



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in
Ingegneria Gestionale (LM-31)
A.a. 2023/2024
Sessione di Laurea Mese Anno

Economic Lot Scheduling Problem

Relatori:

Alfieri Arianna
Pastore Erica
Castiglione Claudio

Candidati:

Perna Giovanni

A chi c'è sempre stato.
A chi se né andato.
A chi ha creduto in me fin dall'inizio, e fino alla fine.
A me, che non ho mai mollato.

Indice

Introduzione.....	4
Background.....	5
Metodologia di ricerca e selezione bibliografica.....	7
Common Cycle.....	9
Basic Period.....	35
Extended Basic Period.....	49
Time Varying Lot Size.....	60
Other Policy.....	65
Conclusione.....	75

Introduzione

L'Economic Lot Scheduling Problem (ELSP), problema importante nel panorama della gestione della produzione, ha catalizzato un corpus di ricerca volto a esplorare strategie e politiche per ottimizzare i processi produttivi.

Quest'ultimo costituisce un'area di ricerca nell'ambito dell'ottimizzazione della produzione e della gestione dei sistemi manifatturieri e deriva dalla combinazione dell'Economic Order Quantity (EOQ) e del Job Shop Scheduling. Tale problema si concentra sull'ottimizzazione dei costi associati alla produzione e alla programmazione delle quantità di lotti di produzione in un ambiente caratterizzato da limitazioni di capacità e da tempi di setup variabili. Questa combinazione di fattori richiede un'analisi in quanto presenta un impatto sulla capacità di migliorare l'efficienza, di ridurre i costi e di mantenere standard di servizio e soddisfazione del cliente.

Gli approcci per ELSP sono particolarmente significativi nei casi in cui è necessario pianificare in maniera integrata la produzione e gli approvvigionamenti per reagire alla variabilità della domanda, inoltre la gestione ottimale delle scorte aiuta ad evitare costi eccessivi derivanti dall'eccesso o dall'insufficienza delle stesse. La sfida principale dell'ELSP consiste nel bilanciare le quantità di lotti prodotti e i relativi tempi di inizio produzione, richiedendo una convergenza tra efficienza operativa e controllo delle scorte ed il suo nucleo risiede nella complessità associata alla determinazione delle quantità di lotti economici. Tale problema va oltre la minimizzazione dei costi di ordine e di mantenimento delle scorte, poiché incorpora la dimensione della pianificazione delle attività produttive; si propone, quindi, di affrontare la complessità dinamica dei moderni processi di produzione. Le implicazioni dell'ELSP impattano direttamente sui costi operativi e sulla competitività delle organizzazioni, di conseguenza la risoluzione di quest'ultimo può contribuire non solo a ridurre i costi associati, ma anche a migliorare la capacità dell'azienda di adattarsi alle mutevoli esigenze del mercato, conferendole un vantaggio competitivo.

Inoltre, l'ELSP costituisce una piattaforma fertile per l'innovazione tecnologica e l'applicazione di approcci avanzati di gestione della produzione.

L'evoluzione delle tecnologie dell'informazione, l'impiego di algoritmi avanzati e l'utilizzo di modelli di ottimizzazione contribuiscono a migliorare l'efficienza e la precisione delle soluzioni proposte, rendendo la risoluzione dell'ELSP un campo di ricerca e sviluppo dinamico e in continua evoluzione.

L'ELSP emerge dunque come una tematica che coinvolge diversi ambiti, tra cui l'ingegneria industriale, la gestione delle operazioni e la ricerca operativa. La sua rilevanza si manifesta nella capacità di ottimizzare i processi produttivi, di ridurre i costi operativi e di potenziare la competitività aziendale, sottolineando la sua importanza nella moderna gestione industriale.

Questa tesi bibliografica mira a convogliare 55 paper redatti da diversi ricercatori, con particolare attenzione alle scheduling policy maggiormente utilizzate, ovvero Common Cycle, Basic Period, Extended Basic Period, Time Varying Lot Size e Power of Two.

La struttura della revisione della letteratura seguirà un approccio tematico, suddividendo le sezioni per esplorare le principali scheduling policy utilizzate all'interno degli studi che affrontano questo problema.

Attraverso questa revisione della letteratura, la tesi si pone l'obiettivo di presentare i differenti approcci utilizzati, cercando di confrontare gli autori che hanno intrapreso metodi di risoluzione simili, con le stesse scheduling policy, ma con algoritmi e variabili differenti. Nel capitolo 2 sarà espletato il background, nei capitoli successivi introdotte nel dettaglio le scheduling policy contenenti un'analisi dei confronti tra i diversi paper, ed infine verranno svolte le conclusioni.

Background

L'Economic Lot Scheduling Problem risulta tutt'oggi uno studio largamente diffuso e discusso nella letteratura, affrontato in maniera differente e con obiettivi diversi dagli studiosi, che hanno offerto un loro contributo nella ricerca della soluzione migliore per ovviare a tale problema. L'obiettivo di questa tesi bibliografica è quello di suddividere le pubblicazioni in base al tipo di scheduling policy che viene adottata nella generazione degli algoritmi e nello studio dell'ELSP. Le scheduling policy maggiormente utilizzate nella letteratura e che saranno utilizzate come criterio di classificazione sono:

- **Common Cycle:** La Common Cycle è una strategia di pianificazione che mira a coordinare l'esecuzione dei lotti di produzione in cicli comuni, al fine di ottimizzare l'utilizzo delle risorse e ridurre i tempi di setup. Questa politica prevede l'aggregazione di diversi ordini di produzione in cicli di tempo comuni, consentendo la produzione simultanea di più lotti con tempi di setup minimizzati. Si tratta di una politica di schedulazione che mira a massimizzare l'efficienza operativa attraverso la sincronizzazione dei tempi di setup e l'ottimizzazione dell'utilizzo delle risorse produttive;
- **Basic Period:** Il Basic Period è una strategia di pianificazione che consiste nell'organizzare la produzione in periodi di tempo regolari, denominati periodi base. Durante ciascun periodo base, vengono pianificati i lotti di produzione secondo le necessità della stessa e le capacità disponibili, con l'obiettivo di minimizzare i tempi di setup e ottimizzare l'utilizzo delle risorse. Questa politica si basa sull'allocazione efficiente dei lotti di produzione nei periodi base, considerando la domanda di mercato e le capacità di produzione disponibili. Rappresenta una scheduling policy volta a massimizzare l'efficienza produttiva attraverso la pianificazione regolare e ottimizzata dei lotti di produzione nei periodi di tempo definiti;
- **Extended Basic Period:** L'Extended Basic Period è una strategia di pianificazione che estende il concetto della policy del Basic Period, dove i periodi di tempo sono suddivisi in periodi base più lunghi rispetto alla norma. Durante ogni periodo base

- esteso vengono pianificati i lotti di produzione secondo le richieste di mercato e le capacità produttive, con l'obiettivo di minimizzare i tempi di setup e massimizzare l'utilizzo delle risorse. Tale strategia consente una maggiore flessibilità nella programmazione della produzione, consentendo una migliore adattabilità alle variazioni della domanda e una riduzione dei costi complessivi, inoltre rappresenta una politica di scheduling che mira a ottimizzare l'efficienza produttiva attraverso l'allocazione efficiente dei lotti di produzione nei periodi di tempo estesi definiti;
- **Power of Two:** La Power of Two è una strategia di pianificazione che prevede di aggregare i lotti di produzione in gruppi di due o più, con l'obiettivo di ridurre i tempi di setup e ottimizzare l'utilizzo delle risorse produttive. Questa politica sfrutta il principio della combinazione efficiente dei lotti di produzione, consentendo di ridurre i costi di setup e aumentare la produttività complessiva. Rappresenta una politica di scheduling che mira a massimizzare l'efficienza operativa attraverso la sincronizzazione dei tempi di setup e l'ottimizzazione dell'allocazione dei lotti di produzione nei gruppi "potenza di due";
 - **Time Varying Lot Size:** Il Time Varying Lot Size è una strategia di pianificazione che considera variazioni nelle dimensioni dei lotti di produzione nel tempo in risposta alle fluttuazioni della domanda e alle capacità produttive disponibili. Tale politica mira a ottimizzare l'utilizzo delle risorse e a ridurre i costi complessivi adeguando le dimensioni dei lotti in base alle condizioni del momento. Rappresenta una politica di scheduling dinamica che tiene conto delle variazioni nella domanda e nelle capacità produttive per massimizzare l'efficienza operativa e ridurre i costi di produzione nell'ambito dell'ELSP;

Le scheduling policy sopracitate costituiscono i paragrafi in cui è suddivisa la seguente tesi bibliografica, inoltre è presente un paragrafo denominato "other policy" dove sono riportati studi riguardanti l'ELSP, ma che si sono focalizzati sull'utilizzo di altre politiche di scheduling rispetto a quelle precedentemente presentate.

Metodologia di ricerca e selezione bibliografica

Nella selezione dei paper per la tesi bibliografica, sono state impiegate diverse strategie, utilizzando una serie di chiavi di ricerca per identificare studi rilevanti sul problema dell'Economic Lot Scheduling (ELSP). I paper scelti sono stati valutati in base alla presenza di caratteristiche chiave comuni, che sono emerse come vincoli nel trattamento del problema da parte degli studiosi.

Il primo passo consisteva nell'analizzare le politiche di pianificazione più utilizzate nella letteratura; questa fase di screening ha portato a concentrare l'attenzione su cinque politiche di pianificazione precedentemente menzionate: Common Cycle, Basic Period, Extended Basic Period, Power of Two e Time Varying Lot Size.

Successivamente, una volta categorizzati i documenti in base a tali politiche, l'attenzione è stata rivolta ai vincoli specifici utilizzati da ciascun paper per descrivere e risolvere l'ELSP. Le caratteristiche considerate per confrontare i diversi documenti sono state organizzate e riportate in una tabella, al fine di fornire una panoramica sistematica delle metodologie e degli approcci adottati dagli autori nella risoluzione del problema.

Questa metodologia di selezione e valutazione dei paper ha consentito di identificare e analizzare le varie strategie e tecniche proposte dalla letteratura scientifica per affrontare l'ELSP, fornendo una base per lo sviluppo della tesi.

Autori	Common Cycle	Basic Period	Extended Basic Period	Power of Two	Time Varying Lot Size	Other Policy
Dah-Chuan Gong et al	✓					
Ben-Daya, M, and M Hariga	✓					
Mokhlesian, Maryam, Seyyed Mohammad Taghi Fatemi Ghomi, and Fariborz Jolai	✓					
Jenabi, M. et al.	✓					
Torabi, S.A., S.M.T. Fatemi Ghomi, and B. Karimi	✓					
Kia, Hamidreza, Seyed Hassan Ghodspour, and Hamid Davoudpour	✓					
Raza, Syed Asif, and Ali Akgunduz	✓					
Clausen, Jens, and Suquan Lu	✓					
Elhafsi, Mohsen, and Sherman X. Bai	✓					
Khouja, Moutaz	✓					
Matthews, John P	✓					
Ferretti, Ivan	✓					
Tang, Ou, and Ruud Teunter	✓					
Huiqing Ouyang, and Xiangyang Zhu	✓					
Quenniche, Jamal, and Fayez F. Boctor	✓			✓		
Osman, Hany, and Kudret Demiri	✓					
Löhndorf, Nils, and Stefan Minner	✓					
Agnew, R.A.	✓					
M. Heydari, B. Karimi & S.A. Torabi	✓					
Hennet, J.C	✓					
Wagner, Bret J., Darwin J. Davis, and Hemant V. Kher		✓				
Dousthaghi, S., and R. Tavakkoli-Moghaddam		✓				
Torabi, S. A., and M. Jenabi.		✓				
Axsater, Sven		✓				
Salvietti, Luciano, and Neale R. Smith		✓				
Kelle, P., G. Clendinen, and P. Dardeau		✓				
Boctor, Fayez Fouad		✓				
Chan, Hing Kai, Sai Ho Chung, and Tak Ming Chan		✓				
Chatfield, Dean C.		✓				
Hwang, Hark, and Dug Hee Moon		✓				
Chang, Yu-Jen, Shih-Chieh Chen, and Po-Yen Hsu		✓		✓		
Sun, Hainan, Huel-Chuen Huang, and Wikrom Jaruphongs			✓	✓		
Bulut, Onder, M. Fatih Tasgetiren, and M. Murat Fadiloglu			✓	✓		
Yao, Ming-Jong, and Jian-Xiong Huang			✓	✓		
Peixin, Zhao, and Qi Gujije			✓	✓		
Kayvanfar, V., and M. Zandieh			✓	✓		
Kuhn, Heinrich, and Thomas Liske				✓		
Yao, Ming-Jong, and S.E. Elmaghraby				✓		
Raza, S. A., A. Akgunduz, and M. Y. Chen					✓	
Luo, Rongwu					✓	
Raza, Syed Asif, and Ali Akgunduz					✓	
Pesenti, Raffaele, and Walter Ukovich					✓	
Yu-Jen Chang, and Ming-Jong Yao					✓	
Ramani, S., and N. Narayanan						✓
Hahm, Juho, and Candace Arai Yano						✓
Mesquita, Marco Aurélio, and João Vitor Tomotani						✓
Wagner, Michael, and Sanne R Smits						✓
Markowitz, David M, Martin I Reiman, and Lawrence M Wein						✓
Adelman, Daniel, and Christiane Barz						✓
Vidal-Carreras, Pilar I., and José Pedro García Sabater						✓
Alle, Alessandro, Jose M Pinto, and Lazaros G Papageorgiou						✓
Galleo, Guillermo, and Dev Joneja						✓
Larrañeta, J., and L. Onieva						✓

Autor	Rilavoro imperfetto e scarti	Rilavorazione dei resi	Programmazione mista non lineare	Delivery problem	Stochastic Problem	Programmazione mista lineare	Programmazione dinamica	Programmazione ciclica
Dah-Chuan Gong et al	✓							
Ben-Daya, M. and M Hariga	✓							
Mokhlesian, Maryam, Seyyed Mohammad Taghi Fatemi Ghomi, and Fariborz Jolai			✓					
Jenabi, M. et al.			✓					
Torabi, S.A., S.M.T. Fatemi Ghomi, and B. Karimi			✓					
Kia, Hamidreza, Seyed Hassan Ghodspour, and Hamid Davoudpour			✓	✓				
Raza, Syed Asif, and Ali Akgunduz				✓				
Clausen, Jens, and Suquan Ju				✓				
Elhafsi, Mohsen, and Sherman X. Bai						✓		
Khoulja, Moutaz						✓		
Matthews, John P						✓		
Ferretti, Ivan						✓		
Tang, Ou, and Ruud Teunter						✓		
Huiqing Ouyang, and Xiangyang Zhu								
Quenneche, Jamal, and Fayed F. Bector								
Osman, Hany, and Kudret Demiri								
Löhndorf, Nils, and Stefan Minner								
Agnew, R. A.								
M. Heydari, B. Karimi & S.A. Torabi								
Hennet, J.C								
Wagner, Bret J., Darwin J. Davis, and Hemant V. Kher			✓					
Dousthaghi, S., and R. Tavakkoli-Moghaddam			✓	✓				
Torabi, S. A., and M. Jenabi.				✓				
Axsater, Sven							✓	
Salvietti, Luciano, and Neale R. Smith						✓		
Kelle, P., G. Clendenen, and P. Dardeau								
Bector, Fayed Fouad								
Chan, Hing Kai, Sai Ho Chung, and Tak Ming Chan								
Chatfield, Dean C.								
Hwang, Hark, and Dug Hee Moon								
Chang, Yu-Jen, Shih-Chieh Chen, and Po-Yen Hsu		✓						
Sun, Hainan, Hwei-Chuen Huang, and Wikrom Jaruphongsa								
Bulut, Onder, M. Fath Tasgetiren, and M. Murat Fadioglu								
Yao, Ming-Jong, and Jian-Xiong Huang								
Peixin, Zhao, and Qi Gujje								
Kayvanfar, V., and M. Zandieh								
Kuhn, Heinrich, and Thomas Liske								
Yao, Ming-Jong, and S.E. Elmaghraby								
Raza, S. A., A. Akgunduz, and M. Y. Chen								
Luo, Rongwu								
Raza, Syed Asif, and Ali Akgunduz								
Presenti, Raffaele, and Walter Ukovich								
Yu-Jen Chang, and Ming-Jong Yao								
Ramani, S., and N. Narayanan								
Hahm, Juho, and Candace Aral Yano				✓				
Mesquita, Marco Aurélio, and João Vítor Tomotani					✓			
Wagner, Michael, and Sanne R Smits					✓			
Markowitz, David M, Martin I Reiman, and Lawrence M Wein								
Adelman, Daniel, and Christiane Barz						✓		
Vidal-Carreras, Pilar I., and José Pedro García Sabater								
Alle, Alessandro, Jose M Pinto, and Lazaros G Papageorgiou			✓					
Gallego, Guillermo, and Dev Joneja								
Larrañeta, J., and L. Onieva								✓

Autor	Rimanifattura	Ambienti multi-stadio	Singola macchina	FLSP con configurazio	Cyclic Economic Lot-Sizing	Algoritmi genetici	Algoritmi euristici	Algoritmi deterministici	Deterioramento degli
Dah-Chuan Gong et al									
Ben-Daya, M. and M Hariga									
Mokhlesian, Maryam, Seyyed Mohammad Taghi Fatemi Ghomi, and Fariborz Jolai						✓			
Jenabi, M. et al.						✓			
Torabi, S.A., S.M.T. Fatemi Ghomi, and B. Karimi						✓			
Kia, Hamidreza, Seyed Hassan Ghodspour, and Hamid Davoudpour							✓		
Raza, Syed Asif, and Ali Akgunduz								✓	
Clausen, Jens, and Suquan Ju								✓	
Elhafsi, Mohsen, and Sherman X. Bai			✓						
Khoulja, Moutaz								✓	
Matthews, John P								✓	
Ferretti, Ivan	✓								
Tang, Ou, and Ruud Teunter	✓								
Huiqing Ouyang, and Xiangyang Zhu	✓								
Quenneche, Jamal, and Fayed F. Bector		✓							
Osman, Hany, and Kudret Demiri		✓							
Löhndorf, Nils, and Stefan Minner			✓						
Agnew, R. A.			✓						
M. Heydari, B. Karimi & S.A. Torabi				✓			✓		
Hennet, J.C					✓				
Wagner, Bret J., Darwin J. Davis, and Hemant V. Kher									
Dousthaghi, S., and R. Tavakkoli-Moghaddam						✓			
Torabi, S. A., and M. Jenabi.						✓			
Axsater, Sven									
Salvietti, Luciano, and Neale R. Smith						✓			
Kelle, P., G. Clendenen, and P. Dardeau							✓		
Bector, Fayed Fouad							✓		
Chan, Hing Kai, Sai Ho Chung, and Tak Ming Chan						✓			
Chatfield, Dean C.						✓			
Hwang, Hark, and Dug Hee Moon								✓	
Chang, Yu-Jen, Shih-Chieh Chen, and Po-Yen Hsu								✓	
Sun, Hainan, Hwei-Chuen Huang, and Wikrom Jaruphongsa								✓	
Bulut, Onder, M. Fath Tasgetiren, and M. Murat Fadioglu								✓	
Yao, Ming-Jong, and Jian-Xiong Huang						✓			✓
Peixin, Zhao, and Qi Gujje						✓			
Kayvanfar, V., and M. Zandieh									✓
Kuhn, Heinrich, and Thomas Liske									
Yao, Ming-Jong, and S.E. Elmaghraby									
Raza, S. A., A. Akgunduz, and M. Y. Chen							✓		
Luo, Rongwu								✓	
Raza, Syed Asif, and Ali Akgunduz							✓		
Presenti, Raffaele, and Walter Ukovich							✓		
Yu-Jen Chang, and Ming-Jong Yao							✓		
Ramani, S., and N. Narayanan			✓						
Hahm, Juho, and Candace Aral Yano									
Mesquita, Marco Aurélio, and João Vítor Tomotani									
Wagner, Michael, and Sanne R Smits									
Markowitz, David M, Martin I Reiman, and Lawrence M Wein									
Adelman, Daniel, and Christiane Barz								✓	
Vidal-Carreras, Pilar I., and José Pedro García Sabater									
Alle, Alessandro, Jose M Pinto, and Lazaros G Papageorgiou									
Gallego, Guillermo, and Dev Joneja			✓				✓		
Larrañeta, J., and L. Onieva									

1. Common Cycle

La common cycle è un approccio di pianificazione della produzione che mira a sincronizzare la fabbricazione di più prodotti in modo da ottimizzare l'utilizzo delle risorse e minimizzare i tempi di setup.

Nel contesto della produzione, specialmente in un ambiente in cui si fabbricano diversi tipi di prodotti, è comune che le macchine o le linee di produzione richiedano un tempo significativo per essere configurate o regolate per passare da un prodotto all'altro. Questo periodo di transizione è noto come "setup time" e comporta spese e interruzioni nella produzione.

Il concetto di common cycle prevede la pianificazione della produzione in modo tale che i diversi prodotti siano programmati in modo da condividere cicli di produzione comuni, ovvero, che siano prodotti in sequenza in modo che i cambi di setup siano minimizzati o condivisi tra di essi. Questo implica la combinazione o l'allineamento delle esigenze di produzione per ridurre al minimo il tempo di inattività delle macchine durante il cambio di prodotto.

