sarà conveniente anticipare il lotto. La procedura utilizzata passa in rassegna tutte le famiglie andando a calcolare il guadagno (se esistente) nell'effettuare l'anticipo, e verrà scelta la famiglia che garantisce la maggior differenza tra costi di setup e costi di magazzino e immobilizzazione. Tale procedura viene ripetuta fin quando esistono lotti economici o fino a saturare la capacità produttiva del mese precedente. Se tramite l'anticipo di intere famiglie, il mese precedente non risulta ancora saturo, allora si passa alla ricerca di eventuali lotti economici di modelli di prodotto.

Il terzo step, oltre ad essere indispensabile per risolvere eventuali situazioni di infattibilità, deve essere attuato secondo considerazioni strategiche. Dal punto di vista del solo calcolo dei costi aggiuntivi nell'anticipare lotti non economici, i due casi rappresentati in figura 4 sono equivalenti; dal punto di vista strategico invece lo shift rappresentato a sinistra è molto più conveniente poichè va ad anticipare lotti che si basano su previsioni di vendita più vicine e quindi più affidabili, mentre nel caso a destra viene anticipata una quantità notevole nei tre mesi precedenti andando a produrre lotti che probabilmente sono suscettibili di errori di stime di vendita.

Prima di avviare le operazioni di livellamento è necessario verificare se esistono situazioni di infattibilità non risolvibili se non con il rilascio del vincolo di no-back-log. Nel caso in esame tale vincolo non verrà mai rilassato poichè, la scelta di spostare "in avanti" determinati lotti non può essere suscettibile di regole predeterminate, ma solo di esigenze del commerciale dettate dalla specifica richiesta del mercato. Inoltre i lotti che sono stati anticipati al secondo step non dovranno essere anticipati, altrimenti la condizione di lotto economico non sarebbe più rispettata.

L'ultimo step riguarda il routing finale, indispensabile per stabilire gli istanti di produzione e quindi permettere l'elaborazione dell'MRP. In questa fase oltre a dover rispettare la sequenza delle famiglie sarà necessario fare in modo che i lotti anticipati vengano schedulati per ultimi all'interno della stessa famiglia, e che la produzione motori avvenga prima della produzione dei rispettivi veicoli. Per spiegare

ACS vs ACS+Euristica		
Q_{max}	$\frac{C_{max_{ACS}} - C_{max_{ACS+E}}}{C_{max_{ACS+E}}}$	$\frac{T_{max_{ACS}} - T_{max_{ACS+E}}}{T_{max_{ACS+E}}}$
50	+0.5%	+1%
20	+0.3%	+0.9%
10	+3.3%	+2.5%

Tabella 1: Confronto tra ACS e ACS+Euristica

n_{epoche}	$\frac{C_{max_{ACS}} - C_{max_{ACS+E}}}{C_{max_{ACS+E}}}$	$\frac{T_{max_{ACS}} - T_{max_{ACS+E}}}{T_{max_{ACS+E}}}$
3000	0.3%	0.9%
3000	0.3%	0.9%
5000	0.9%	1.3%
10000	0.1%	0.8%

Tabella 2: Risultati ACS caso $Q_{max} = 20$ in funzione del numero di epoche

come siamo riusciti ad ottenere anche la schedulazione puntuale dei motori è necessario fare un passo indietro. Per stabilire a quanto ammonta la capacità produttiva dedicabile alla produzione veicoli è necessario stabilire la quota parte dedicata ai motori. Se il funzionamento prestabilito obbliga la produzione motori e veicoli sempre in piena, allora è sufficiente detrarre dalla capacità produttiva il tempo necessario per produrre motori ed aggiornarlo ogni volta che un lotto viene spostato. Nel caso in cui sono prestabiliti modi di funzionamento combinati allora è necessario calcolare la quota parte in piena e quella a funzionamento ridotto e detrarla dalla capacità disponibile e aggiornarla ogni volta che viene spostato un lotto. Secondo questa procedura è possibile conoscere con esattezza il tempo necessario per produrre motori e veicoli secondo i modi di funzionamento assegnati, e nella definizione del routing verrà assegnato il rispettivo tempo ciclo in base al modo di funzionamento.