L'obiettivo della common cycle è ottimizzare l'efficienza della produzione, riducendo i tempi di setup, massimizzando l'utilizzo delle risorse e riducendo i costi operativi associati ai cambiamenti di produzione. Questa strategia richiede una pianificazione oculata, un'analisi attenta dei processi produttivi e la sincronizzazione delle esigenze di produzione al fine di massimizzare i benefici derivanti dall'utilizzo di cicli comuni di produzione. Questa policy è stata largamente utilizzata per tentare di dare una soluzione efficiente all'ELSP.

1.1 Rilavoro imperfetto

Nella letteratura, diversi autori hanno adottato la policy del common cycle per affrontare il problema della pianificazione economica dei lotti (ELSP) in contesti di processo imperfetto. Gong et al.[1] affrontano questo problema considerando la produzione ciclica di più prodotti: i processi di rifornimento congiunto di materiali, lo screening in produzione, il rilavoro imperfetto, gli scarti e le carenze. Nel loro articolo, presentano modelli matematici ed equazioni che stimano il costo totale previsto per ciclo e per unità di tempo, tenendo conto di diversi costi come setup, produzione, screening, rilavoro, scarti, carenze e detenzione. Inoltre, illustrano i diagrammi di inventario per prodotti e materiali, evidenziando il flusso di inventario durante i cicli di produzione e rilavoro.

D'altra parte, la ricerca di M. Ben-Dayal et al.[2] si concentra sullo stesso problema critico della pianificazione economica dei lotti (ELSP) considerando gli impatti dei processi di produzione non perfetti. Anche in questo caso, il modello proposto incorpora la produzione ciclica, il rilavoro imperfetto e gli scarti, ma con l'aggiunta della considerazione esplicita degli articoli non conformi. Il modello sviluppato da Ben-Dayal et al. include i costi associati alla produzione di articoli non conformi e fornisce due approcci per la soluzione del problema, quali un metodo indipendente e un approccio di common cycle.

Le similitudini tra i due approcci risiedono nel fatto che entrambi affrontano il problema della pianificazione dei lotti considerando la produzione ciclica, il rilavoro imperfetto e gli

scarti in contesti di processo imperfetto. Entrambi i gruppi di autori propongono modelli matematici complessi per affrontare tali problemi, cercando di minimizzare i costi totali previsti per ciclo e per unità di tempo.

Tuttavia, vi sono anche delle differenze significative tra i due approcci: Gong et al. si concentrano principalmente sulla gestione dei lotti e dei materiali considerando una serie di costi associati, mentre Ben-Dayal et al aggiungono esplicitamente la gestione degli articoli non conformi nel loro modello. Inoltre, l'approccio di common cycle di Ben-Dayal e Hariga include la transizione da uno stato di controllo a uno stato fuori controllo del processo produttivo, mentre questo aspetto non è specificamente trattato nell'articolo di Gong et al.

1.2 Programmazione mista non lineare

Gli autori Maryam Mokhlesian, Seyyed Mohammad Taghi Fatemi Ghomi e Fariborz Jolai [3], utilizzando la stessa scheduling policy, hanno presentato un nuovo modello di Economic Lot Scheduling Problem (ELSP) che tiene conto del valore del denaro nel tempo. Nella Figura 1 vi è una rappresentazione grafica del sistema di produzione, dove q_i =Dimensione del lotto del prodotto nella posizione i della sequenza, p_i =Tasso di produzione per il prodotto i al giorno, d_i =Tasso di domanda per il prodotto i al giorno, t_i^p =Tempo di lavorazione del prodotto nella i -esima posizione della sequenza. Nel modello presentato l'obiettivo principale riguarda la minimizzazione dei costi totali considerando i vantaggi finanziari derivanti dalla gestione dei pagamenti nel tempo.

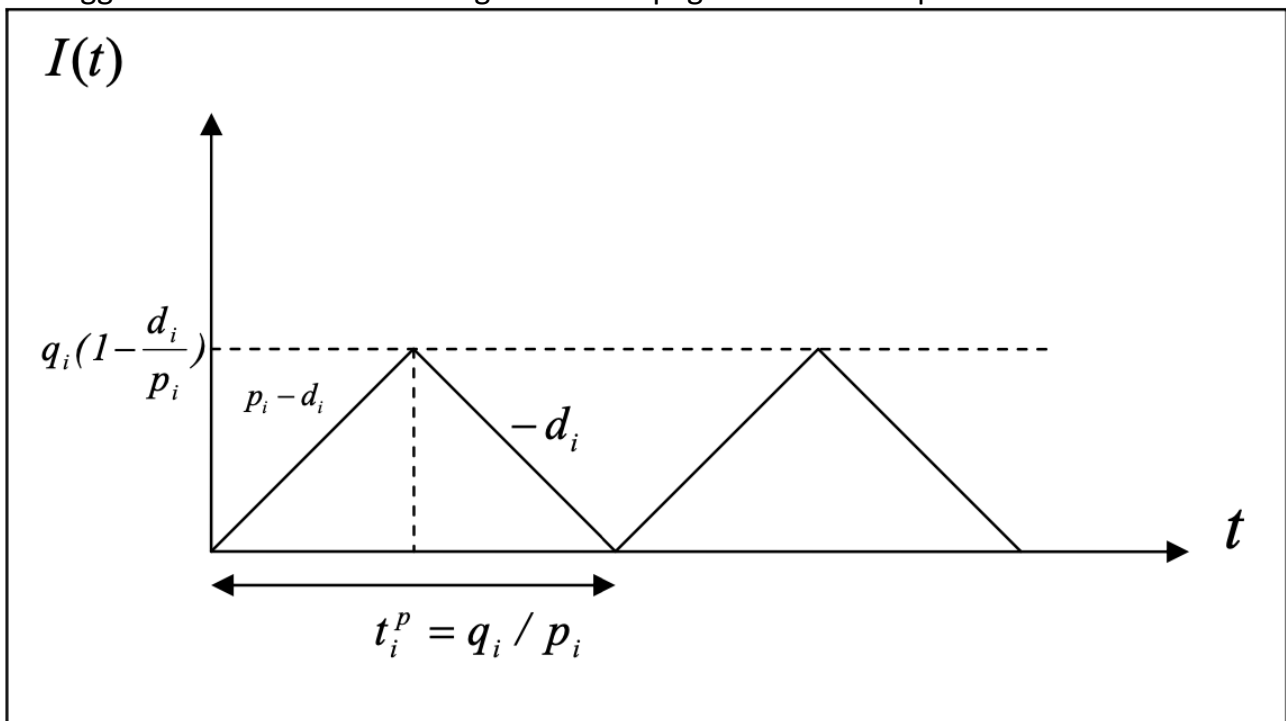


Figura 1: Rappresentazione grafica del sistema di produzione
Maryam Mokhlesian, Seyyed Mohammad Taghi Fatemi Ghomi and Fariborz Jolai [2]

La formulazione del modello risulta essere complessa, trattandosi di un problema non lineare misto di interi, ma l'autore, per la risoluzione di questi ultimi, propone un algoritmo genetico ibrido (HGA). L'analisi dei risultati ha dimostrato che l'inclusione del valore temporale del denaro ha portato ad una riduzione significativa dei costi totali rispetto al classico ELSP. Un aspetto chiave è l'introduzione di una maggiore flessibilità nei pagamenti, consentendo l'ottenimento graduale di entrate dalla vendita dei prodotti. Tale approccio ha dimostrato di poter ridurre i costi complessivi rispetto ad un modello tradizionale, consentendo la gestione dei pagamenti in un arco temporale più ampio. Tuttavia, l'aumento dei tempi di produzione è stato osservato come diretta conseguenza dell'inclusione del valore temporale del denaro. Questo aumento risulta essere vincolato dai parametri del modello, in particolare dai vincoli imposti dalle esigenze di produzione e dalle capacità dell'impianto. In conclusione, l'introduzione del valore temporale del denaro nel modello ELSP ha portato ad un notevole vantaggio in termini di riduzione dei costi complessivi.

Ulteriori studi potrebbero concentrarsi sull'effetto dell'inflazione sul modello appena citato, esplorando ulteriormente come i parametri finanziari influenzano la produzione lotto e la gestione dei pagamenti nel tempo.

Il documento scientifico redatto da M. Jenabi, S.M.T. Fatemi Ghomi, S.A. Torabi & B. Karimi [4] si occupa del problema di dimensionamento economico del lotto e della pianificazione nelle linee di flusso flessibili con macchine parallele non correlate su un orizzonte temporale finito. L'obiettivo è trovare un programma ciclico che minimizzi la somma dei costi di configurazione e di detenzione di inventario per unità di tempo, senza incorrere in carenze di stock.

Il documento propone anch'esso un modello matematico di programmazione non lineare mista zero-uno. A causa della complessità nell'ottenere la soluzione ottimale, vengono proposti due algoritmi: un algoritmo genetico ibrido (HGA) e un simulated annealing (SA). Inoltre, vengono presentati due algoritmi euristici costruttivi efficienti che forniscono soluzioni iniziali per gli algoritmi stessi.

Il problema è confrontato su 180 questioni generate casualmente, mostrando che l'HGA proposto risulta essere superiore rispetto all'SA in termini di qualità della soluzione, mentre l'SA risulta essere più efficiente in termini di tempo di calcolo richiesto. L'articolo fornisce un quadro dettagliato del problema, delle ipotesi, delle variabili decisionali e delle restrizioni, oltre a presentare in modo chiaro l'approccio degli algoritmi proposti e i risultati computazionali ottenuti. Il documento esamina un nuovo approccio di ricerca locale per migliorare la qualità della soluzione in un problema di pianificazione e dimensionamento economico delle linee di produzione flessibili. Questa ricerca si concentra su due obiettivi principali: ridurre i costi di configurazione migliorando l'assegnazione dei prodotti in fasi con più di una macchina e tagliare i costi di detenzione ottimizzando la sequenza dei prodotti.

Per valutare l'efficienza degli algoritmi proposti, vengono eseguiti esperimenti computazionali su problemi generati casualmente di varie dimensioni. Gli algoritmi proposti, HGA e SA, vengono confrontati in termini di qualità della soluzione e tempo di calcolo. In particolare, l'HGA sembra produrre soluzioni di qualità migliore rispetto all'SA, sebbene richieda più tempo di calcolo; inoltre, entrambi migliorano le soluzioni iniziali generate da euristiche più semplici.

L'HGA si dimostra efficace nella qualità della soluzione, mentre l'SA risulta più efficiente in termini di tempo di esecuzione; questi risultati si possono notare nelle tabelle 1, 2 e 3, dove la tabella 1 mostra la struttura del problema testato, la tabella 2 mostra i risultati del problema testato di piccole dimensioni, mentre la tabella 3 mostra il problema testato di grandi dimensioni. Entrambi offrono miglioramenti significativi rispetto alle soluzioni iniziali, dimostrando la validità di questi approcci nella risoluzione del problema.

Problem set	Number of products	Number of stages	Number of machines at each stages	Problem size			
				Number of integer variables	Number of all variables	Number of constraints	Number of nonlinear constraints
1	4	2	1-2	65	74	160	14
2	4	3	2-1-2	97	110	285	18
3	5	2	2-2	101	112	394	17
4	5	3	1-2-2	151	167	498	22
5	5	5	2-1-1-2-1	251	277	706	32
6	5	10	2-2-1-2-1-1-1-2-1-2	501	552	1493	57
7	10	2	2-1	401	422	2560	32
8	10	5	1-2-1-2-1	1001	1052	5966	62
9	10	10	1-1-2-1-2-2-1-2-2-1	2001	2102	12748	112

*Tabella 1: Struttura del problema testato
da M. Jenabi, S.M.T. Fatemi Ghomi, S.A. Torabi & B. Karimi [4]*

Problem size ($n \times m$)	The average of percentage decrease in the total cost of HGA's solution compared to LINGO's solution (%)	The average of percentage decrease in the total cost of SA's solution compared to LINGO's solution (%)	Average CPU time for LINGO (s)	Average CPU time for HGA (s)	Average CPU time for SA (s)
4 × 2	3.86	3.86	452.51	6.17	4.45
4 × 3	10.29	11.17	1753.07	16.19	12.59
5 × 2	4.96	6.92	2049.83	15.68	13.68
5 × 3	13.76	14.27	3220.36	23.89	17.06

*Tabella 2: Risultati del problema testato di piccole dimensioni
da M. Jenabi, S.M.T. Fatemi Ghomi, S.A. Torabi & B. Karimi [4]*

Problem size ($n \times m$)	The average performance ratio of HGA (%)	The average performance ratio of SA (%)	The average CPU time of HGA (s)	The average CPU time of SA (s)	The average decreases in initial solution via HGA (%)	The average decreases in initial solution via SA (%)
5 × 5	0.96	1.44	63.62	56.87	1.1	0.6
5 × 10	7.2	9.26	660.53	577.2	3.52	1.57
10 × 2	2.41	2.88	108.16	48.43	3.17	2.69
10 × 5	7.98	11.25	1680.36	1282.96	7.33	4.18
10 × 10	15.09	21.48	5202.9	4256.35	10.4	7.82

*Tabella 3: Risultati del problema testato di medie e grandi dimensioni
da M. Jenabi, S.M.T. Fatemi Ghomi, S.A. Torabi & B. Karimi [4]*

La ricerca di S.A. Torabi, S.M.T. Fatemi Ghomi e B. Karimi [5] affronta la gestione della pianificazione e consegna di componenti in una catena di approvvigionamento tramite l'introduzione di un modello matematico e due metodologie di soluzione. Anche questo problema è stato modellato come un problema misto non lineare e risolto sia tramite un metodo di enumerazione ottimale iterativo (OEM) sia attraverso un algoritmo genetico ibrido (HGA).

Il lavoro si concentra sulla minimizzazione dei costi di trasporto, configurazione e mantenimento degli inventari lungo la catena di approvvigionamento. Il modello proposto affronta l'assegnazione dei componenti alle macchine, la sequenza di produzione e la

pianificazione dei lotti e delle consegne. L'OEM, sebbene efficace, potrebbe limitarsi a trovare soluzioni locali ottimali a causa della complessità e della non linearità del problema. Per affrontare questa sfida, è stato introdotto l'HGA, che sfrutta un approccio ibrido combinando strategie di ricerca casuale e algoritmi genetici.

L'HGA si articola in diverse fasi, dalla generazione iniziale delle soluzioni alla ricombinazione genetica, all'applicazione di metodi di miglioramento locale e alla selezione dei migliori individui per creare la generazione successiva. L'obiettivo è quello di ottenere soluzioni ottimali o quasi ottimali per il problema di pianificazione.

La ricerca rileva che l'HGA risulta particolarmente efficace per risolvere problemi di piccole e medie dimensioni, mentre per quelli di dimensioni maggiori è in grado di ottenere almeno soluzioni fattibili di buona qualità in tempi accettabili. L'articolo evidenzia l'importanza della rappresentazione delle soluzioni e delle strategie di costruzione nell'efficacia complessiva dell'HGA nel risolvere il problema di scheduling in una catena di approvvigionamento.

Un altro paper affronta un problema di programmazione misto non lineare, quello di Hamidreza Kia, Seyed Hassan Ghodspour e Hamid Davoudpour [6], i quali esaminano la gestione di una catena di approvvigionamento composta da quattro attori: fornitori, fabbricatori, assemblatori e rivenditori, riguardante diversi articoli. L'obiettivo principale risulta determinare il tempo di common cycle e la sequenza di produzione ottimale al fine di minimizzare i costi legati all'inventario, al trasporto e alla configurazione della produzione. Nella letteratura precedente sono stati affrontati problemi simili, ma la soluzione ottimale per questo specifico problema non è stata ancora presentata. Questo studio propone un modello per affrontare questo Economic Lot and Delivery Scheduling Problem (ELDSP). La risoluzione avviene tramite un algoritmo ibrido che combina un'evoluzione del Modified Imperialist Competitive Algorithm (MICA); in Figura 2 si può notare il meccanismo della policy di assimilazione nel MICA e l'ottimizzazione basata sull'apprendimento insegnante-studente (TLBO), dopo aver linearizzato il problema, a differenza dell'ibrido genetico utilizzato nei paper precedentemente descritti.

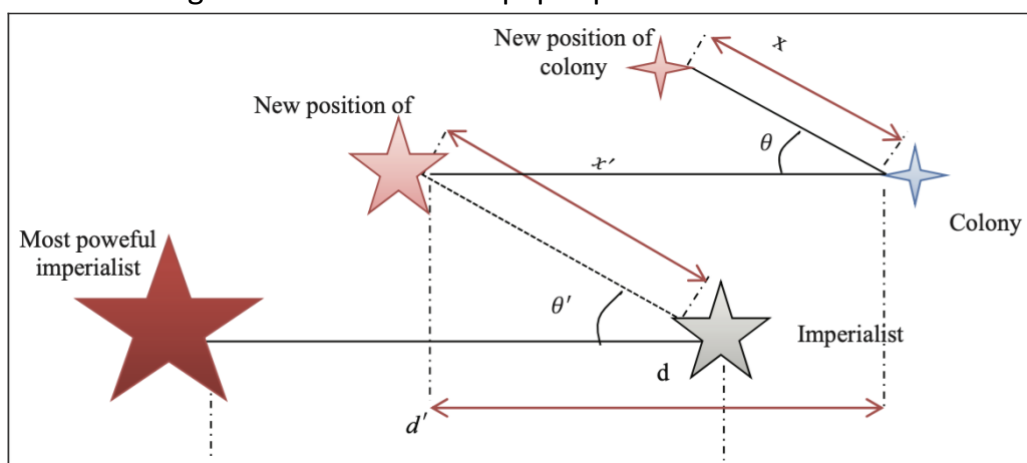


Figura 2: Meccanismo della policy di assimilazione nel MICA.
Kia, Seyed Hassan Ghodspour e Hamid Davoudpour [6]

La catena di approvvigionamento considerata coinvolge fornitori che trasformano materie prime in componenti, fabbricatori che trasformano questi componenti in articoli,

assemblatori che utilizzano questi articoli per produrre prodotti finali e rivenditori che rispondono alla domanda prevista di ciascun prodotto.

Alcune delle assunzioni chiave sono:

- Ogni nodo ha una singola linea di produzione;
- La quantità trasportata da ogni nodo corrisponde alla domanda del nodo successivo;
- È consentita una sola spedizione alla fine di ogni intervallo di tempo;
- I valori di domanda e tasso di produzione sono fissati e noti;
- I costi di stoccaggio, consegna e ordinazione sono fissi;
- Il tempo di configurazione è dipendente dalla sequenza per i fornitori, i fabbricatori e gli assemblatori, mentre il costo di configurazione può essere considerato indipendente dalla sequenza;
- L'obiettivo principale è coordinare i membri della catena, con l'uso di due tipi di sincronizzazione: la piena sincronizzazione attraverso l'applicazione della politica common cycle e la sincronizzazione parziale attraverso l'applicazione di moltiplicatori interi.

Il focus principale dell'articolo è sulla sincronizzazione e sulla coordinazione tra le fasi della catena di approvvigionamento per ottimizzare i costi di inventario, trasporto e produzione. L'articolo discute, quindi, l'implementazione di due algoritmi di ottimizzazione, l'Imperialist Competitive Algorithm (ICA) (Figura 3: Flow chart di ICA) e il Teaching Learning-Based Optimization (TLBO) (Figura 4: Flow chart dell'algoritmo TLBO), per risolvere un problema di ottimizzazione legato alla gestione di una catena di approvvigionamento a quattro stadi.

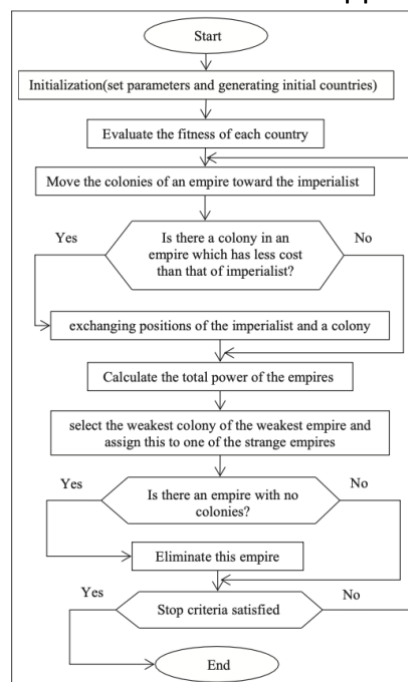


Figura 3: Flow chart di ICA

di Hamidreza Kia, Seyed Hassan Ghodspour e Hamid Davoudpour [6]

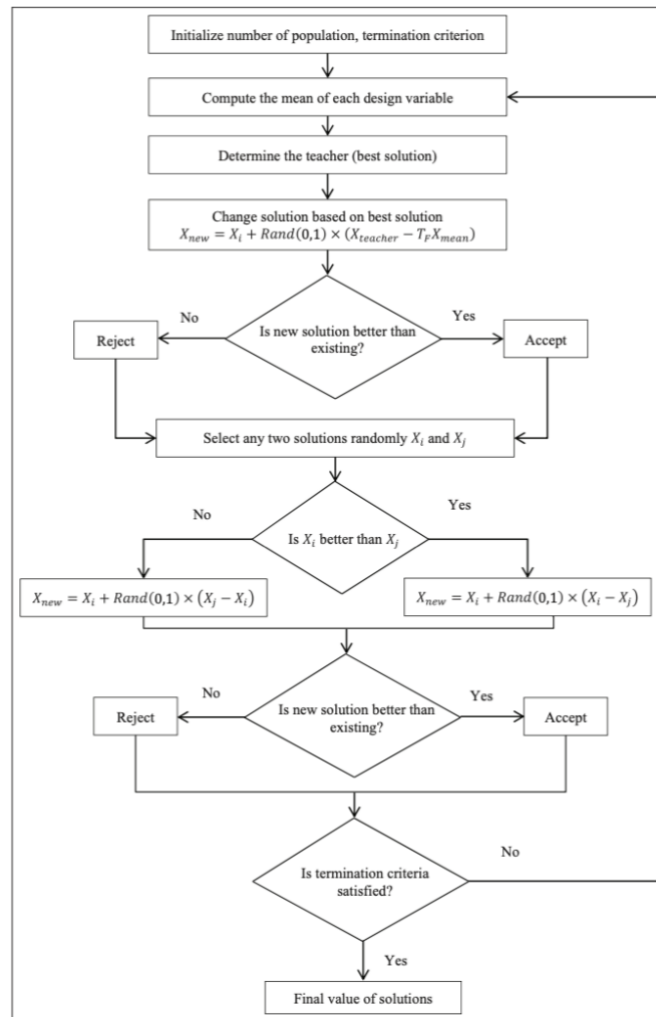


Figura 4: Flow chart dell'algorithmo TLBO di Hamidreza Kia, Seyed Hassan Ghodsypour e Hamid Davoudpour [6]

In primo luogo, l'articolo introduce l'algorithmo TLBO, un approccio di ottimizzazione ispirato alla natura basato su una popolazione di soluzioni che imitano il processo di insegnamento e apprendimento. In TLBO, una popolazione di soluzioni (chiamati "learner") cerca la soluzione ottimale, influenzati dall'istruzione di un "teacher", che rappresenta la migliore soluzione ottenuta fino a quel momento. Tale algorithmo è diviso in due fasi principali:

1. Fase del teacher: In questa fase, la posizione del "teacher" è assegnata al miglior individuo nella popolazione. Gli altri individui ("learners") si spostano verso la posizione del teacher per migliorare la loro soluzione in base alla differenza tra il valore medio corrente e il nuovo valore medio;
2. Fase del learner: Durante questa fase, c'è uno scambio di informazioni tra gli individui ("learners") per aumentare la conoscenza. Gli individui si spostano verso altri individui migliori, migliorando la propria posizione.

L'algorithmo proposto, chiamato MICA-TLBO (Figura 5: Flow chart del teaching e learning phase del MICA-TLBO.) è una combinazione ibrida di ICA e TLBO. In questo contesto, gli "imperialisti" rappresentano i "teacher", mentre le loro colonie sono considerate studenti.

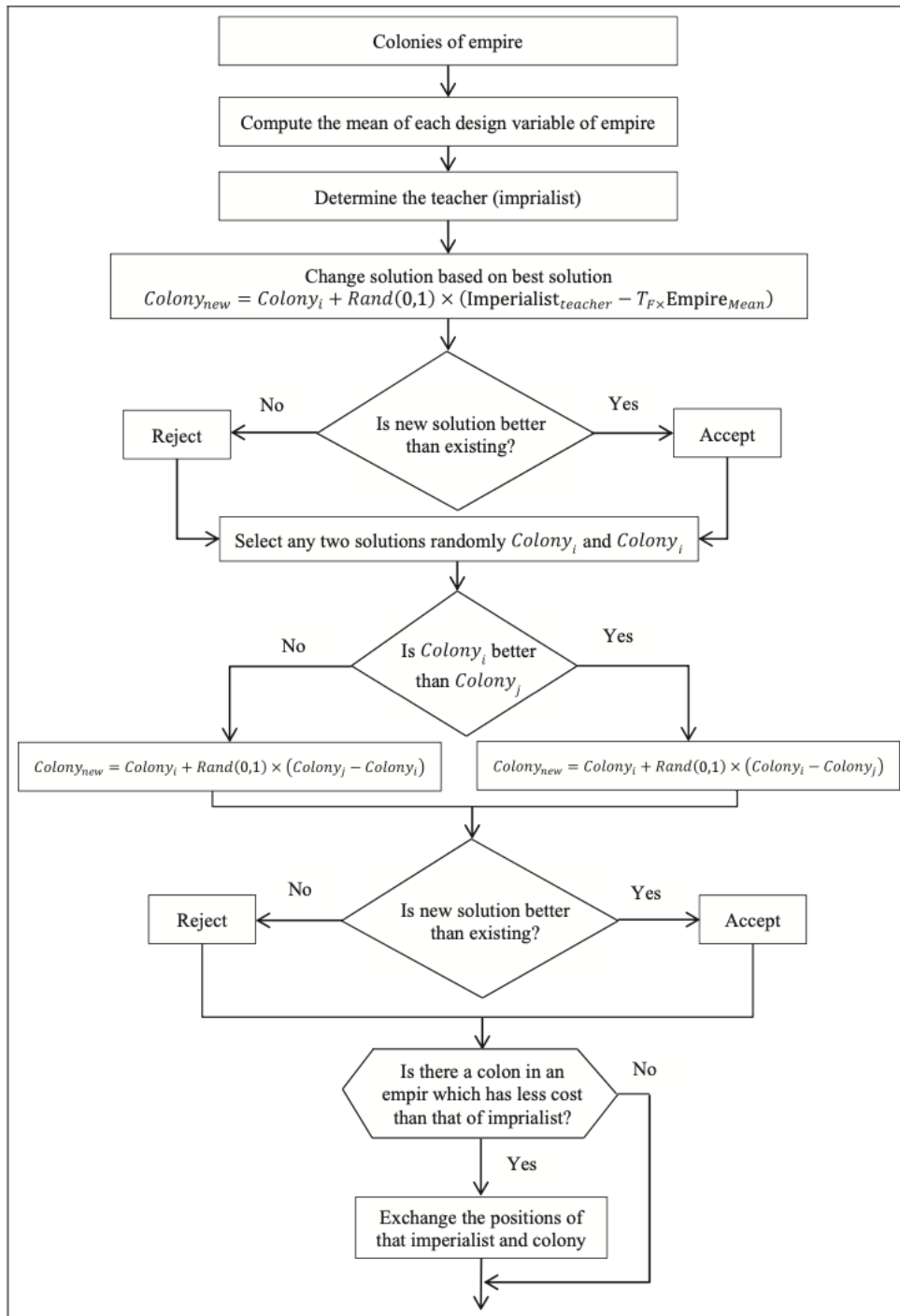


Figura 5: Flow chart del teaching e learning phase del MICA-TLBO.
di Hamidreza Kia, Seyed Hassan Ghodsypour e Hamid Davoudpour [6]

L'algoritmo cerca di migliorare la performance di entrambi aumentando il potere delle colonie e dell'imperialista. Le sperimentazioni computazionali mostrano che il MICA-TLBO supera altri algoritmi sia in termini di qualità della soluzione (misurata tramite RPD - Relative Percentage Deviation) che in termini di tempo di risoluzione (misurato come tempo medio di calcolo). Infine, l'articolo esamina due politiche di riempimento della catena di approvvigionamento: la politica del ciclo di tempo comune e la politica dei moltiplicatori interi. Si dimostra che la politica dei moltiplicatori interi ottiene risparmi di costo superiori rispetto alla politica del ciclo di tempo comune, con risparmi fino al 31,2%. Concludendo, l'articolo propone un approccio ibrido MICA-TLBO che ottiene risultati

migliori in termini di qualità della soluzione e tempi di risoluzione rispetto ad altri algoritmi. Mostra anche che la politica dei moltiplicatori interi può portare a significativi risparmi di costo rispetto alla politica del ciclo di tempo comune nella gestione della catena di approvvigionamento.

Confrontando questi ultimi quattro paper, si può notare come i primi tre testi si concentrano su problemi complessi di ottimizzazione, affrontando ciascuno un problema di programmazione misto non lineare e utilizzando un algoritmo genetico ibrido (HGA) per risolverlo. Tuttavia, le applicazioni specifiche e i dettagli dei problemi differiscono notevolmente tra loro.

Maryam Mokhlesian, Seyyed Mohammad Taghi Fatemi Ghomi and Fariborz Jolai [3] presentano un modello di Programmazione della Sequenza di Lotti Economici (ELSP) che tiene conto del valore del denaro nel tempo. L'obiettivo principale è minimizzare i costi totali considerando i vantaggi finanziari derivanti dalla gestione dei pagamenti nel tempo. L'HGA proposto viene utilizzato per risolvere un problema su larga scala, e i risultati mostrano una riduzione significativa dei costi totali rispetto al classico ELSP, grazie all'introduzione del valore temporale del denaro.

M. Jenabi, S.M.T. Fatemi Ghomi, S.A. Torabi & B. Karimi [4] affrontano il problema di dimensionamento economico del lotto e della pianificazione nelle linee di flusso flessibili con macchine parallele non correlate. Anche qui, l'HGA viene utilizzato per risolvere il problema misto non lineare, che mira a minimizzare la somma dei costi di configurazione e di detenzione di inventario per unità di tempo, senza incorrere in carenze di stock. L'analisi dei risultati mostra che l'HGA proposto è superiore a un'altra metodologia di soluzione (simulated annealing) in termini di qualità della soluzione.

Nel testo di S.A. Torabi, S.M.T. Fatemi Ghomi e B. Karimi [5], il problema affrontato riguarda la gestione della pianificazione e consegna di componenti in una catena di approvvigionamento. Qui, l'HGA viene utilizzato per risolvere un problema misto non lineare che mira alla minimizzazione dei costi di trasporto, configurazione e mantenimento degli inventari lungo la catena di approvvigionamento. L'articolo mette in luce l'efficacia dell'HGA, soprattutto per problemi di piccole e medie dimensioni.

Hamidreza Kia et al.[6] hanno scelto di utilizzare un algoritmo ibrido composto da MICA e TLBO. Questi due ibridi sono entrambi utilizzati per risolvere problemi di programmazione non lineare misto, ma differiscono nei loro approcci e strategie di ottimizzazione.

Gli algoritmi genetici sono ispirati al processo di selezione naturale e alla teoria dell'evoluzione. Operano attraverso una combinazione di operatori genetici come la selezione, la mutazione e l'incrocio per generare nuove soluzioni candidate. Nella versione ibrida, gli algoritmi genetici sono combinati con altre tecniche di ottimizzazione o euristiche per migliorare le prestazioni complessive dell'algoritmo. L'obiettivo di questa combinazione è sfruttare i punti di forza di entrambi gli algoritmi, ad esempio la capacità degli algoritmi genetici di esplorare lo spazio delle soluzioni in modo efficiente e la capacità delle tecniche di ottimizzazione aggiuntive di localizzare le soluzioni ottimali. Gli algoritmi ibridi genetici possono essere applicati in una vasta gamma di problemi, dalla programmazione lineare alla programmazione non lineare, inclusa la programmazione mista.

Il Modified Imperialist Competitive Algorithm (MICA) è un algoritmo di ottimizzazione basato su colonie che si basa sul concetto di competizione tra imperialisti e colonie.

L'ottimizzazione basata sull'apprendimento insegnante-studente (TLBO) è un'altra tecnica

di ottimizzazione ispirata al processo di apprendimento naturale tra insegnanti e studenti. In un approccio ibrido che combina MICA e TLBO, le due tecniche vengono integrate in un unico framework di ottimizzazione. L'idea è sfruttare i punti di forza di entrambi gli algoritmi: la capacità di esplorazione e di competizione di MICA e il processo di insegnamento e apprendimento di TLBO. Questo approccio ibrido può essere particolarmente efficace in problemi complessi in cui sia necessario bilanciare l'esplorazione dello spazio delle soluzioni con l'affinamento delle soluzioni trovate. Entrambi gli approcci ibridi mirano a migliorare le prestazioni degli algoritmi di ottimizzazione combinando più tecniche o euristiche. La scelta tra un tipo di ibrido rispetto all'altro dipende spesso dalle caratteristiche specifiche del problema da risolvere e dalla complessità dell'ottimizzazione richiesta.

1.3 Delivery Problem

Per risolvere il problema dell'Economic Lot Scheduling Delivery Problem (ELSDP), trattato anche da Hamidreza Kia, Seyed Hassan Ghodsypour e Hamid Davoudpour [6], Afif As'ad & Zied Bahroun [7] propongono un algoritmo che utilizza un'euristica di ricerca greedy all'interno di un intervallo che contiene il valore ottimale del tempo del ciclo di produzione. Questo intervallo viene identificato inizialmente calcolando T_{min} e T_{max} tramite determinate formule in base ai parametri del problema. Successivamente, una volta identificato l'intervallo, si esegue una ricerca con un passo predefinito per valutare diverse lunghezze del ciclo di produzione. Per ogni valore del ciclo di produzione all'interno dell'intervallo, l'algoritmo applica la regola WSPT (Weighted Shortest Processing Time) per determinare la sequenza ottimale di produzione e utilizza formule derivate per calcolare i valori ottimali delle frequenze di rifornimento delle materie prime e delle spedizioni dei prodotti finiti. Questi valori vengono poi arrotondati all'intero più vicino e utilizzati per calcolare il costo totale corrispondente. L'algoritmo restituisce i valori delle variabili decisionali che minimizzano il costo totale.

Questo approccio greedy, sebbene efficiente e in grado di fornire soluzioni di buona qualità, potrebbe non garantire sempre la soluzione ottimale, poiché si tratta di un problema complesso e interconnesso. Tuttavia, l'algoritmo proposto riesce a fornire una soluzione ragionevole entro un breve lasso di tempo, grazie anche alla presenza di espressioni chiuse per la determinazione delle variabili decisionali ottimali una volta fissato il valore del tempo del ciclo.

Anche Jens Clausen & Suquan Ju [8] si sono dedicati all'ELDSP, gli autori nel loro studio hanno modificato la generazione dei problemi usata da Hahm e Yano (Figura 6) e Jensen e Khouja, poiché per un numero maggiore di tipi di componenti si sono rivelati generare problemi con soluzioni ottimali banali.

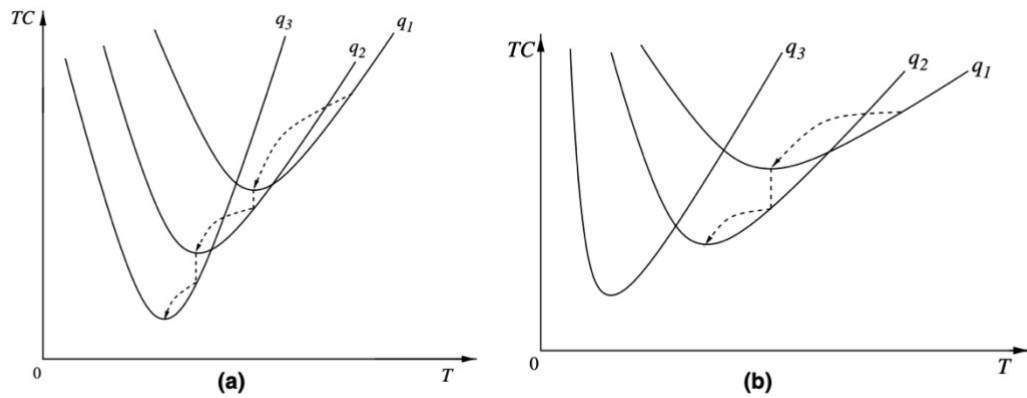


Figura 6: Prestazioni dell'algorithmo euristico di Hahm e Yano: (a) terminato con una soluzione ottimale globale; (b) terminato con una soluzione ottimale locale.
 Jens Clausen & Suquan Ju [8]

L'indagine mostra che il tempo di esecuzione degli algoritmi ottimali diventa eccessivo per un grande numero di tipi di componenti. Di conseguenza, è stato sviluppato un algoritmo ibrido che utilizza l'euristico di Hahm e Yano come pre-processor dell'algorithmo di Jensen e Khouja mantenendo così la garanzia di ottimalità e ottenendo un tempo di esecuzione due o tre volte più lungo rispetto a quello dell'euristico di Hahm e Yano. Nella figura 7 si può vedere come il comportamento del metodo ibrido sia ottimale, in quanto la distanza tra T_l e T_r , che rappresenta la sequenza unica di produzione, è molto piccola.

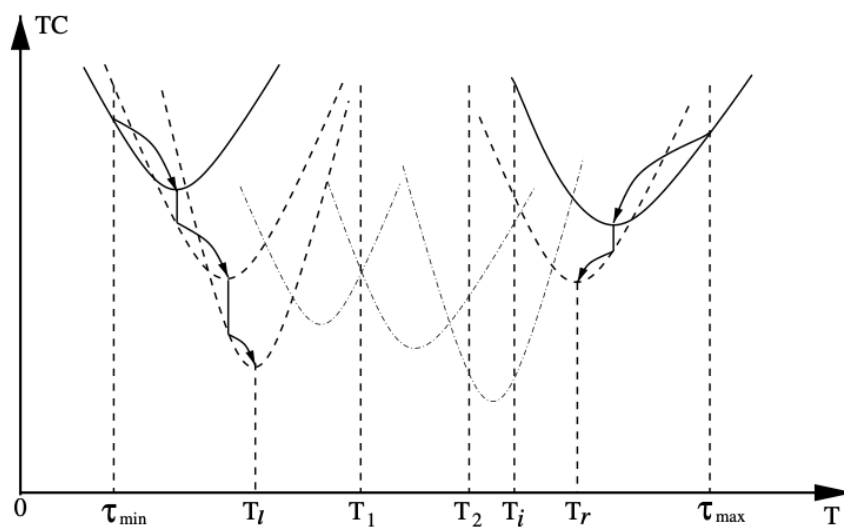


Figura 7: Il comportamento del metodo ibrido.
 Jens Clausen & Suquan Ju [8]

In questo paper, viene considerata la formulazione standard del caso comune del problema ELDSP. Viene definito un impianto di assemblaggio che utilizza un insieme di componenti, tutti prodotti dallo stesso fornitore. La domanda per ciascun componente è costante nel tempo. I componenti vengono prodotti e consegnati in lotti con un costo fisso di consegna per lotto e tempi fissi di setup e di produzione. L'obiettivo è determinare il tempo di ciclo, ovvero l'intervallo temporale tra le consegne, in modo tale da minimizzare i costi complessivi di produzione, inventario (sia del fornitore che dell'impianto di assemblaggio) e spedizione. I costi includono i costi di setup di produzione, i costi di mantenimento

dell'inventario presso il fornitore e l'impianto di assemblaggio, nonché i costi di trasporto. La formulazione matematica del problema coinvolge la ricerca del tempo di ciclo ottimale e della sequenza di produzione ottimale dei componenti. Si devono determinare il tempo di ciclo ottimale e la sequenza di produzione che minimizzano il costo totale per unità di tempo, tenendo conto dei costi di setup, dei costi di mantenimento dell'inventario e dei costi di trasporto. Per trovare la soluzione ottimale, è necessario valutare tutte le possibili sequenze di produzione e trovare il tempo di ciclo migliore per ciascuna. Tuttavia, poiché le sequenze possibili sono esponenzialmente numerose, questo problema è computazionalmente impegnativo. Sia l'euristico di Hahm e Yano che l'algoritmo di Jensen e Khouja cercano di risolvere questo problema, ma con differenti approcci computazionali e di efficienza. Il paper descrive quindi un nuovo algoritmo ibrido che combina l'euristico di Hahm e Yano con l'algoritmo di Jensen e Khouja, cercando di ottenere una soluzione di qualità vicina all'ottimo con tempi di esecuzione accettabili anche per un grande numero di tipi di componenti. L'indagine computazionale effettuata nel paper mostra che l'algoritmo ibrido ha tempi di esecuzione ragionevoli, come si può notare dalla Tabella 4, che mostra i tempi di esecuzione in secondi per i diversi algoritmi utilizzati, e soluzioni di qualità vicine all'ottimo, mantenendo una garanzia di ottimalità. Questo rende l'algoritmo ibrido una scelta promettente per risolvere il problema ELDSP su una vasta gamma di scenari, specialmente quando il numero di tipi di componenti è elevato.

J	No. of problems with $\tau_{\min} < \tau_{\max}$	Running time of H&Y's algorithm	J&K's algorithm		Hybrid algorithm	
			Running time	Average no. of intervals	Running time	Average no. of intervals when $T_l \neq T_r$
2	100,000	0.137	0.148	1.119	0.309	2.000
3	100,000	0.227	0.260	1.424	0.479	2.015
5	100,000	0.511	0.705	2.282	1.231	2.004
7	100,000	0.962	1.833	3.291	2.136	2.033
10	100,000	1.725	6.078	5.064	4.685	2.027
20	100,000	6.978	43.514	12.740	16.447	2.027
30	100,000	14.533	160.275	23.058	37.697	2.047
50	100,000	37.679	868.8	50.515	98.827	2.034
100	100,000	125.603	8091.5	152.677	319.429	2.042

Tabella 4: Tempi di esecuzione in secondi per i diversi algoritmi utilizzati.
Jens Clausen & Suquan Ju [8]

Quindi, mentre l'articolo di Rami Afif As'ad & Zied Bahroun [7] si concentra sull'utilizzo di un'euristica di ricerca greedy all'interno di un intervallo predefinito per identificare il valore ottimale del tempo del ciclo di produzione, il paper di Hamidreza Kia, Seyed Hassan Ghodsypour e Hamid Davoudpour [6] propone un modello di programmazione non lineare intera mista (MINLP) per affrontare l'ELDSP. Utilizzano un algoritmo ibrido, combinando un'evoluzione del Modified Imperialist Competitive Algorithm (MICA) e l'ottimizzazione basata sull'apprendimento insegnante-studente (TLBO), dopo aver linearizzato il problema. Il terzo articolo di Clausen & Ju [8] si occupa anche di ELDSP, proponendo un algoritmo ibrido che utilizza l'euristica di Hahm e Yano come pre-processor dell'algoritmo di Jensen e Khouja.