Risultati e validazione

Per poter verificare la bontà della soluzione ottenuta è stato implementato un ACS per risolvere esclusivamente il problema della schedulazione veicoli, utilizzando come funzione obiettivo $\min[\sum(\alpha_i E_i + \beta_i T_i)]$. Tuttavia date le considerazioni fatte riguardo le metauristiche applicate al problema, è stato necessario costruire un benchmarck apposito, dove non sono previsti fermi di produzione e dove non è necessario il rilassamento del vincolo di backlog. Inoltre per permettere il lot-sizing è stato necessario frammentare i batch di partenza. In questo modo, trovando la giusta frammentazione dei batch, la soluzione attesa doveva essere almeno pari a quella trovata applicando ACS+Euristica.

La frammentazione dei batch scelta e i risultati ottenuti sono rappresentati in tabella 1, dove si vede che il miglior risultato è stato ottenuto per una frammentazione dei batch pari a 20 unità. Il caso con frammentazione massima paria a 10 unità avrebbe dovuto restituire soluzioni migliori, tuttavia la dimensione del problema impedisce al solo ACS di trovare una soluzione ottima. Per verificare che il risultato sia affidabile, sono state ripetute delle simulazioni per il caso con lotto massimo paria a 20 unità, aumentando il numero di epoche dall'ultima buona soluzione trovata; i valori ottenuti sono rappresentati in tabella 2. Le simulazioni effettuate confermano il risultato preliminare ottenuto in 1 e confermano che ACS+Euristica è in grado di trovare una soluzione più vicina all'ottimo rispetto ad ACS.

Conclusioni

L'algoritmo di scheduling presentato in questo lavoro permette di effettuare una programmazione aggregata di produzione per un problema a macchina singola. Il criterio di ottimizzazione considerato è quello di minimo costo della somma dei tempi di setup, immagazzinamento e immobilizzazione. L'uso di un Ant colony System e di un euristica permettono di trovare una soluzione non ottima ma molto vicino ad essa.

L'algoritmo presentato permette di combinare il funzionamento delle linee motori e veicoli variando le velocità di funzionamento, e quindi effettuare simulazioni per ricercare la combinazione migliore dei modi di funzionamento su ciascun mese, risparmiando tempo che in molti casi può tradursi in denaro. Inoltre fornisce un'indicazione puntuale di quanto tempo sia necessario per portare a termine tutti i lotti e quindi consente in maniera rapida di programmare eventuali ore di straordinario o di fermo produzione.

I risultati ottenuti risultano essere migliori di un ACS, sia in termini di valore della funzione obiettivo, che in termini di tempo di calcolo. L'uso di un ACS+Local Search potrebbe migliorare il risultato ottenuto, tuttavia non sarebbe comunque applicabile in ambito industriale per le seguenti ragioni:

- sono stati necessari tempi di calcolo superiori alle 4 ore tramite l'uso dell'ACS, mentre tramite ACS+Euristica sono sufficienti pochi minuti;
- la soluzione ottenuta è fortemente dipendente da come vengono frammentati i batch;
- lo schedule ottenuto è sicuramente fattibile, ma all'interno della sequenza trovata potrebbe esserci un inserimento errato (ad esempio un lotto di un modello che va a spezzare la sequenza di lotti dello stesso modello)

Il modello, oltre ad essere uno strumento pratico, e ad essere una metodologia standard per la pianificazione, ci permette già da subito di stimare un risparmio aziendale, di circa 20000 euro annui considerando esclusivamente i costi di setup risparmiati, mentre i vantaggi derivanti da anticipi di lotti economici o di lotti di minimo costo non può essere stimato poiché si è persa traccia delle operazioni effettuate dal responsabile della pianificazione in fase di redazione dell'MPS.