Nonostante l'approccio greedy possa non garantire sempre la soluzione ottimale, l'algoritmo proposto fornisce soluzioni ragionevoli entro un breve lasso di tempo, al contempo il modello di Hamidreza Kia, Seyed Hassan Ghodsypour e Hamid Davoudpour [6]

offre una soluzione ottimale al problema specifico, con un focus sulla sincronizzazione e sulla coordinazione tra le fasi della catena di approvvigionamento per ottimizzare i costi di inventario, trasporto e produzione. L'approccio di Clausen & Ju [8] cerca di bilanciare l'ottimalità dell' algoritmo di Jensen e Khouja con la velocità di esecuzione dell'euristica di Hahm e Yano, soprattutto in scenari con un gran numero di tipi di componenti.

1.4 Programmazione mista lineare

Gli studi di Mohsen Elhafsi & Sherman X. Bai [9], Moutaz Khouja [10] e John P. Matthews [11] si sono concentrati sullo studio della programmazione mista lineare.

Mohsen Elhafsi & Sherman X. Bai [9] affrontano la pianificazione della produzione di vari prodotti, realizzati periodicamente, in una sequenza fissa, su una singola macchina. In Figura 8 si può notare un'illustrazione della schedulazione common cycle a due prodotti.

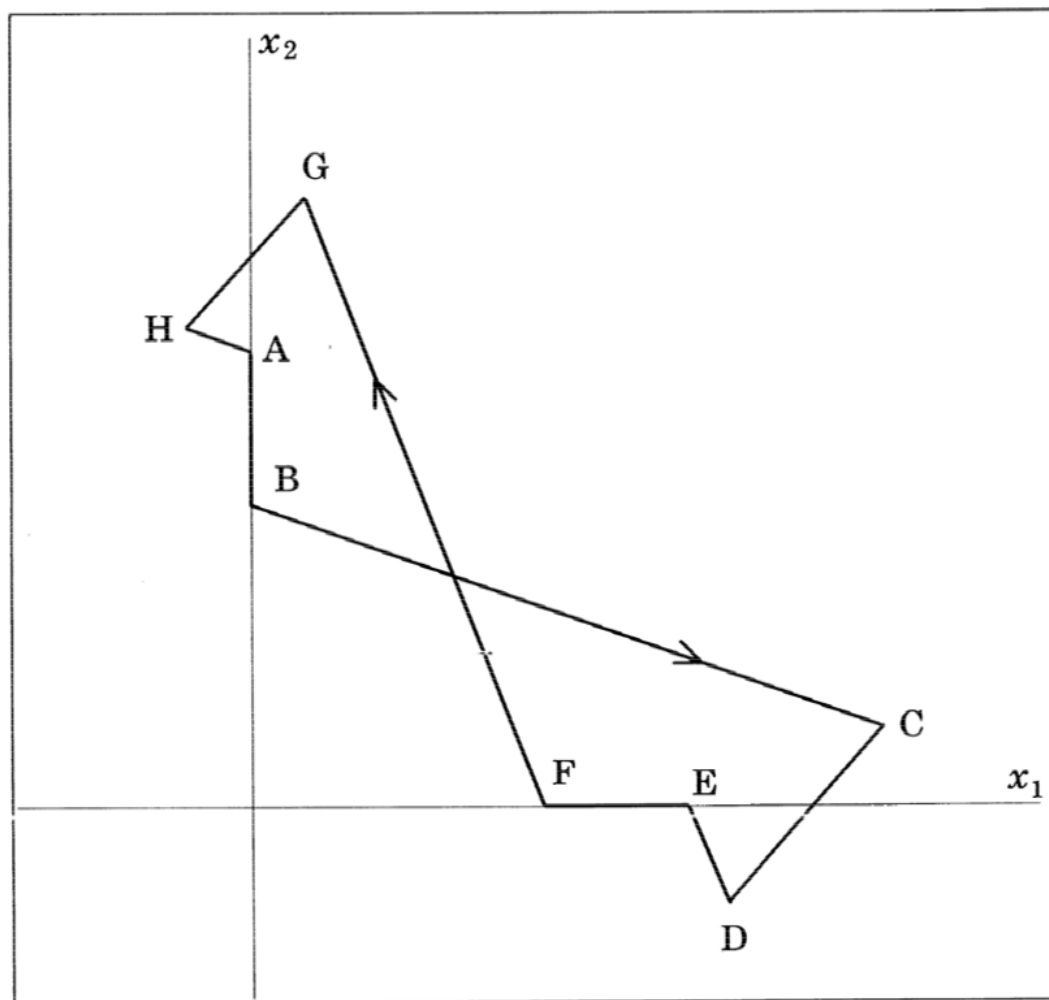


Figura 8: Illustrazione della schedulazione common cycle a due prodotti.
Mohsen Elhafsi & Sherman X. Bai [9]

Viene esteso il Common Cycle Economic Lot Scheduling Problem, consentendo di controllare i tassi di produzione all'inizio e durante l'esecuzione di ciascuna produzione di un prodotto. Si assume che la domanda insoddisfatta venga completamente messa in backorder. L'obiettivo è determinare l'ottimizzazione dell'orario soddisfacendo la domanda

per tutti i prodotti e minimizzando i costi medi di setup, mantenimento dell'inventario e backorder per unità di tempo. La comparazione con risultati precedenti (quando i tassi di produzione sono fissi) rivela una riduzione dei costi medi fino al 66% consentendo tassi di produzione controllabili.

Si menziona la sfida nell'ottenere una soluzione ottimale e si sottolinea l'uso di euristiche efficaci. In seguito, si discute l'introduzione di tassi di produzione controllabili, ritenendo che questi possano migliorare l'efficienza dei sistemi di inventario.

Il documento presenta un modello matematico per affrontare il problema, formulando le ipotesi e fornendo la notazione utilizzata. Vengono derivati i costi medi di setup, mantenimento dell'inventario e backorder e si presentano formule chiave per la risoluzione del problema.

Successivamente, si affronta il problema per un sistema con due prodotti, derivando la soluzione ottimale in modo analitico. Viene introdotto un teorema che stabilisce la restrizione dei valori ottimali per i tassi di produzione, semplificando la ricerca della soluzione ottimale. Vengono forniti dettagli su come ottenere le soluzioni ottimali numeriche.

Inoltre, l'articolo presenta esempi numerici che confrontano le soluzioni proposte con modelli precedentemente sviluppati. I risultati dimostrano notevoli risparmi nell'implementazione di tassi di produzione controllabili, anche rispetto a modelli che non contemplano la produzione a tasso di domanda.

Nel caso a due prodotti, viene derivata la soluzione ottimale in forma chiusa, mentre per il problema multi-prodotto viene proposta una versione semplificata dell'algoritmo di Zoutendijk (Bazaraa, M. S. and Shetty, C. M. (1979) *NonLinear Programming Theory and Algorithms*. John Wiley & Sons.).

La formulazione del problema multi-prodotto estende quella del problema a due prodotti, utilizzando l'espressione di T fornita e sostituendo i valori ottenuti nella funzione obiettivo. Si dimostra che la funzione obiettivo è strettamente convessa, garantendo quindi un'unica soluzione ottimale globale e finita.

L'algoritmo di Zoutendijk è utilizzato per minimizzare una funzione differenziabile soggetta a vincoli lineari. Viene presentata la procedura iniziale e il passo principale dell'algoritmo, che coinvolge la risoluzione di un problema di programmazione lineare e di una ricerca lineare.

Si riportano i dati e la soluzione ottimale, mostrando un leggero risparmio nel costo medio giornaliero rispetto a una situazione in cui il backlog non è permesso.

Il paper fornisce soluzioni ottimali e approfondimenti su come gestire il problema ELSP considerando la gestione dei tassi di produzione e la presenza di backlog, dimostrando risparmi significativi e sottolineando l'importanza di tali fattori nelle strategie di gestione dell'inventario e della produzione.

Il lavoro proposto rivela significativi vantaggi nell'adottare approcci che consentono la gestione attiva dei tassi di produzione e della possibilità di backlog, con impatti positivi sui costi medi giornalieri.

L'articolo di Moutaz Khouja [10] propone diverse strategie algoritmiche per affrontare il problema ELSP considerando i tassi di produzione come variabili decisionali e i costi unitari medi degli articoli dipendenti da tali tassi.

Innanzitutto, si esamina un metodo di risoluzione diretta del modello, che mira a trovare la soluzione ottimale attraverso tecniche come la programmazione lineare o mista intera. Questo approccio è computazionalmente intensivo ma può fornire la soluzione migliore. Un'altra strategia proposta è l'algoritmo column generation, una tecnica di ottimizzazione combinatoria che genera gradualmente soluzioni valide partendo da un insieme limitato e aggiungendo nuove soluzioni, combinando i tassi di produzione come variabili decisionali. Inoltre, l'articolo esamina l'approccio della ricerca locale, concentrandosi sull'ottimizzazione di una soluzione iniziale valida attraverso piccole modifiche iterative per migliorare il risultato, seppur limitato dalla scelta iniziale della soluzione.

Viene considerato l'algoritmo di euristica costruttiva, un metodo di ricerca rapida che costruisce passo dopo passo una soluzione, partendo da un insieme vuoto e aggiungendo le variabili decisionali dei tassi di produzione secondo specifiche regole di selezione. L'articolo analizza dettagliatamente ciascuna strategia, discutendo dei vantaggi, delle limitazioni e delle prestazioni relative di questi algoritmi nel contesto della risoluzione del problema ELSP con tassi di produzione variabili e costi unitari medi dipendenti da tali tassi. Il testo di John P. Matthews [11] discute la condizione di ottimalità della regola "zero-switch". La regola "zero-switch" implica che la produzione di un articolo inizi solo quando il livello di inventario dell'articolo precedente è arrivato a zero.

L'autore del testo esamina un modello di programmazione lineare che riflette il problema di assegnare lotto e tempo di produzione a ogni articolo per massimizzare la durata del ciclo produttivo, minimizzando i costi di immagazzinamento e di avvio della produzione. Si afferma che, in circostanze specifiche in cui i costi di immagazzinamento per unità di prodotto sono simili tra gli articoli, la regola "zero-switch" risulta essere una condizione necessaria per l'ottimalità.

L'analisi matematica mostra che la regola "zero-switch" è legata al numero minimo di variabili positive nel modello di programmazione lineare. In breve, dimostra che quando i costi di immagazzinamento sono simili tra gli articoli, l'avvio della produzione di un articolo avviene solo quando il livello di inventario dell'articolo precedente è a zero, garantendo un'ottimizzazione dei costi.

Il testo, attraverso l'uso di modelli matematici, dimostra l'importanza della regola "zero-switch" nelle situazioni in cui i costi di immagazzinamento degli articoli sono paragonabili, contribuendo a determinare il momento ottimale per iniziare la produzione di ciascun articolo al fine di minimizzare i costi complessivi di produzione.

Tutti e tre gli approcci presentati si avvalgono di modelli matematici basati sulla programmazione lineare per risolvere complessi problemi di pianificazione e ottimizzazione nella produzione.

Le similitudini risiedono anche nell'obiettivo condiviso di ridurre i costi complessivi associati alla produzione e alla gestione degli inventari. Ognuno dei tre studi mira a minimizzare i costi medi di setup, mantenimento dell'inventario e, dove applicabile, di backorder, allo scopo di migliorare l'efficienza del sistema produttivo e ridurre gli sprechi. Tuttavia, ci sono differenze nei dettagli delle metodologie utilizzate e nei problemi specifici affrontati. Mohsen Elhafsi & Sherman X. Bai [9] si concentrano sull'estensione del Common Cycle Economic Lot Scheduling Problem, introducendo la possibilità di controllare i tassi di produzione per ottimizzare l'orario di produzione su una singola macchina. Moutaz Khouja [10], invece, esplora diverse strategie algoritmiche, tra cui l'algoritmo di generazione di

colonne, per affrontare il problema ELSP con tassi di produzione variabili e costi unitari medi dipendenti da tali tassi. John P. Matthews [11], infine, si concentra sull'analisi della condizione di ottimalità della regola "zero-switch" in un contesto di programmazione lineare, evidenziando l'importanza di tale regola nei casi in cui i costi di immagazzinamento degli articoli sono paragonabili.

1.5 Rimanifattura

Ivan Ferretti [12] aggiunge il vincolo della rimanifattura nel suo studio, la pianificazione e l'esecuzione efficienti di un sistema di produzione e rimanifattura multi-item (ELSP) richiedono la soddisfazione di condizioni chiave per la fattibilità delle soluzioni. Il primo requisito è che l'utilizzo della capacità su ciascuna linea di produzione non superi il 100%, ponendo un limite all'utilizzo della capacità delle linee di produzione. In particolare, la capacità di utilizzo di ogni linea di produzione non deve superare il reciproco della somma delle frequenze di produzione associate ad essa. Il secondo requisito riguarda l'assenza di interferenze sulla pianificazione delle operazioni. Quando il numero di elementi è superiore a 2, possono verificarsi interferenze nella programmazione delle operazioni di sorting, produzione e rimanifattura (Figura 9: Sistema di produzione-rimanifattura con sorting).

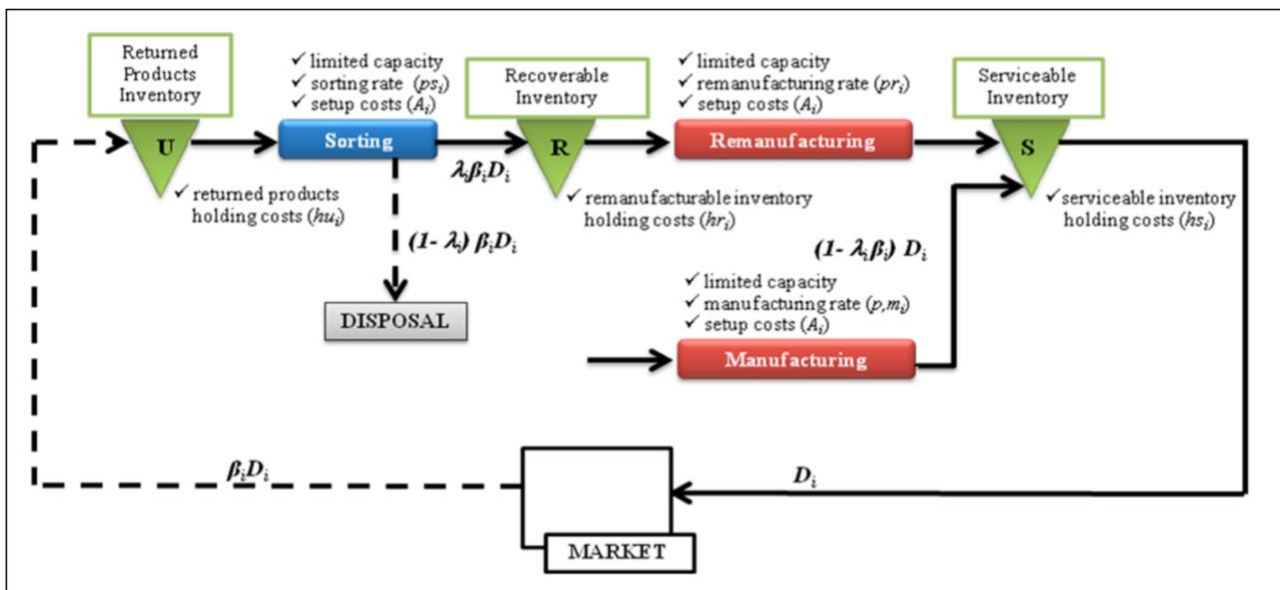


Figura 9: Sistema di produzione-rimanifattura con sorting.
Ivan Ferretti [12]

Una soluzione è considerata "interferita" se vi sono interferenze sulle linee di produzione. Ad esempio, potrebbe esserci un sovrapporsi di operazioni che impedisce l'esecuzione efficiente dei lotti, rendendo la soluzione non fattibile. La risoluzione del problema ELSP si divide in due sotto-problemi: lot sizing e scheduling della produzione. Il lot sizing mira a minimizzare i costi totali di setup e mantenimento dell'inventario, cercando di bilanciare tali costi. Lo scheduling si riferisce alla sequenza di lavorazione degli elementi su ogni linea di produzione. Se i tempi e i costi di setup non dipendono dalla sequenza, la schedulazione non influisce sulla determinazione del costo minimo, ma può impattare sulla fattibilità delle

soluzioni a causa di eventuali interferenze tra le produzioni. Per ottenere il costo minimo, è necessario risolvere prima il problema del lot sizing e successivamente pianificare la produzione sulle linee di produzione. Nel caso in cui una soluzione non sia fattibile a causa di interferenze, è necessario apportare modifiche alla pianificazione per cercare soluzioni valide. Per determinare il set ottimale o quasi-ottimale di frequenze di produzione, si utilizza una regola che bilancia i costi di setup e mantenimento dell'inventario. Una volta determinato il set migliore di frequenze, è fondamentale verificare la fattibilità della soluzione soddisfacendo le condizioni di capacità di utilizzo e l'assenza di interferenze. Per quanto riguarda la determinazione del periodo ottimale di un ciclo, si utilizza un'espressione analitica che si basa sulla derivata del costo totale rispetto al ciclo, poiché la funzione del costo totale è convessa sul ciclo. Infine, un'analisi numerica viene condotta su un caso studio con tre elementi identici per valutare l'influenza del tasso di smaltimento controllabile ($1 - \lambda$) sulla minimizzazione del costo totale del sistema. I risultati mostrano che esiste un valore ottimale di λ che minimizza il costo totale del sistema di produzione-rimanufactura. La Figura 10 mostra i costi totali per differenti valori di pr (production rate del prodotto i sulla linea di rimanutatura) e λ (percentuale di prodotti restituiti che vengono selezionati per le operazioni di rimanuturazione)).

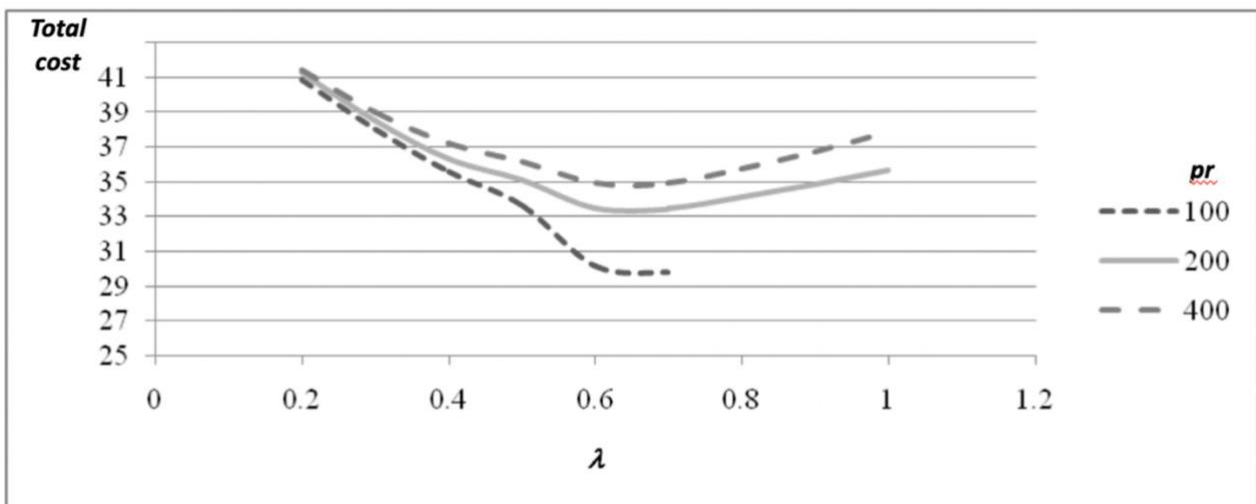


Figura 10: Costi totali per differenti valori di pr (production rate del prodotto i sulla linea di rimanutatura) e λ (percentuale di prodotti restituiti che vengono selezionati per le operazioni di rimanuturazione.)

Ivan Ferretti [12]

Tale valore influisce sull'utilizzo delle risorse e sui costi associati ai flussi di rimanutatura. e produzione. L'approccio ottimale al problema ELSP coinvolge la determinazione di frequenze di produzione bilanciate e la gestione delle interferenze tra lotti per garantire soluzioni fattibili e minimizzare i costi complessivi del sistema di produzione- rimanutatura. Il testo di Ou Tang & Ruud Teunter [13], come quello di Ferretti, descrive il problema di programmazione della produzione noto come Economic Lot Scheduling Problem with Returns (ELSPR).

Il problema coinvolge una compagnia che produce e rimanutatura parti per auto. La sfida è determinare le dimensioni dei lotti e la sequenza di produzione migliore per ridurre i costi di tenuta di magazzino e di setup. Questo è complicato dalla relazione tra le dimensioni dei

lotti di produzione e rimanifattura, poiché sono legati al rapporto tra ritorni, recuperati o restituiti, e domanda.

Gli autori propongono un modello matematico per risolvere il problema, limitato a politiche con un tempo di common cycle. Questo modello è risolto attraverso un Mixed Integer Linear Program (MILP) che permette di ottenere una soluzione esatta.

Un algoritmo chiave utilizzato è basato su una formulazione MIP (Mixed Integer Program) che risolve il problema dell'ELSPR. Questo algoritmo sfrutta due lemmi: uno che verifica l'esistenza di una soluzione e uno che calcola il costo ideale e aggiuntivo per ogni unità di tempo di produzione.

Inoltre, viene fornito un bound inferiore, calcolato in base ai lemmi precedentemente citati, che aiuta a comprendere se vale la pena dedicare tempo alla ricerca di una soluzione ottimale. Questo bound è utile perché è molto vicino al costo minimo ottenibile per la politica ottimale.

Gli autori eseguono esempi numerici per dimostrare l'efficacia del modello proposto e condurre un'analisi di sensitività per valutare l'effetto delle variazioni dei parametri sul costo totale.

Anche gli autori Huiqing Ouyang & Xiangyang Zhu [14] affrontano la sfida della pianificazione dei processi di produzione e di rimanifattura sulla stessa linea produttiva, estendendo il classico Problema di Pianificazione Economica dei Lotti (ELSP). Utilizzano l'approccio del common cycle per ottimizzare il coordinamento delle attività di produzione e rimanifattura al fine di minimizzare il costo totale medio per unità di tempo.

Il modello matematico sviluppato nell'articolo mira a gestire due tipi di inventari: l'inventario dei resi (contenente i prodotti restituiti) e l'inventario dei prodotti in condizioni idonee all'uso (contenente prodotti fabbricati o ricondizionati per soddisfare le richieste). La Figura 11 mostra lo schema dell'inventario dei resi e dei prodotti in condizioni idonee all'uso.

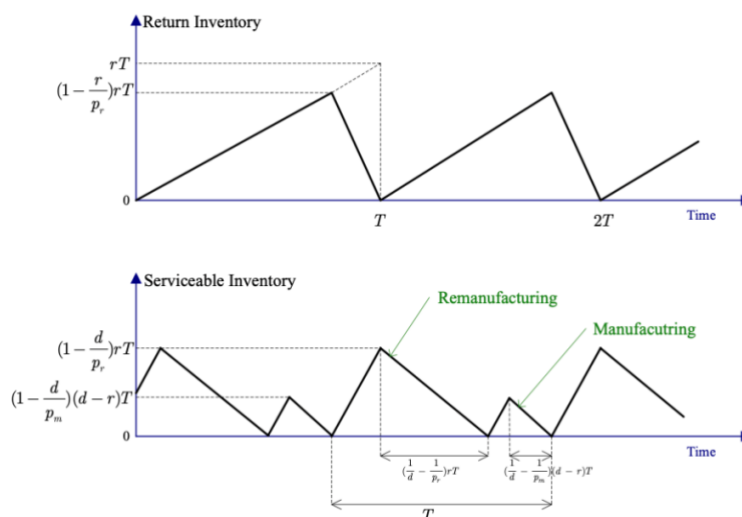


Figura 11: Schema dell'inventario dei resi e dei prodotti in condizioni idonee all'uso. Huiqing Ouyang & Xiangyang Zhu [14]

Vengono fatte ipotesi riguardanti tassi costanti di domanda e restituzione, capacità limitate per la produzione e il ricondizionamento, costi e tempi di setup associati a entrambi i processi.

Le principali notazioni utilizzate nel modello includono i costi di mantenimento per i prodotti restituiti e quelli idonei all'uso, i costi di setup per la rimanifattura e la produzione, i tassi costanti di restituzione e domanda, i tassi di rimanifattura e produzione, i tempi di setup per la rimanifattura e la produzione e il common cycle per entrambi i processi. L'approccio del common cycle opera all'interno di un ciclo temporale, in cui avvengono un lotto di rimanifattura e un lotto di produzione. La rimanifattura inizia all'inizio di un ciclo di produzione e termina quando non ci sono più prodotti restituiti. Inizia quindi la produzione per soddisfare la domanda non coperta dai prodotti restituiti. Questo ciclo si ripete, tenendo conto dei tempi di setup per ciascun processo.

L'obiettivo è minimizzare il costo totale medio per unità di tempo rispettando i vincoli di capacità per i tempi di setup di produzione e rimanifattura. Il modello matematico calcola i costi di mantenimento per i prodotti restituiti, ricondizionati e prodotti in ogni periodo e formula il costo totale per periodo e per unità di tempo.

Gli autori impiegano l'ottimizzazione convessa per trovare il tempo di ciclo ottimale, esprimendo matematicamente i vincoli e la funzione obiettivo. Attraverso esempi numerici, illustrano il comportamento del sistema con diversi tassi di restituzione, costi di mantenimento e costi di setup. Analizzano l'impatto di questi fattori sul ciclo di produzione ottimale e sul costo totale medio per unità di tempo.

Gli algoritmi utilizzati in questo articolo includono:

1. Approccio del common cycle: Questo approccio coordina le attività di ricondizionamento e produzione all'interno di un ciclo temporale 'T' per minimizzare i costi totali per unità di tempo;
2. Ottimizzazione convessa: Gli autori utilizzano formulazioni matematiche e vincoli per trovare il tempo di ciclo ottimale 'T' che minimizza il costo totale medio per unità di tempo, considerando i vincoli di capacità.

Complessivamente, l'articolo si concentra sull'estensione dell'ELSP per gestire la produzione e la rimanifattura sulla stessa linea produttiva, presentando un modello matematico e utilizzando l'approccio del common cycle per ottimizzare le decisioni di pianificazione e minimizzare i costi.

I tre paper discutono l'importanza e le sfide legate all'integrazione del rimanifattura nei processi di produzione. Tutti convergono nell'obiettivo di ridurre i costi complessivi associati alle operazioni di produzione e rimanifattura, ma ognuno presenta un approccio unico per affrontare questa sfida.

Ferretti [12] si concentra sulla gestione efficiente di un sistema di produzione e rimanifattura multi-item, evidenziando l'importanza di rispettare condizioni chiave di fattibilità delle soluzioni, come il controllo della capacità di utilizzo delle linee di produzione e l'evitare interferenze nella pianificazione delle operazioni.

Tang & Teunter [13] esaminano il problema specifico del rimanifattura di parti automobilistiche, utilizzando un modello matematico e un algoritmo basato su Mixed Integer Linear Program (MILP) per ottenere soluzioni precise e valutare l'impatto delle variazioni dei parametri sui costi totali.

Ouyang & Zhu [14] estendono il classico problema di Pianificazione Economica dei Lotti (ELSP) per includere il rimanifattura sulla stessa linea produttiva, concentrandosi

sull'ottimizzazione del ciclo di produzione e rimanifattura per minimizzare i costi totali medi per unità di tempo, utilizzando un approccio di ottimizzazione convessa. Sebbene tutti e tre i testi condividano l'obiettivo comune di ottimizzare il rimanifattura, ognuno presenta approcci e metodologie uniche, adattate ai rispettivi contesti industriali e alle sfide specifiche del problema.

1.6 Ambienti multi-stadio

Ouenniche, Boctor [15] esamina il problema di sequenziamento e pianificazione della produzione in ambienti di flow shop multi-prodotto e multi-stadio, presentando il "metodo a due gruppi" (TG) come soluzione. Il TG method si basa su cicli temporali multipli di un periodo base e assegna prodotti a sottogruppi per ottimizzare la produzione. Viene anche introdotta una variante avanzata dell'euristica di "job-splitting" (RJSH) di El-Najdawi (1994). Attraverso test numerici generati casualmente, l'articolo confronta l'efficacia del TG method con il metodo CC e il RJSH. I risultati indicano che il TG method, soprattutto con il "sub-batch transfer", eccelle nel ridurre i costi totali, in particolare quelli relativi agli inventari. Si sottolinea come il transfer di sub-batch comporti notevoli miglioramenti, specialmente con un numero crescente di sub-batch.

Inoltre, si evidenzia che l'efficacia del TG method varia in base al numero di prodotti e stadi, con un aumento dell'efficienza al crescere dei prodotti e una diminuzione all'aumentare degli stadi.

L'articolo fornisce una valutazione dei tempi di calcolo richiesti da ogni metodo, dimostrando che il TG method richiede più tempo ma genera soluzioni notevolmente migliori rispetto al RJSH.

In conclusione, il TG method si rivela efficace nella risoluzione di complessi problemi di pianificazione della produzione in ambienti flow shop multi-prodotto e multi-stadio, mostrando miglioramenti significativi rispetto ad altre euristiche considerate.

Anche il documento redatto da Hany Osman e Kudret Demirli [16] si focalizza sul complesso problema della sincronizzazione ottimale nella gestione delle catene di approvvigionamento multi-stadio, esaminando l'ottimizzazione della pianificazione delle consegne e del dimensionamento dei lotti. Nella Figura 12 possiamo vedere la supply chain con flussi di informazione e dei materiali.

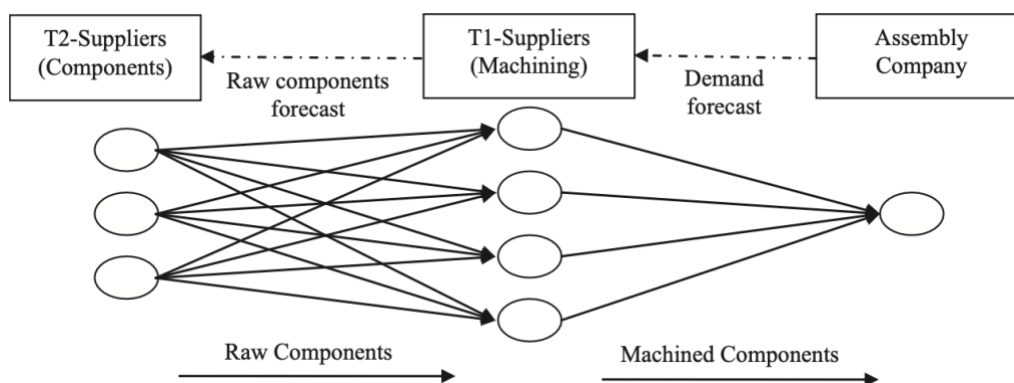


Figura 12: Rete supply chain con flussi di informazione e materiali.
Hany Osman e Kudret Demirli [16]

Si propone una strategia innovativa di rifornimento sincronizzato, la specifica di sequenze di produzione e la determinazione dei tempi di ciclo di rifornimento, il tutto volto a minimizzare i costi.

La novità del lavoro risiede nella formulazione del problema basata sull'assegnazione quadratica, abbracciando politiche di common cycle e l'impiego di moltiplicatori interi per ottenere la desiderata sincronizzazione. Questi approcci sono supportati da modelli non lineari gestiti attraverso un algoritmo ibrido che combina linearizzazione, approssimazione esterna e decomposizione di Benders.

I risultati mostrano che l'adozione della politica basata sui moltiplicatori interi può condurre a una riduzione dei costi rispetto alla strategia del common cycle. Inoltre, gli esperimenti computazionali dimostrano l'efficacia della formulazione proposta e dell'algoritmo di soluzione, raggiungendo soluzioni ottimali per problematiche di ampia portata in tempi ridotti. In primo luogo, questa politica mira a una sincronizzazione parziale delle fasi della catena di approvvigionamento. Ciò significa che le fasi upstream possono avere cicli di ricarica più lunghi, il che a sua volta può ridurre i costi di gestione dell'inventario, dato che i costi di detenzione sono generalmente inferiori in queste fasi. In secondo luogo, l'approccio dei moltiplicatori interi offre una maggiore flessibilità nel determinare i tempi dei cicli di ricarica in ogni fase della catena di approvvigionamento. Ciò consente un adattamento più preciso ai tempi di produzione e di riordino, in risposta alle esigenze specifiche della catena di approvvigionamento e ai cambiamenti nella domanda di mercato. Inoltre, ottimizzare i moltiplicatori interi può portare a un migliore allineamento tra i tempi di produzione e i tempi di consegna, riducendo così i costi di trasporto complessivi lungo la catena di approvvigionamento. Infine, l'approccio dei moltiplicatori interi considera l'ottimizzazione dei costi complessivi della catena di approvvigionamento, tenendo conto di vari fattori come i costi di trasporto, i costi di detenzione dell'inventario e i costi di setup della produzione. Ciò può portare a una migliore allocazione delle risorse e a una riduzione complessiva dei costi. In, l'adozione della politica basata sui moltiplicatori interi può offrire vantaggi significativi in termini di riduzione dei costi e miglioramento dell'efficienza della catena di approvvigionamento rispetto alla strategia del ciclo comune. L'articolo enfatizza l'importanza della sincronizzazione all'interno delle catene di approvvigionamento multi-stadio, evidenziando il ruolo cruciale che essa svolge per una migliore coordinazione tra i diversi attori della catena. Introduce un approccio innovativo basato sull'assegnazione quadratica, proponendo un modello matematico e un algoritmo efficiente per risolvere questioni di pianificazione della produzione e dei lotti in contesti complessi di catene di approvvigionamento multi-stadio.

Il paper presenta un modello innovativo e un algoritmo efficace per affrontare il problema della pianificazione ottimale nelle catene di approvvigionamento, dimostrando l'efficacia dei moltiplicatori interi nel ridurre i costi rispetto alla strategia del common cycle.

Quindi, gli articoli di Ouenniche, Boctor [15] e Hany Osman e Kudret Demirli [16] esplorano il complesso problema della pianificazione della produzione in ambienti multi-stadio, ma utilizzano approcci e strategie diverse per affrontarlo.

I due approcci esaminati convergono nell'obiettivo comune di ottimizzare la produzione per ridurre i costi complessivi e migliorare l'efficienza. Tuttavia, si differenziano nei dettagli dei problemi trattati e nelle metodologie adottate per risolverli.

Per quanto riguarda le similitudini, tutti e due gli studi si concentrano sull'ottimizzazione della produzione attraverso l'uso di modelli matematici per rappresentare il problema e definire le variabili e i vincoli pertinenti. Inoltre, ciascuno di essi impiega algoritmi per risolvere i problemi di ottimizzazione proposti, spesso combinando più tecniche per ottenere soluzioni migliori.

Tuttavia, le differenze principali risiedono nei problemi trattati e nei contesti di applicazione. Mentre Hany Osman e Kudret Demirli[16] si focalizzano sulla sincronizzazione ottimale nelle catene di approvvigionamento multi-stadio, Jamal Ouenniche e Fayez F. Boctor [15] affrontano la pianificazione della produzione in ambienti flow shop multi-prodotto e multi-stadio.

Le metodologie e gli algoritmi utilizzati variano anche tra gli studi. Hany Osman e Kudret Demirli[16] adottano approcci come la linearizzazione, l'approssimazione esterna e la decomposizione di Benders. D'altra parte, Jamal Ouenniche e Fayez F. Boctor[15] introducono il "metodo a due gruppi" per ottimizzare la produzione in ambienti flow shop. Quindi, mentre i tre approcci condividono l'obiettivo generale di ottimizzare la produzione, le differenze nei problemi trattati, nei contesti di applicazione e nelle metodologie utilizzate riflettono le specificità di ciascuno studio e le sfide particolari affrontate.

1.7 Singola macchina

Nella letteratura sono stati affrontati anche studi di pianificazione della produzione di vari prodotti su singola macchina, come i già citati Mohsen Elhafsi & Sherman X. Bai [9], oppure Nils Löhndorf & Stefan Minner [17] e Robert A. Agnew [18].

Nils Löhndorf e Stefan Minner [17] hanno avuto un approccio di risoluzione stocastico al problema; infatti, la loro pubblicazione descrive un problema di ottimizzazione relativo a un sistema di produzione, come detto, a singola macchina che gestisce la produzione di diversi prodotti. Si considera un modello di produzione continuo (SELSP) con N prodotti e una singola macchina che può fabbricare solo un prodotto alla volta. Ogni volta che la macchina passa da uno stato di inattività a uno stato di attività o da un prodotto all'altro, è necessario un setup con un tempo deterministico e un costo associato. Si considera una domanda per ogni prodotto che segue un processo di rinnovo composto, con tempi tra gli arrivi e dimensioni della domanda indipendenti tra i prodotti. La domanda insoddisfatta viene considerata persa con un costo associato, ma è permessa una soddisfazione parziale dell'ordine. Il processo di domanda composta viene modellato come un processo di Poisson, dove gli arrivi seguono un processo di Poisson e le dimensioni della domanda per ogni arrivo seguono una distribuzione geometrica. Questo consente di modellare un processo di domanda stocastico in cui la varianza è diversa dal tasso di domanda.

Successivamente, si descrive il problema come un Semi-Markov Decision Process (SMDP) a costo medio e si definiscono le variabili di stato, le decisioni e i costi associati al sistema di produzione. Il testo prosegue con la descrizione dei costi associati a stati e decisioni, definendo le probabilità di transizione e il tempo medio di permanenza in un certo stato. Inizialmente, si propone un approccio chiamato "Relative Value Iteration", dove si stabilisce un costo medio arbitrario per uno stato iniziale e si esprimono i costi degli altri stati in relazione a questo valore. Questo metodo permette di approssimare iterativamente i costi

medi ottimali e quelli relativi agli stati, aggiornando i valori in base ai costi diretti ottimali e alle transizioni tra gli stati. Tuttavia, a causa della complessità di questo metodo, si suggerisce l'utilizzo dell'"Approximate Value Iteration". Questo approccio simula un percorso di decisioni e aggiorna la politica di controllo in tempo reale. Si utilizza una ricompensa scontata come sostituto del costo medio, mentre gli algoritmi di gradiente stocastico vengono impiegati per approssimare la funzione valore. Un'alternativa è la "Direct policy search", che mira a trovare direttamente i parametri ottimali per politiche di controllo più semplici. Questo metodo si basa sull'algoritmo CMA-ES e cerca di ottimizzare le politiche di controllo per minimizzare i costi medi. Nell'analizzare diverse politiche di controllo, si esaminano quattro approcci principali:

1. Fixed-cycle policy: Si basa su una sequenza prestabilita di produzione per diversi prodotti, cercando di mantenere una distribuzione equa basata su frequenze e livelli di riordino;
2. Fixed-cycle policy with preemption: Estende la politica a ciclo fisso consentendo la modifica della sequenza di produzione in base alle condizioni attuali, come interruzioni della produzione per rispondere a livelli critici di inventario;
3. Base-stock policy: Attiva la produzione in base ai livelli di inventario correnti e a un punto di riordino, cercando di evitare situazioni di esaurimento delle scorte;
4. Can-order base-stock policy: Estensione della politica a stock di base che risponde ai livelli critici di inventario durante la produzione, consentendo di interrompere la produzione per risolvere situazioni di esaurimento delle scorte.

L'obiettivo principale di queste strategie è minimizzare i costi medi previsti durante il processo di produzione, adattando le politiche di controllo in base alle condizioni attuali e alle esigenze di produzione.

Quindi, anche l'algoritmo sviluppato da Robert A. Agnew fornisce una soluzione approssimativamente ottimale per la pianificazione ripetitiva di uno o più prodotti su una singola struttura o macchina. Questo metodo, descritto in [18], è stato progettato per minimizzare il costo totale per periodo, considerando esclusivamente i costi di setup e di gestione dell'inventario legati a tutti i prodotti coinvolti nella pianificazione.

L'approccio di Agnew si basa sull'enumerazione esplicita di diverse combinazioni di tempi ciclici di base e relativi moltiplicatori, con l'obiettivo di ottenere un programma ripetitivo ottimale che tenga conto dei vincoli di capacità della struttura e dell'inventario. Questa metodologia mira a bilanciare l'efficienza operativa con la riduzione dei costi, fornendo una soluzione approssimativamente ottimale e fungendo come punto di riferimento per la creazione di programmi di produzione in contesti reali.

L'output generato da questo algoritmo consiste in un vettore di tempi ciclici ottimali per la pianificazione dei prodotti, insieme ai relativi costi totali associati. Il metodo proposto da Agnew risulta particolarmente utile per generare programmi di produzione efficienti e competitivi su una singola struttura, offrendo un approccio pratico e applicabile nel contesto industriale.

I tre approcci esaminati, Mohsen Elhafsi & Sherman X. Bai [9], Nils Löhdorf & Stefan Minner [17] e Robert A. Agnew [18], condividono l'obiettivo comune di ottimizzare la pianificazione della produzione su una singola macchina, ma presentano differenze sostanziali nei dettagli delle metodologie utilizzate e negli approcci specifici alla risoluzione del problema. Tutti e tre gli approcci si concentrano sulla riduzione dei costi totali associati

alla produzione, al setup, al mantenimento dell'inventario e al backorder, utilizzando processi di ottimizzazione come la programmazione lineare o mista intera. Tuttavia, le differenze emergono nei metodi specifici adottati per affrontare il problema. Mentre l'approccio di Nils Löhndorf & Stefan Minner [17] si basa su modelli stocastici per gestire la domanda e i tempi di produzione variabili, Mohsen Elhafsi & Sherman X. Bai [9] adottano modelli deterministici con politiche di produzione specifiche. Inoltre, le metodologie di ottimizzazione variano, con Mohsen Elhafsi & Sherman X. Bai [9] che impiegano algoritmi di ricerca locale, Robert A. Agnew [18] che utilizza l'enumerazione esplicita di combinazioni, e Nils Löhndorf & Stefan Minner [17] che si basano su algoritmi di programmazione lineare o mista intera.