Inoltre il modello può essere applicato anche nell'eventualità in cui venga attivata una seconda linea di assemblaggio veicoli, che funzioni in contemporanea con quella già attiva dando in ingresso all'algoritmo due budget-obiettivo separati.

Nel caso in esame sono state effettuate esclusivamente considerazioni economiche sui costi di setup, magazzino e immobilizzazione e non è stato contemplato l'uso di orario straordinario per completare gli ordini, invece che anticipare la produzione. L'aggiunta di questa utility permetterebbe di migliorare la soluzione e avere una stima più completa del costo di produzione.

Inoltre si è ipotizzato che il modo di funzionamento delle linee (piena, doppia, tripla) sia un dato imposto all'inizio della fase di programmazione e che esso sia costante su tutto l'orizzonte temporale. Tuttavia potrebbe risultare conveniente imporre su ciascun mese il modo di funzionamento di ogni linea e scegliere per ognuno la configurazione che meglio risponde alle esigenze aziendali del momento in base alle risorse umane disponibili (ad esempio non è detto che il personale in linea sia sempre costante sul periodo di programmazione e quindi è possibile che alcune combinazioni di funzionamento non siano attuabili).

Bibliografia

- [1] W. K. Yeung, Ceyda Oguz . Single-machine scheduling with a common due window. *Computers & Operations Research* (2001) 28:157-175.
- [2] M. Lopez-Ibanez, , C. Blum . Beam-ACO for the travelling salesman problem with time windows. *Computers & Operations Research*, (2010)37:1570–1583.
- [3] D. Anghinolfi, M. Paolucci. A new ant colony optimization approach for the single machine total weighted tardiness scheduling problem. *International Journal of Operations Research* (2008).
- [4] W. Huia. Comparison of several intelligent algorithms for solving TSP problem in industrial engineering. *System Engineering Procedia* (2012) 4:226-235
- [5] I-S Shim, H-C Kim, H-H Doh, D-H Lee. A two-stage heuristic for single machine capacitated lot-sizing and scheduling with sequence-dependent setup costs. (2011) *Computers & Industrial Engineering* 62:920–929
- [6] B. Fleischmann. The discrete lot-sizing and scheduling problem with sequence-dependent setup-costs. *European Journal of Operational Research* (1994) 75:395–404
- [7] H. Meyr. Simultaneous lot-sizing and scheduling by combining local search with dual reoptimization. *European Journal of Operational Research* (2000) 120:311–326
- [8] Linet Özdamar, Şevket İlker Birbil. Hybrid heuristics for the capacitated lot sizing and loading problem with setup times and overtime decisions. (1998) *European Journal of Operational Research* 110:525–547
- [9] Marc Salomon, Marius M. Solomon, Luk N. Van Wassenhove, Yvan Dumas , Stephane Dauzère-Pérès. Solving the discrete lotsizing and scheduling problem with sequence dependent set-up costs and set-up times using the Travelling Salesman Problem with time windows. *European Journal of Operational Research* (1997) 3:494–513
- [10] Wisut Supithak, Surya D. Liman, Elliot J. Montes. Lot-sizing and scheduling problem with earliness tardiness and setup penalties *Computers & Industrial Engineering* (2010) 58:363–372
- [11] K. Schemeleva, X. Delorme, A. Dolgui, F. Grimaud Multi-product sequencing and lot-sizing under uncertainties: A memetic algorithm. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* (2012) 25:1598–1610
- [12] Diwakar Gupta, Thorkell Magnusson. The capacitated lot-sizing and scheduling problem with sequence-dependent setup costs and setup times. *Computers & Operations Research* (2005) 32:727–747
- [13] E. Bonabeau, M. Dorigo, G. Theraulaz. *Swarm Intelligence: from natural to artificial system.* (1999) New York: Oxford University Press
- [14] W. Huia. Comparison of several intelligent algorithms for solving TSP problem in industrial engineering. *Systems Engineering Procedia* (2012) 4:226–235