Inoltre, gli obiettivi specifici di ottimizzazione possono differire tra gli approcci. Mentre tutti mirano a minimizzare i costi totali, Mohsen Elhafsi & Sherman X. Bai [9] si concentrano sull'ottimizzazione dell'orario di produzione, sulla gestione dei tassi di produzione o Robert A. Agnew [18] che si concentra sulla pianificazione ripetitiva dei prodotti su una singola macchina.

In aggiunta, la complessità computazionale e i tempi di esecuzione possono variare a seconda della metodologia di ottimizzazione utilizzata, come l'approccio di Nils Löhndorf & Stefan Minner [17] che è più computazionalmente intensivo rispetto a quello adottato dagli altri due, questo perché utilizza un modello stocastico basato su un Semi-Markov Decision Process (SMDP) a costo medio, il che implica la gestione di un elevato numero di variabili di stato e decisioni, oltre alla necessità di calcolare le probabilità di transizione e i tempi medi di permanenza in ogni stato.

In più, l'uso di metodologie come l'"Relative Value Iteration" e l'"Approximate Value Iteration" richiede iterazioni multiple per convergere a soluzioni ottimali, aggiornando costantemente i valori dei costi medi e delle politiche di controllo. Questo processo iterativo può richiedere risorse computazionali significative, specialmente quando si gestiscono sistemi complessi con un gran numero di prodotti e scenari di domanda.

1.8 ELSP con configurazioni dipendenti dalla sequenza

Il lavoro di M. Heydari, B. Karimi & S.A. Torabi [19] esamina un problema cruciale per la gestione efficiente delle linee di produzione: l'ELSP con configurazioni dipendenti dalla sequenza, possiamo notare nella figura 13, infatti, la sequenza di setup della macchina j per produrre la sequenza di prodotti A-B-C.

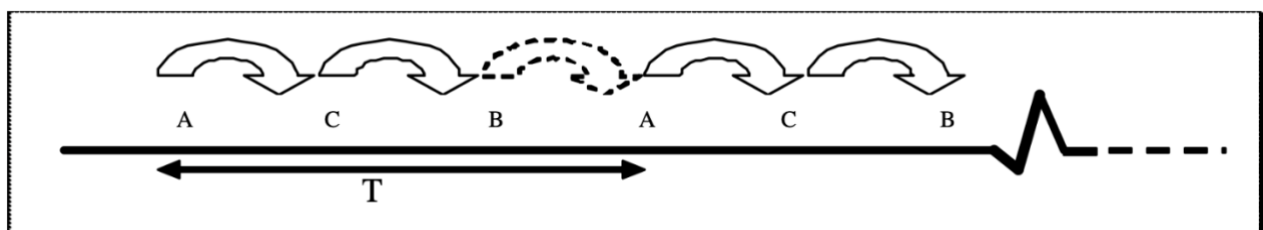


Figura 13: Sequenza di setup della macchina j per produrre la sequenza A-B-C
M. Heydari, B. Karimi & S.A. Torabi [19]

Questo problema si presenta quando una macchina è impiegata per soddisfare la domanda deterministica e costante di diversi prodotti su un orizzonte temporale infinito. Gli autori esplorano diverse metodologie per risolvere questo problema complesso. Propongono modelli matematici, inclusi programmi lineari e non lineari, per ottimizzare la pianificazione della produzione. Inoltre, presentano diverse euristiche di ricerca, come la Neighborhood Search (NEH) e l'approccio basato sui costi di mantenimento (HCB), per determinare sequenze di produzione efficienti. Tra gli approcci proposti, viene menzionato un metodo di ottimizzazione che sfrutta un procedimento di ricerca ottimale (OEM) per valutare le sequenze di produzione generate e determinare la soluzione ottimale o approssimata. Questo metodo utilizza modelli lineari e incrementa gradualmente un parametro per ottimizzare i costi totali. Complessivamente, gli autori esplorano e confrontano diversi approcci, combinando soluzioni matematiche formali con euristiche intuitive, e fa uso di metodi di ottimizzazione per determinare la sequenza di produzione più efficiente in contesti di linee di produzione complesse. Viene proposto un modello matematico per affrontare il problema sia in un orizzonte temporale finito che infinito. Successivamente, viene presentato un metodo euristico per trovare soluzioni approssimate al problema e, infine, viene introdotto un Algoritmo Genetico (GA) per migliorare ulteriormente la soluzione euristica. Il GA utilizza una rappresentazione dei cromosomi in cui ciascun cromosoma contiene sotto-cromosomi con una sequenza di prodotti in diversi stadi. Questa rappresentazione consente di avere un'unica stringa associata a ogni soluzione e tutte le soluzioni generate sono fattibili. Si sfrutta il GA a causa del grande numero di punti o cromosomi fattibili nel problema. L'approccio proposto include anche la generazione della popolazione iniziale utilizzando euristiche e la definizione di una funzione di fitness. Vengono presentati anche gli operatori di crossover e mutazione specifici per il problema, insieme a dettagli sull'operatore di sostituzione della popolazione e i criteri di terminazione del GA. Viene condotta un'analisi delle prestazioni utilizzando problemi generati casualmente, confrontando i risultati ottenuti dal GA con una soluzione euristica e un lower bound ottenuto da un risolutore ottimo. I risultati indicano che l'euristica può ottenere soluzioni ragionevoli in tempi brevi, mentre il GA offre prestazioni promettenti, sebbene richieda più tempo computazionale. Infine, viene sottolineato che cambiando le assunzioni potrebbero emergere nuovi problemi, lasciando spazio per ulteriori ricerche.

1.9 Cyclic Economic Lot-Sizing and Scheduling Problem

L'articolo di Hennes J.C.[21], il quale presenta il problema di pianificazione produttiva noto come CELSP (Cyclic Economic Lot-Sizing and Scheduling Problem) in un contesto di job-shop, dove la produzione avviene in più fasi. Si parte dall'assunzione di tassi costanti di domanda per tutti i prodotti finali, formulando una politica periodica di produzione che soddisfi la domanda al costo più basso, considerando costi di set-up e costi di inventario. Il problema si scompone in una politica di lot-sizing e di scheduling su un common cycle. Si mostra che la soluzione del CELSP può essere implementata e adattata per limitate variazioni della domanda. Si propone una risoluzione decomposta del problema, dove la pianificazione normalizzata su un periodo comune può essere risolta indipendentemente dalla durata di questo periodo. La durata ottimale del common cycle può essere calcolata

tramite una formula esplicita simile a quella dell'Economic Order Quantity (EOQ). Si può poi ottenere una soluzione ottimale per la pianificazione su questo periodo comune. Per la risoluzione, si utilizza un algoritmo che inizialmente risolve il problema di scheduling normalizzato, ottiene la durata ottimale del common cycle e quindi calcola le tempistiche di inizio della produzione ottimale per ciascun lotto. Questo approccio di decomposizione è innovativo e consente di ottenere una pianificazione più coerente tra lot-sizing e scheduling, seppur sensibile a variazioni dei dati di input. La soluzione del problema di scheduling normalizzato può essere adattata a variazioni della domanda, mantenendo la periodicità delle attività di produzione e semplificando l'adattamento alle nuove condizioni.

1.10 Considerazioni finali

I testi analizzati presentano innumerevoli similitudini e differenze, la ricerca sull'Economic Lot Scheduling Problem (ELSP) abbraccia una vasta gamma di approcci e obiettivi, evidenziando diversità e innovazione nel campo della gestione della produzione e della catena di approvvigionamento. Gli autori affrontano questo problema da diverse prospettive, introducendo metodologie e focus.

Alcuni studi pongono l'accento sull'aspetto finanziario, come il valore temporale del denaro nell'ELSP, introducendo modelli che considerano pagamenti flessibili nel tempo (Mokhlesian, Fatemi Ghomi, Jolai [3]). Altri si concentrano sui processi operativi, come la produzione ciclica, il rilavoro imperfetto e gli scarti in contesti di processo imperfetto (Gong, Lin, Line, Ma [1]; Ben-Dayal, Ha [2]).

Ci sono autori che integrano la rimanufacturing nei sistemi di produzione multi-item ELSP, gestendo attentamente la capacità produttiva per evitare interferenze nella pianificazione (Ferretti [12]). Al contrario, altri autori si focalizzano sui processi di produzione all'interno di contesti imperfetti, analizzando dettagliatamente elementi come la produzione ciclica e il rilavoro imperfetto (Gong, Lin, Line, Ma [1]).

L'approccio metodologico differisce considerevolmente: alcuni autori adottano approcci stocastici (Löhndorf & Minner [17]), mentre altri utilizzano modelli matematici, euristiche o algoritmi genetici per risolvere l'ELSP (Heydari, Karimi, Torabi [19]). Inoltre, vi sono lavori che esplorano la gestione delle catene di approvvigionamento (Kia, Ghodsypour, Davoudpour [6]; Torabi, Fatemi Ghomi, Karimi [5]), mentre altri si concentrano sulla pianificazione della produzione in ambienti multi-stadio (Ou Tang, Teunter [13]; Ouenniche, Boctor [15]).

In aggiunta, vi sono ricerche che si concentrano sull'impatto dei processi di produzione non perfetti e sulla gestione della qualità della produzione (Ben-Dayal, Ha [2]).

In sintesi, questi diversi approcci riflettono la vasta gamma di prospettive presenti nella ricerca sull'ELSP, ciascuno contribuendo con un focus specifico e innovativo per affrontare aspetti distinti della pianificazione della produzione e della gestione della catena di approvvigionamento.

2. Basic Period

Il concetto di "basic period" (periodo di base) si riferisce a un intervallo di tempo specifico che costituisce l'unità fondamentale o il ciclo di base all'interno del quale vengono pianificate e organizzate le attività produttive. Nel contesto della pianificazione della produzione, il periodo di base è essenzialmente un intervallo temporale ricorrente che può essere considerato come l'unità di misura per organizzare la sequenza delle attività di produzione. Questo periodo può essere un'ora, un giorno, una settimana, un mese o qualsiasi altra unità di tempo che sia considerata la più adatta per l'ambiente produttivo in questione.

La definizione del periodo di base può variare in base alle esigenze specifiche dell'azienda e al tipo di produzione. Ad esempio, in un'azienda che produce beni di consumo, il periodo di base potrebbe essere una settimana, poiché le pianificazioni si adattano meglio a intervalli settimanali per soddisfare la domanda del mercato. In altri contesti, potrebbe essere più vantaggioso avere un periodo di base più breve o più lungo, in base alla complessità del processo produttivo e ai tempi di consegna richiesti.

La pianificazione della produzione utilizzando il concetto di basic period aiuta a organizzare il flusso di lavoro, la sequenza delle attività, l'allocazione delle risorse e la gestione della capacità produttiva. Ciò consente di ottimizzare l'uso delle risorse disponibili, ridurre i tempi morti e garantire che i prodotti siano prodotti in modo efficiente ed economicamente vantaggioso.

Nella progettazione di modelli di ottimizzazione o algoritmi per la programmazione della produzione, il periodo di base può essere considerato come un parametro regolabile o una variabile di decisione che influisce sulle tempistiche della produzione, consentendo di massimizzare l'efficienza e minimizzare i costi produttivi. Inoltre, in alcuni contesti, il concetto di basic period può essere associato alla definizione dei lotti di produzione o alla frequenza di riorganizzazione della produzione.

In sintesi, il concetto di basic period è essenziale nella programmazione della produzione in quanto fornisce un'unità di misura temporale fondamentale per pianificare, organizzare e ottimizzare le attività produttive all'interno di un ambiente produttivo.

2.1 Programmazione mista non lineare

L'approccio presentato nel documento di Bret J. Wagner, Darwin J. Davis e Hemant V. Kher [22], si propone un'estensione del modello ELSP (Economic Lot Scheduling Problem) al fine di gestire variazioni lineari nei tassi di domanda all'interno di un orizzonte temporale specifico. Questo ampliamento offre uno strumento per coordinare le attività di pianificazione della produzione e del marketing all'interno di un'azienda. Il modello consente di valutare l'impatto delle fluttuazioni della domanda sui costi di produzione e sul servizio clienti. L'obiettivo è risolvere il modello mediante un pacchetto di programmazione non lineare standard (MINOS) e dimostrarne l'utilizzo attraverso esempi basati su dati di produzione effettivi, illustrando come possa supportare la pianificazione coordinata della

produzione e del marketing. L'articolo inizia trattando della pianificazione della produzione in strutture che producono uno o più prodotti, evidenziando le limitazioni dell'ELSP iniziale dovute all'assunzione di domanda e tasso di produzione costanti, oltre a un orizzonte temporale infinito. Successivamente, si esplorano considerazioni cruciali relative all'ELSP, compreso l'utilizzo di schemi ciclici (Figura 14: Esempio di schedulazione ciclica) nella pianificazione della produzione e le implicazioni di tali schemi come periodi di inattività e regole Zero-Switch (ZS) per i livelli di inventario.

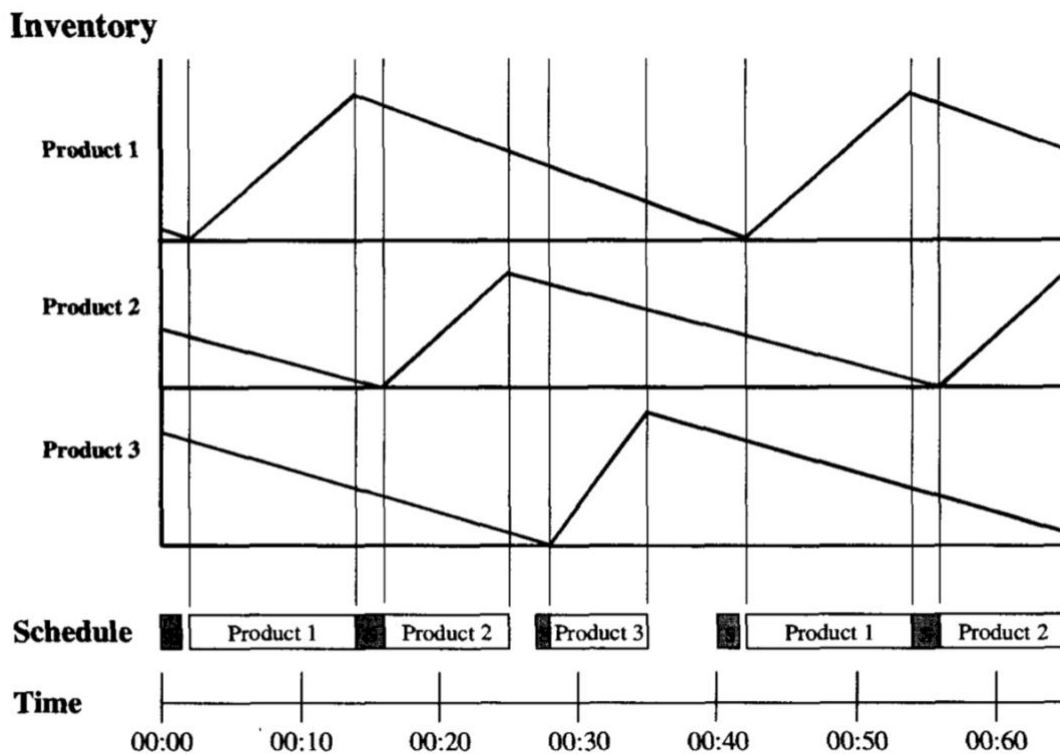


Figura 14: Esempio di schedulazione ciclica.
Bret J. Wagner, Darwin J. Davis e Hemant V. Kher [22]

La ricerca si concentra sull'ampliamento del modello ELSP per adattarsi a variazioni nei tassi di domanda nel tempo, particolarmente rilevanti in scenari di cambiamenti nella vita dei prodotti o strategici nel portfolio prodotti aziendale. Nella fase di modellizzazione, si assume una sequenza di produzione nota e si affronta l'impatto delle variazioni della domanda nel tempo attraverso un periodo di transizione tra l'orizzonte di pianificazione e il momento in cui gli stock devono rispettare determinati vincoli. Questo approccio permette di gestire la produzione oltre l'orizzonte pianificato, evitando limiti artificiali sulla quantità prodotta. Si discute l'importanza di valutare diverse sequenze di produzione per massimizzare il profitto nell'arco temporale prestabilito, sottolineando come il modello consenta di identificare la sequenza ottimale per ottenere il massimo guadagno. Il contributo principale dell'articolo è l'espansione del modello ELSP per adattarsi ai cambiamenti nei tassi di domanda, fornendo una base solida per la pianificazione della produzione e del marketing che consideri scenari realistici di cambiamenti nella domanda dei prodotti nel tempo. L'articolo descrive dettagliatamente un modello matematico per la pianificazione della produzione in un contesto con tassi di crescita/declino lineari della domanda dei prodotti. Questo modello coinvolge numerosi parametri e variabili legati alla

produzione, alla domanda di mercato, ai costi di stoccaggio e altri fattori cruciali per la gestione dell'inventario e la pianificazione della produzione. L'obiettivo apparente del modello proposto è massimizzare il profitto durante l'arco temporale della pianificazione, utilizzando equazioni per calcolare livelli di inventario, costi di stoccaggio, tempi di produzione e altri parametri correlati al fine di massimizzare il rendimento. Il testo fornisce un'analisi approfondita sull'utilità del modello proposto per la pianificazione della produzione in un'azienda manifatturiera. Si mette in luce come la pianificazione della produzione senza slack temporale possa essere problematica nell'ambito dell'aumento della produzione senza l'aggiunta di inventario extra. Si evidenzia come l'uso pianificato degli stock di sicurezza possa offrire flessibilità al programma di produzione consentendo l'espansione dei cicli produttivi per specifici prodotti. L'articolo esemplifica l'applicazione pratica del modello proposto, evidenziando l'uso del modello per valutare l'aumento della produzione di specifici prodotti basato su dati effettivi. Si valutano varie opzioni di utilizzo degli stock di sicurezza e si esamina l'impatto sui profitti nel breve e lungo termine. Si sottolinea la complessità di coordinare la pianificazione tra reparti di marketing e produzione senza un modello di pianificazione che fornisca un feedback dettagliato sui livelli di inventario e sugli stock di sicurezza durante il processo decisionale.

Il documento di S. Dousthaghi & R. Tavakkoli-Moghaddam [23] affronta la sfida dell'Economic Lot Delivery Scheduling Problem (ELDSP) in un contesto di fabbrica flessibile con macchine parallele non correlate, considerando anche la sfumatura della vita utile dei prodotti. Questo problema strategico integra la determinazione dei lotti di produzione, la pianificazione e il sequenziamento delle attività produttive tramite l'uso dell'approccio del basic period (BP). Si propone un modello di programmazione mista intera non lineare (MINLP) per affrontare questa complessa sfida, presentando varianti del modello per adattarlo alla sfumatura della vita utile. Date le difficoltà computazionali del modello principale per problemi su larga scala, il documento introduce un efficiente metodo euristico per la sua soluzione. Si basa su contributi pregressi nell'ambito dell'ELSP e dell'ELDSP, ampliando questi concetti a scenari di produzione più complessi. L'opera evidenzia una carenza nella letteratura riguardante l'assenza di approcci specifici per affrontare l'ELDSP in fabbriche flessibili con macchine parallele non correlate e considerando la sfumatura della vita utile. Per colmare questa lacuna, il documento presenta un nuovo modello MINLP e un metodo di soluzione efficiente. Successivamente, il testo si articola fornendo una descrizione dettagliata del modello proposto, delineando le formulazioni dei problemi sfumati e le euristiche sviluppate, oltre a presentare i risultati sperimentali ottenuti applicando il modello a casi numerici. In sintesi, viene fornito un approccio euristico e un modello MINLP per affrontare il problema dell'ELDSP in contesti di fabbrica flessibile con macchine parallele non correlate e considerando la vita utile dei prodotti.

Entrambi gli articoli presentati si basano su modelli di programmazione non lineare per affrontare l'ELSP, ovvero il problema della pianificazione economica della produzione. Tuttavia, mentre entrambi si concentrano sull'ottimizzazione delle decisioni di produzione, presentano differenze significative nel contesto e negli obiettivi dell'ottimizzazione. In particolare, l'articolo di Bret J. Wagner, Darwin J. Davis e Hemant V. Kher [22] si propone di estendere il modello ELSP per gestire variazioni nei tassi di domanda nel tempo e coordinare la produzione con il marketing. Questo articolo cerca di ottimizzare il profitto

nell'arco temporale prestabilito, considerando scenari realistici di cambiamenti nella domanda dei prodotti nel tempo. Utilizzando un pacchetto di programmazione non lineare standard (MINOS), si cerca di valutare l'efficacia del modello attraverso esempi basati su dati di produzione effettivi.

D'altra parte, il paper di S. Dousthaghi & R. Tavakkoli-Moghaddam [23] si concentra sulla pianificazione economica della produzione e della consegna (ELSDP) in contesti di fabbrica flessibile con macchine parallele non correlate. Questo lavoro introduce un modello di programmazione mista intera non lineare (MINLP) per affrontare la complessità della pianificazione in tali contesti, considerando anche la sfumatura della vita utile dei prodotti. Si cerca di ottimizzare non solo il profitto, ma anche la produzione e la consegna in modo efficiente, tenendo conto di fattori come la capacità delle macchine e i vincoli temporali.

2.2 Delivery Problem

Il problema dell'Economic Lot Delivery Scheduling Problem, oltre che da S. Dousthaghi et al. [23], viene affrontato anche da S. A. Torabi & M. Jenabi [24], il testo, infatti, affronta il problema della pianificazione economica della produzione e della consegna (ELDSP) in catene di fornitura. L'ELDSP coinvolge un fornitore che produce vari articoli in una catena di produzione flessibile e li consegna direttamente a un'azienda di assemblaggio.

Si discute della pianificazione su periodi di base, la cui lunghezza determina un'ottima sequenza di produzione e assegnazione dei prodotti ai macchinari, minimizzando costi di trasporto, setup e mantenimento dell'inventario. Si introduce il concetto di "lot streaming" per ridurre i tempi di produzione e i costi di mantenimento dell'inventario.

Il testo formula un problema complesso con varie variabili e vincoli, cercando di minimizzare i costi totali, considerando le richieste di produzione, i tempi di setup, i costi di trasporto e di mantenimento dell'inventario.

Vengono introdotti modelli matematici e vengono proposti due algoritmi genetici ibridi efficienti per risolvere il problema. Si forniscono dettagli sulle variabili coinvolte, sui vincoli e sull'obiettivo del problema, che mira a ottimizzare i costi complessivi di produzione e consegna, tenendo conto di molte variabili come la lunghezza del piano, i multipli di tempo di produzione dei prodotti, la capacità dei macchinari, e altro ancora.

Inoltre, si suggeriscono alcuni passi per l'implementazione pratica dei risultati e si prevedono ulteriori ricerche e sviluppi nell'ambito del problema trattato. Vengono implementati algoritmi genetici ibridi per la risoluzione di problemi complessi combinatori legati a pianificazioni di produzione in linee flessibili. Questi algoritmi lavorano con una rappresentazione cromosomica che rappresenta i multipli temporali per i prodotti in una sequenza di bit binari.

Le varianti proposte degli HGA, chiamate PTHGA e NPTHGA, si differenziano principalmente nell'implementazione della politica di periodi di base, una limitata a multipli di potenze di due e l'altra senza tale restrizione. Ogni soluzione è caratterizzata da un set di multipli e dal valore di un periodo di base, e l'obiettivo è generare programmi di produzione fattibili che minimizzino i costi.

Il processo di valutazione delle soluzioni avviene attraverso una funzione di fitness che valuta la bontà delle soluzioni proposte. Viene utilizzata una procedura di selezione a

torneo, crossover a due punti e mutazione a scambio per generare nuove soluzioni. Inoltre, è implementato un miglioramento locale attraverso la ricerca nel vicinato per ottimizzare ulteriormente le soluzioni.

Una verifica di fattibilità è svolta su ogni soluzione generata. Se una soluzione è infeasible, viene eseguita una procedura di riparazione per rendere la soluzione fattibile.

Esperimenti computazionali sono stati condotti su differenti dimensioni di problemi per valutare l'efficacia degli algoritmi proposti. I parametri degli algoritmi sono stati regolati empiricamente e i risultati indicano che NPTHGA produce soluzioni di miglior qualità rispetto a PTHGA, sebbene richieda più tempo computazionale per ottenere le soluzioni finali. Si evince, infatti, dalle Tabelle 5.1 e 5.2, come la qualità della soluzione degli algoritmi proposti è aumentata quando il numero di sub-batches (in Tabella 5.1 pari a 2 e in Tabella 5.2 pari a 3) e il valore del parametro G (il parametro G rappresenta il numero di gruppi in cui gli articoli vengono divisi) sono aumentati.

Problem size ($n \times m$)	G=3				G=4			
	The average performance ratio of NPTHGA (%)	The average performance ratio of PTHGA (%)	Average CPU time for NPTHGA (s)	Average CPU time for PTHGA (s)	The average performance ratio of NPTHGA (%)	The average performance ratio of PTHGA (%)	Average CPU time for NPTHGA (s)	Average CPU time for PTHGA (s)
4×2	4.41	4.61	20.13	12.89	3.74	3.89	15.61	8.67
4×3	8.22	8.26	47.02	7.4	7.42	8.17	44.95	7.89
5×2	5.88	8.04	27.09	8.93	7.18	7.86	25.54	9.92
5×3	8.75	10.21	57.28	20.38	9.45	10.85	65.56	17.44
5×5	13.76	15	69.27	38.19	10.95	12.81	70.36	44.52
5×10	18.05	18.71	87.17	69.61	17.63	18.31	90.96	71.61
10×2	4.32	4.86	246.56	225.34	6.54	6.9	238.48	231.72
10×5	9.2	10.47	1,076.14	626.47	8.97	11.44	1,488.2	635.79
10×10	19.78	20.65	3,101.77	2,176.77	19.78	19.91	3,162.5	1,902.63

Tabella 5.1: Risultati del problema testato.
S. A. Torabi & M. Jenabi [24]

Problem size ($n \times m$)	G=3				G=4			
	The average performance ratio of NPTHGA (%)	The average performance ratio of PTHGA (%)	Average CPU time for NPTHGA (s)	Average CPU time for PTHGA (s)	The average performance ratio of NPTHGA (%)	The average performance ratio of PTHGA (%)	Average CPU time for NPTHGA (s)	Average CPU time for PTHGA (s)
4×2	4.73	5.15	40.56	7.67	4.25	5.11	25.22	7.05
4×3	8.48	8.54	49	9.2	7.62	8.36	45.12	7.97
5×2	8.49	9.26	22.96	8.27	6.63	8.84	15.74	7.3
5×3	12.16	12.25	57.29	26.06	9.65	11.67	50.17	15.63
5×5	9.21	10.89	65.15	39.08	9.21	11.5	72.36	40.55
5×10	18.69	18.85	83.63	65.69	18.03	18.15	88.83	65.05
10×2	5.3	5.8	244.73	225.16	3.93	4.04	298.44	233.16
10×5	7.3	9.84	1,203.27	691.73	6.97	9.44	1,362.24	614.61
10×10	19.28	19.82	3,040.87	2,196.4	19.09	19.28	3,225.9	2,342.83

Tabella 5.2: Risultati del problema testato.
S. A. Torabi & M. Jenabi [24]

Quindi, nel paper di S. Dousthaghi & R. Tavakkoli-Moghaddam [23], l'ELDSP è affrontato in contesto di fabbriche flessibili con macchine parallele non correlate, considerando anche la sfumatura della vita utile dei prodotti. Viene proposto un modello di programmazione

mista intera non lineare (MINLP) per affrontare la complessità della pianificazione in tali contesti, con l'introduzione di un efficiente metodo euristico per la sua soluzione. Il testo evidenzia la carenza di approcci specifici per affrontare l'ELDSP in contesti di fabbrica flessibile e propone un nuovo modello euristicamente efficiente, secondo gli autori, per colmare questa lacuna. D'altra parte, nel documento di S. A. Torabi & M. Jenabi [24], l'ELDSP è trattato in contesto di catene di fornitura, dove un fornitore produce diversi articoli e li consegna direttamente a un'azienda di assemblaggio. Si discute l'utilizzo della scheduling policy del Basic Period per ottimizzare la sequenza di produzione e assegnazione dei prodotti ai macchinari, con l'obiettivo di minimizzare costi di trasporto, setup e mantenimento dell'inventario. Il testo propone l'introduzione del concetto di lot streaming per ridurre i tempi di produzione e i costi di mantenimento dell'inventario. Vengono presentati modelli matematici e due algoritmi genetici ibridi (PTHGA e NPTHGA) per risolvere il problema, con una valutazione sperimentale dell'efficacia degli algoritmi proposti.

2.3 Programmazione dinamica

Sven Axster [25] analizza la complessità della pianificazione della produzione multiprodotto, dove si cercano strategie per minimizzare costi di set-up e di mantenimento ma a differenza degli studi precedentemente citati, l'autore utilizza diversi modelli di programmazione dinamica, cercando di migliorare i limiti superiori e ottenere soluzioni fattibili. Si esplora l'uso di vincoli specifici e algoritmi per ottimizzare la capacità di produzione, considerando il carico dell'impianto e le richieste di ciascun prodotto. Si evidenzia la sfida nell'affrontare simultaneamente la pianificazione dei lotti e la programmazione della produzione, con la necessità di bilanciare i costi di mantenimento e i requisiti di produzione. L'articolo propone approcci alternativi per migliorare i limiti superiori e ottenere soluzioni fattibili, concentrandosi sull'aggregazione dei dati e su vincoli specifici per ampliare il set di strategie conosciute come fattibili. Attraverso l'applicazione di modelli di programmazione dinamica, si cerca di ottimizzare le politiche di produzione, considerando la capacità dell'impianto e i requisiti di ciascun prodotto. L'obiettivo principale è minimizzare i costi complessivi di produzione, tenendo conto dei vincoli di capacità, dei costi di set-up e di mantenimento per ciascun prodotto. I testi di Sven Axster [25], Bret J. Wagner, Darwin J. Davis e Hemant V. Kher [22] e S. Dousthaghi & R. Tavakkoli-Moghaddam [23] esaminano la complessità della pianificazione della produzione in contesti industriali, cercando di trovare soluzioni ottimali per ottimizzare i costi e massimizzare i profitti. Tutti e tre i paper propongono modelli matematici per affrontare questa sfida, considerando variabili come i tassi di domanda, i costi di setup e di mantenimento dell'inventario, e vincoli di capacità. Tuttavia, ci sono differenze significative nel modo in cui affrontano questo problema. Nel documento di Bret J. Wagner, Darwin J. Davis e Hemant V. Kher [22], viene presentata un'estensione del modello ELSP utilizzando la programmazione non lineare per gestire variazioni lineari nei tassi di domanda. D'altra parte, Sven Axster [25] si avvicina alla pianificazione della produzione multiprodotto utilizzando modelli di programmazione dinamica, cercando di migliorare i limiti superiori e ottenere soluzioni fattibili.

Il documento di S. Dousthaghi & R. Tavakkoli-Moghaddam[23] si concentra su scenari più complessi, come fabbriche flessibili con macchine parallele non correlate e la sfumatura della vita utile dei prodotti. Qui, viene proposto un modello MINLP per affrontare il problema dell'ELDSP, ampliando il concetto di pianificazione della produzione.

2.4 Singola macchina

L'articolo di Luciano Salvietti e Neale R. Smith [26], invece, propone un'estensione dell'ELSP, incorporando l'ottimizzazione dei prezzi per massimizzare i profitti, proponendo come approcci la programmazione lineare e algoritmi genetici.

L'ELSP trova le sue radici nel modello di produzione economica per un singolo articolo (EPQ) e mira a pianificare la produzione di più articoli su una singola macchina, mirando a ridurre i costi di inventario e di setup. Diversi approcci risolutivi all'ELSP sono stati proposti nel corso degli anni, che hanno dimostrato la NP-difficoltà dell'ELSP.

Il contributo principale dell'articolo è la presentazione di un nuovo modello e un metodo di soluzione per il PELSP, basato sull'approccio del periodo di base. Questo nuovo metodo si propone di estendere le metodologie precedentemente adottate. Il modello introduce parametri come la lunghezza del periodo di base, i costi di setup, i costi di produzione e i tempi di setup per ciascun prodotto. Vengono definiti anche parametri per la domanda di ogni articolo, considerata come una funzione esponenziale del prezzo, al fine di massimizzare i profitti.

Nel complesso, l'articolo offre un'analisi dettagliata dei metodi proposti per risolvere l'ELSP e l'ottimizzazione congiunta dei prezzi e dell'inventario, presentando una nuova metodologia che è stata testata con successo su vari casi di studio. Le tecniche proposte dimostrano di produrre risultati molto prossimi all'ottimo, anche se sensibili ai parametri di iterazione e tolleranza.

L'articolo propone aree di ricerca future, suggerendo ulteriori indagini su scenari con domande stocastiche e formulazioni basate sulla teoria dei giochi per esaminare l'impatto della concorrenza sui prezzi e sulla domanda. Si suggerisce anche l'esplorazione della soluzione nel contesto della forma estesa del periodo base, utile nell'ELSP standard.

La gestione di più articoli su singola macchina viene studiata anche da P. Kelle, G. Clendenen & P. Dardeau [27] che introducono un'estensione al problema della pianificazione economica dei lotti per una linea di produzione multiprodotto gestita da una singola macchina, considerando richieste casuali. L'obiettivo è trovare la lunghezza dei cicli di produzione che minimizzi la somma dei costi di setup e di mantenimento dell'inventario per unità di tempo, soddisfacendo la domanda per ciascun prodotto al livello di servizio richiesto. Si parte dall'estensione del modello di inventario a rifornimento finito per un singolo prodotto al caso di domanda casuale, per poi proporre una procedura euristica che utilizza questa estensione per determinare i cicli di produzione per il caso multiprodotto. I risultati computazionali e le comparazioni con altri modelli sono esaminati.

Si propone un'euristica basata su Doll e Whybark per determinare i cicli di produzione ottimali, considerando richieste casuali. Si affrontano anche le sfide e le limitazioni applicative, discutendo la possibilità di reagire ai cambiamenti nella domanda attraverso la modifica delle pianificazioni di produzione.

La procedura euristica per il caso multiprodotto si basa sulla determinazione dei cicli di produzione ottimali per ciascun prodotto, considerando la minimizzazione dei costi di setup e mantenimento, e soddisfacendo il vincolo di servizio. L'algoritmo proposto utilizza una serie di passaggi iterativi per determinare la lunghezza ottimale del ciclo di produzione, considerando sia la domanda costante che quella casuale. La validità degli algoritmi proposti è supportata da confronti con soluzioni ottime e con altreuristiche presenti in letteratura.

L'articolo propone un metodo innovativo che considera i livelli di sicurezza e la loro dipendenza dalla lunghezza dei cicli di produzione. L'euristica sviluppata si basa su modelli noti per il singolo prodotto e viene estesa al caso multiprodotto con richieste casuali, offrendo risultati promettenti, soprattutto nell'industria chimica. Tuttavia, sono necessari ulteriori studi e raccolta dati per valutare appieno l'efficacia di questa procedura euristica nelle applicazioni industriali.

Fayez Fouad Boctor [28], affronta il problema della pianificazione economica della produzione anch'essi su una singola macchina con più prodotti e richieste statiche nel lungo periodo. Vengono presentati tre modelli esistenti che affrontano questo problema, ognuno con le proprie limitazioni computazionali e assunzioni non realistiche.

Le principali critiche ai modelli precedenti includono:

- La limitata fattibilità computazionale.
- Le assunzioni irrealistiche, come la consegna continua dei prodotti, il costo di mantenimento del materiale grezzo trascurato e la mancanza di gestione esplicita della manutenzione.

Successivamente, viene proposta una nuova formulazione del problema, basata su assunzioni più realistiche, al fine di migliorare l'efficienza e la fattibilità computazionale del modello. Questa nuova formulazione introduce:

- Variabili decisionali per determinare la sequenza di produzione e la durata della produzione.
- Un'equazione obiettivo che minimizza il costo totale considerando i costi di configurazione e i costi di mantenimento dell'inventario.

Il modello proposto, denominato "Modello I", è un programma lineare misto intero che presenta una migliore fattibilità computazionale rispetto ai modelli precedenti. Si dimostra inoltre che, con una sequenza di produzione data, il modello si riduce a un programma lineare continuo con una matrice di vincoli totalmente unimodulare.

Infine, viene proposto un algoritmo di enumerazione implicita per ottenere la soluzione ottimale del Modello I. L'algoritmo usa una lista di soluzioni parziali e valuta le possibilità di produzione ottimale in base alla sequenza dei prodotti.

Il documento, quindi, propone un nuovo approccio al problema della pianificazione economica della produzione su singola macchina, introducendo assunzioni più realistiche e presentando un modello matematico più efficiente. Inoltre, propone un algoritmo di enumerazione implicita, in figura 15 si può vedere il flowchart dell'algoritmo di enumerazione, per risolvere il modello proposto.

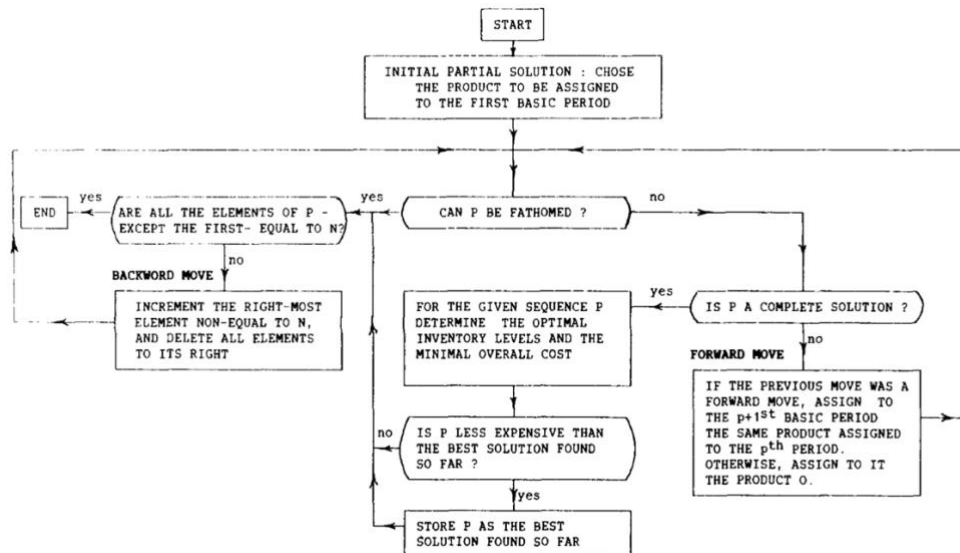


Figura 15: Flowchart dell'algoritmo di enumerazione.
Fayez Fouad Boctor [28]

Tutti e tre gli articoli, di Luciano Salvietti e Neale R. Smith [26], Kelle, G. Clendenen & P. Dardeau [27] e Fayez Fouad Boctor [28], discutono la pianificazione della produzione su una singola macchina, ma ognuno adotta un approccio unico nel trattare il problema. Essi mirano a ottimizzare la produzione di più articoli, tenendo conto di vari fattori come i costi di setup e di mantenimento dell'inventario. Pur condividendo questo obiettivo comune, ciascun articolo si distingue per il suo focus specifico e per i metodi proposti per risolvere il problema.

Ad esempio, un Luciano Salvietti e Neale R. Smith [26] propongono l'ottimizzazione dei prezzi per massimizzare i profitti, Fayez Fouad Boctor [28], invece, presenta un algoritmo di enumerazione implicita. Queste differenze negli approcci risolutivi portano ad analisi e soluzioni diverse per il problema.

Inoltre, gli articoli considerano diversi scenari di domanda e fanno ipotesi diverse per semplificare il problema. P. Kelle, G. Clendenen & P. Dardeau [27] trattano la domanda come casuale, inoltre, ciascun articolo propone diverse assunzioni per migliorare l'efficienza computazionale del modello e rendere le soluzioni più realistiche.

2.5 Algoritmi genetici ed euristici

Molti studi nel tentativo di risoluzione dell'ELSP si sono affidati all'utilizzo di algoritmi genetici, oltre ai già citati S. A. Torabi & M. Jenabi [24] e Luciano Salvietti e Neale R. Smith [26], anche Hing Kai Chan, Sai Ho Chung & Tak Ming Chan [29] e Dean C. Chatfield [30] hanno impiegato questo tipo di algoritmi.

Dean C. Chatfield [30] si concentra sulla risoluzione del problema attraverso un metodo chiamato "genetic lot scheduling" (GLS). Questo metodo utilizza, appunto, un algoritmo genetico per generare programmi di produzione ciclici ottimali senza ricorrere a una ricerca enumerativa.

Il documento propone una formulazione del problema utilizzando un approccio ciclico fondamentale, definendo una soluzione tramite un ciclo fondamentale, un insieme di

moltiplicatori, e un insieme di periodi di inizio di produzione. La rappresentazione della soluzione GLS utilizza una struttura a cromosoma che codifica i parametri di una soluzione ELSP, consentendo a una popolazione di cromosomi di sottostare a un processo evolutivo simulato per trovare la soluzione migliore.

Il documento descrive la determinazione dell'assegnazione di periodi agli elementi, le regole di sequenziamento all'interno di un periodo e i test di fattibilità. In particolare, utilizza regole di caricamento che consentono sia a moltiplicatori di potenza di due che a moltiplicatori non di potenza di due di essere assegnati a periodi specifici, garantendo un'allocazione efficiente della macchina.

L'efficacia del metodo GLS viene testata su benchmark problemi noti come il problema di Bomberger, dimostrando risultati molto promettenti e spesso sovrapponendosi o superando soluzioni ottenute con altri metodi.

Il metodo Genetic Lot Scheduling (GLS) offre una prospettiva innovativa e vantaggiosa nell'affrontare l'Economic Lot Scheduling Problem. Esso contribuisce in diverse aree cruciali della pianificazione della produzione, presentando benefici significativi che influenzano la formulazione del problema, la sua fattibilità, l'approccio di ricerca e la qualità delle soluzioni proposte.

Nel contesto della formulazione del problema, GLS introduce una nuova dimensione. Estende i parametri di soluzione per includere l'assegnazione diretta degli articoli a specifici periodi di produzione. Ciò consente una definizione più precisa e completa della pianificazione della produzione, superando le limitazioni delle metodologie precedenti e migliorando la comprensione della capacità di produzione in termini di carico articolo-periodo.

L'aspetto della fattibilità assume una notevole semplificazione attraverso GLS. La sua formulazione esplicita semplifica i test di fattibilità, rendendoli diretti e facili da eseguire. Le regole di sequenziamento integrano la possibilità di evitare problemi di sequenza, senza limitare l'uso dei moltiplicatori ad esponenziali di due. Questo approccio non solo semplifica i test di fattibilità, ma li incorpora come parte integrante della procedura di ricerca.

Una caratteristica fondamentale di GLS è l'utilizzo di un approccio basato su algoritmi genetici. Questa metodologia dimostra che gli algoritmi genetici, da soli, possono produrre soluzioni eccellenti per l'ELSP senza la necessità di ibridazione con altre tecniche. La capacità di esplorare efficacemente lo spazio delle soluzioni, considerando un vasto insieme di combinazioni di parametri, rende questo metodo più robusto e adattabile a una vasta gamma di problemi di pianificazione della produzione.

Tuttavia, vi sono alcune considerazioni da tenere presenti. La definizione dei periodi di avvio, sebbene arricchisca la flessibilità della pianificazione, aumenta allo stesso tempo lo spazio di ricerca, complicando il processo complessivo. Inoltre, l'intenzionale inserimento di tempo di inattività nella pianificazione, sebbene affronti le questioni di fattibilità legate alla sequenza, potrebbe impattare sull'efficienza complessiva della produzione.

In sintesi, GLS si presenta come un metodo innovativo e valido per risolvere l'ELSP, seppur con alcune limitazioni. Possibili miglioramenti futuri potrebbero includere lo sviluppo di nuove strategie di sequenziamento per ridurre il tempo di inattività e la considerazione di problemi ELSP più realistici che riflettano le dinamiche e le limitazioni tipiche dei contesti produttivi reali.

Hing Kai Chan, Sai Ho Chung & Tak Ming Chan [29] trattano l'ELSP sempre con la policy del BP, inoltre anche il loro articolo propone un approccio basato su algoritmi genetici per determinare sia la sequenza di produzione che la pianificazione temporale, cercando di minimizzare i costi totali considerando la richiesta di prodotti, i costi di configurazione e i costi di mantenimento dell'inventario.

Per affrontare il problema, l'approccio proposto divide il problema in una parte principale (master problem) e un sotto-problema (sub-problem). Il primo risolve l'allocazione ottimale degli elementi comuni alle diverse strutture, mentre il secondo determina le frequenze di produzione e la pianificazione dettagliata per ciascuna struttura. Questo secondo aspetto è risolto attraverso un algoritmo genetico modificato che combina un approccio basato su un limite inferiore con il GA.

L'articolo presenta risultati numerici per dimostrare l'efficacia del metodo proposto, evidenziando come la ri-allocazione degli elementi comuni in strutture specifiche possa ridurre significativamente i costi di produzione complessivi.

In sintesi, l'approccio proposto utilizza algoritmi genetici per ottimizzare l'allocazione di produzione di diversi prodotti su diverse strutture, cercando di minimizzare i costi totali e dimostrando la sua efficacia attraverso esperimenti numerici.

Gli algoritmi genetici utilizzati nei quattro test presentano alcune differenze nel modo in cui sono implementati e applicati al problema specifico trattato.

Nel caso di Dean C. Chatfield [30], l'algoritmo genetico è utilizzato per generare programmi di produzione ciclici ottimali nel contesto dell'Economic Lot Scheduling Problem (ELSP).

Per Hing Kai Chan, Sai Ho Chung & Tak Ming Chan [29], gli algoritmi genetici sono impiegati per determinare la sequenza di produzione e la pianificazione temporale. Qui, vengono implementati algoritmi genetici modificati che combinano un approccio basato su un limite inferiore con il GA per risolvere il problema in due fasi distinte: risolvere l'allocazione ottimale degli elementi comuni e determinare le frequenze di produzione.

S. A. Torabi & M. Jenabi[24] utilizzano gli algoritmi genetici per ottimizzare l'allocazione di produzione di diversi prodotti su diverse strutture nell'Economic Lot Delivery Scheduling Problem (ELDSP). I loro algoritmi genetici ibridi, chiamati PTHGA e NPTHGA, differiscono principalmente nell'implementazione della politica di periodi di base, con una limitata a multipli di potenze di due e l'altra senza tale restrizione.

Luciano Salvietti e Neale R. Smith [26] incorporano gli algoritmi genetici nell'ottimizzazione dei prezzi per massimizzare i profitti nell'ELSP esteso. Qui, gli algoritmi genetici lavorano con una rappresentazione cromosomica che rappresenta i multipli temporali per i prodotti in una sequenza di bit binari, valutando la bontà delle soluzioni proposte attraverso una funzione di fitness e applicando procedure di selezione, crossover e mutazione.

L'articolo di Hark Hwang & Dug Hee Moon [31] presentano un modello integrato che affronta l'Economic Lot Scheduling Problem (ELSP), focalizzandosi sulla gestione simultanea della produzione di due prodotti distinti in un unico impianto e sul rifornimento delle materie prime, alcune delle quali possono deteriorarsi nel tempo. Tale approccio si distingue per l'integrazione della pianificazione della produzione dei prodotti con la gestione delle materie prime, considerando un contesto in cui i costi di setup e di gestione degli inventari sono fondamentali per il processo decisionale.

Il problema della pianificazione della produzione si concentra sull'approccio del Basic Period dell'ELSP, cercando di minimizzare i costi variabili annuali totali, compresi i costi di

setup e di mantenimento dell'inventario, tenendo conto dei diversi tassi di domanda, produzione e deterioramento delle materie prime. L'obiettivo principale è quello di ottimizzare la programmazione della produzione dei prodotti e l'approvvigionamento delle materie prime, al fine di minimizzare i costi totali annuali dell'impianto.

Per risolvere questo problema complesso, a differenza degli articoli precedentemente proposti, il paper propone un algoritmo euristico iterativo diviso in due fasi: una fase di ricerca della soluzione a costo totale minimo e una fase di verifica della fattibilità. La prima fase si concentra sulla ricerca di una soluzione iniziale migliore, mentre la seconda fase verifica la fattibilità della soluzione trovata e genera alternative se necessario.

Il contributo principale di questo lavoro è l'integrazione della pianificazione della produzione dei prodotti con la gestione dell'inventario delle materie prime deteriorabili, offrendo una metodologia euristica che si avvicina all'ottimalità nella risoluzione dell'ELSP in contesti di produzione complessi.

L'algoritmo euristico proposto nell'articolo di Hark Hwang & Dug Hee Moon [31] si differenzia dagli algoritmi genetici proposti da Dean C. Chatfield[30], Hing Kai Chan, Sai Ho Chung & Tak Ming Chan[29], S. A. Torabi & M. Jenabi[24] e Luciano Salvietti & Neale R. Smith[26], principalmente nella sua struttura e nella modalità di ricerca delle soluzioni ottimali.

In primo luogo, gli algoritmi genetici operano utilizzando una popolazione di soluzioni candidate, ciascuna rappresentata come un cromosoma, che viene manipolato attraverso operatori genetici come crossover e mutazione per esplorare lo spazio delle soluzioni e trovare quelle ottimali. Questi algoritmi sono basati sull'evoluzione naturale e utilizzano concetti come selezione naturale e crossover per generare nuove soluzioni.

D'altra parte, l'algoritmo euristico proposto in questo articolo si basa su un approccio iterativo diviso in due fasi. Nella prima fase, si cerca di trovare una soluzione iniziale migliore, utilizzando tecniche euristiche mirate. Questo potrebbe coinvolgere una ricerca locale o strategie specifiche per generare soluzioni promettenti. Nella seconda fase, la fattibilità della soluzione iniziale viene verificata e, se necessario, vengono esplorate alternative.

Un'altra differenza significativa è la natura più deterministica e diretta degli algoritmi euristici rispetto alla natura più esplorativa degli algoritmi genetici. Gli algoritmi euristici tendono a seguire un approccio più diretto nella ricerca delle soluzioni ottimali, mentre gli algoritmi genetici esplorano più ampiamente lo spazio delle soluzioni.

2.6 Rilavorazione dei resi

Lo studio di Yu-Jen Chang, Shih-Chieh Chen & Po-Yen Hsu [32] si concentra sul Problema di Pianificazione Economica dei Lotti con Resi (ELSPR), coinvolgendo la produzione di prodotti funzionanti e la ri-lavorazione dei prodotti resi. Si propone un modello matematico basato sull'approccio del periodo base per risolvere questo problema, insieme a un algoritmo di ricerca per trovare i moltiplicatori ciclici di ciascun prodotto. L'obiettivo è minimizzare il costo totale medio, considerando due euristiche per trovare la sequenza di produzione ottimale e la lunghezza temporale del periodo base. Un esempio numerico viene usato per dimostrare l'efficacia dell'approccio proposto.

L'ELSPR si concentra sulla programmazione ciclica di prodotti su un'unica struttura, coinvolgendo la produzione e la ri-lavorazione dei prodotti resi. Contrariamente all'ELSP convenzionale, in questo caso le sequenze di produzione e ri-lavorazione possono influire notevolmente sui costi aggiuntivi di mantenimento degli inventari.

L'articolo esplora un approccio basato sul periodo base, con ciascun prodotto che può avere cicli multipli di un periodo di tempo fondamentale chiamato 'periodo base'. Propone un algoritmo di ricerca per trovare i moltiplicatori ciclici ottimali per i prodotti e due euristiche per determinare la sequenza di produzione ottimale e la lunghezza del periodo base.

Il modello matematico presentato per l'ELSPR si basa su parametri e variabili decisionali, con la formulazione di un obiettivo diviso in costi ideali e costi aggiuntivi. L'articolo propone una procedura iterativa per determinare il massimo moltiplicatore per ciascun prodotto e la lunghezza del periodo base B sotto la politica del power-of-two.

L'algoritmo di ricerca proposto comprende due euristiche: una euristica di pianificazione semplice e una ricerca per bisezione, per determinare i moltiplicatori ciclici ottimali, la sequenza di produzione ottimale e il periodo base ottimale.

Attraverso un esempio numerico con cinque prodotti, l'efficacia dell'algoritmo di ricerca viene dimostrata, ottenendo una soluzione ottimale con un costo inferiore rispetto all'approccio del Common Cycle (CC). La ricerca evidenzia un notevole miglioramento rispetto ai risultati ottenuti con l'approccio del CC, questo perché il problema presentato si presta ad essere modellato più da un approccio BP.

Lo studio, quindi, si focalizza sull'ELSPR con ri-lavorazione dei prodotti, proponendo un modello matematico e un algoritmo di ricerca per trovare soluzioni ottimali con costi minimi. La ricerca mostra l'efficacia dell'approccio proposto nell'ottimizzare la programmazione dei lotti con resi.

Lo studio condotto quindi da Yu-Jen Chang, Shih-Chieh Chen & Po-Yen Hsu si concentra sull'analisi e la risoluzione del Problema di Pianificazione Economica dei Lotti con Resi (ELSPR). A differenza dell'ELSP convenzionale, l'ELSPR richiede una programmazione ciclica dei prodotti su una singola struttura, tenendo conto della produzione e della ri-lavorazione dei prodotti resi, il che può influire notevolmente sui costi aggiuntivi di mantenimento degli inventari.

Per affrontare questo problema, gli autori propongono un modello matematico basato sull'approccio del periodo base, che considera ciascun prodotto con cicli multipli di un periodo di tempo fondamentale.

In conclusione, lo studio si concentra sull'ottimizzazione della programmazione dei lotti con resi attraverso l'uso di un modello matematico e di un algoritmo di ricerca, dimostrando l'efficacia dell'approccio proposto nell'ottimizzare i costi di produzione e ri-lavorazione dei prodotti.

2.7 Considerazioni finali

All'interno dei testi presentati, possiamo osservare una ricca varietà di approcci e modelli che vengono impiegati per risolvere il complesso problema della pianificazione economica della produzione (ELSP). Questi articoli si concentrano su diverse sfaccettature della pianificazione, affrontando sfide come variazioni nella domanda nel tempo, produzione su macchine parallele non correlate e gestione dei resi.

Ad esempio, nel lavoro di Wagner, Davis e Kher [22], si propone di estendere il modello ELSP per adattarsi a cambiamenti nei tassi di domanda nel tempo e coordinare la produzione con le strategie di marketing. Loro utilizzano la programmazione non lineare per valutare l'efficacia del modello, concentrandosi sull'ottimizzazione del profitto nel lungo periodo attraverso scenari realistici di domanda.

D'altra parte, Dousthaghi e Tavakkoli-Moghaddam [23] si concentrano sulla pianificazione economica della produzione e della consegna in contesti di fabbrica flessibile con macchine parallele non correlate. Qui, propongono un modello MINLP per gestire la complessità della pianificazione, tenendo conto della vita utile dei prodotti e delle capacità delle macchine. Torabi e Jenabi [24], invece, affrontano l'ELDSP nelle catene di fornitura, utilizzando gli algoritmi genetici per ottimizzare l'allocazione di produzione e minimizzare i costi di trasporto, setup e mantenimento dell'inventario. La loro ricerca si concentra sull'ottimizzazione della sequenza di produzione e sull'assegnazione dei prodotti ai macchinari.

Altri autori come Salvietti e Smith [26], Boctor [28], e Hing Kai Chan, Sai Ho Chung & Tak Ming Chan [29], tra gli altri, offrono ulteriori approcci e modelli per affrontare specifiche sfide nella pianificazione della produzione, come l'ottimizzazione dei prezzi, la gestione delle materie prime.

Concludendo, Yu-Jen Chang, Shih-Chieh Chen & Po-Yen Hsu [32] si concentrano sul Problema di Pianificazione Economica dei Lotti con Resi (ELSPR), che richiede una programmazione ciclica dei prodotti su una singola struttura, considerando sia la produzione che la ri-lavorazione dei prodotti resi. Questo aspetto è fondamentale, poiché le sequenze di produzione e ri-lavorazione possono influire significativamente sui costi aggiuntivi di mantenimento degli inventari.

Per affrontare questa sfida, gli autori propongono un modello matematico basato sull'approccio del periodo base, in cui ogni prodotto può avere cicli multipli di un periodo di tempo fondamentale. L'obiettivo è minimizzare il costo totale medio, tenendo conto di due euristiche per trovare la sequenza di produzione ottimale e la lunghezza temporale del periodo base.

In definitiva, questi lavori dimostrano l'importanza di un approccio diversificato e innovativo nella risoluzione dei problemi di pianificazione della produzione, con l'obiettivo di migliorare l'efficienza operativa e massimizzare i profitti.

3. Extended Basic Period – Power of Two

L'Extended Basic Period (EBP) costituisce un concetto di rilevanza fondamentale nell'ambito della pianificazione della produzione industriale, estendendo la nozione di Basic Period (BP) e fornendo una maggiore flessibilità nella gestione delle attività produttive.

Il Basic Period rappresenta un intervallo temporale di riferimento utilizzato per la pianificazione e l'organizzazione delle attività di produzione. Analogamente a un orizzonte temporale di base, stabilisce un quadro temporale per le attività operative. Tuttavia, l'EBP si configura come una proiezione temporale estesa e adattabile, consentendo un maggiore adattamento alle mutevoli esigenze di produzione.

Questo concetto si rivela particolarmente cruciale in ambienti produttivi soggetti a fluttuazioni di domanda, come nel caso di settori con stagionalità marcate. L'EBP si adatta in modo flessibile a queste fluttuazioni, permettendo di estendere il periodo operativo in caso di picchi di domanda e di restringerlo in periodi di minore richiesta.

L'EBP, quindi, rappresenta un elemento dinamico e adattabile che si modifica in base alle mutevoli esigenze produttive. Questa caratteristica è di notevole utilità in contesti industriali soggetti a variazioni impreviste, consentendo una gestione agile delle risorse e una migliore ottimizzazione della capacità produttiva. Si tratta di uno strumento strategico per adattarsi in modo rapido ed efficiente a cambiamenti repentini nelle condizioni di produzione e domanda, favorendo una pianificazione più reattiva e ottimizzata dei processi produttivi. Spesso utilizzata assieme alla Extended Basic Period, la Power-of-Two policy è un approccio utilizzato nel campo della gestione della produzione e della logistica che si concentra su come pianificare e organizzare i tempi di produzione per gli articoli prodotti. Si differenzia dalla politica ciclica comune perché si basa su un concetto diverso di tempistiche per la produzione.

In sostanza, la PoT suggerisce di pianificare i tempi di produzione in modo che siano multipli interi di una specifica potenza di due. Questo significa che invece di avere cicli di produzione regolari e fissi, come nel caso della politica common cycle, la PoT permette cicli di produzione variabili che seguono una sequenza di potenze di due (2, 4, 8, 16, ecc.).

L'obiettivo principale di questa politica è ottimizzare i tempi di produzione in modo da minimizzare i costi complessivi associati alla produzione, alla gestione dell'inventario e al trasporto. Questo approccio offre una maggiore flessibilità rispetto alle politiche di pianificazione più rigide, consentendo di adattare meglio la produzione alle esigenze specifiche e di sfruttare al meglio le risorse disponibili.

Tuttavia, l'implementazione della PoT può comportare alcune sfide in termini di complessità, in quanto determinare i cicli di produzione ottimali basati su potenze di due può essere un problema molto complesso da risolvere. Una di queste sfide è la complessità computazionale. Poiché il problema coinvolge la ricerca di cicli di produzione ottimali, considerando vari vincoli come la capacità delle risorse e i costi di setup, può richiedere notevoli risorse computazionali per trovare una soluzione soddisfacente.

Inoltre, l'aggiunta del vincolo delle potenze di due può complicare ulteriormente la formulazione del problema, aumentando il numero di variabili decisionali e di vincoli da gestire. Questo rende la ricerca di una soluzione ottimale una sfida ancora maggiore. Anche se la PoT è teoricamente vantaggiosa nel ridurre i cambiamenti di setup e nell'ottimizzare l'utilizzo delle risorse, non sempre garantisce la soluzione più efficiente in termini di costi totali. Altri fattori, come la capacità delle risorse o le preferenze del cliente, potrebbero non essere adeguatamente considerati.

Nel contesto della pianificazione dinamica, dove le condizioni di produzione e la domanda possono variare, l'utilizzo della PoT potrebbe richiedere aggiustamenti frequenti nella programmazione delle attività, aumentando ulteriormente la complessità della gestione della produzione.

Nonostante ciò, quando applicata correttamente, questa politica può portare a una migliore gestione della produzione e degli inventari, riducendo i costi operativi e migliorando l'efficienza complessiva dei processi logistici.

Quindi, la politica delle potenze di due è un approccio flessibile e orientato all'ottimizzazione dei tempi di produzione che mira a migliorare l'efficienza complessiva dei processi produttivi e logistici, riducendo i costi e adattandosi meglio alle esigenze specifiche di produzione

3.1 Algoritmi genetici ed euristici

L'Extended Basic Period, che favorisce maggiore flessibilità rispetto al Basic Period precedentemente citato, viene utilizzato anch'esso largamente nella letteratura in combinazione, come detto, con un'altra policy, quella della PoT, come Hainan Sun, Huei-Chuen Huang & Wikrom Jaruphongsa [33], i quali nel loro articolo, nel tentativo di risolvere il problema dell'ELSP, hanno introdotto, appunto, il concetto di politica dell'Extended Basic Period (EBP) e del Power of Two (PoT). Questa politica stabilisce che il tempo di ciclo di un prodotto deve essere un multiplo intero del periodo di base e che questo multiplo deve essere una potenza di due.

Per formulare e risolvere il problema, vengono definiti parametri, variabili decisionali e ausiliarie. Successivamente, viene proposto un modello di programmazione non lineare per determinare la sequenza di produzione ottimale e le dimensioni dei lotti che minimizzano il costo totale.

Lo studio confronta l'efficienza e la qualità degli algoritmi SS (Small-Step Search) ed EH (Efficient Heuristic) con l'algoritmo euristico di Haessler (HH). Viene inoltre effettuato un confronto con l'algoritmo genetico (GLS) di Chatfield [30] considerato il metodo più efficace per il trattamento dell'ELSP, soprattutto in condizioni di elevata utilizzazione della macchina. Le comparazioni sono state effettuate su diversi insiemi di esempi generati casualmente, ognuno comprendente dieci casi. I parametri dei prodotti sono stati generati da una distribuzione uniforme con valori predefiniti. Gli esperimenti hanno coinvolto varie policy con differenti gradi di complessità nell'ELSP. I risultati evidenziano che l'algoritmo EH, nonostante operi in un contesto più restrittivo rispetto all'HH, trova soluzioni fattibili migliori e presenta una notevole velocità, superando di gran lunga l'algoritmo SS. In particolare, l'algoritmo EH è riuscito a risolvere la maggior parte dei problemi generati in

modo casuale, ottenendo soluzioni identiche o paragonabili all' algoritmo SS per una percentuale molto elevata dei casi. Successivamente, è stato analizzato il comportamento dell' algoritmo EH su problemi ad alta utilizzazione, confrontando i risultati ottenuti con quelli del GLS di Chatfield. Nonostante l'EH operi in un contesto più restrittivo rispetto al GLS, è stato in grado di ottenere soluzioni paragonabili o addirittura migliori in alcune situazioni, dimostrando un'elevata efficienza anche in condizioni di alta complessità. In conclusione, l'articolo propone un algoritmo di ricerca parametrica euristica e fornisce spunti per ulteriori ricerche volte a migliorare l'efficienza dell'algoritmo o ad estenderlo a contesti con politiche differenti nel trattamento dell'ELSP.

Anche M. Fatih Tasgetiren, Onder Bulut & M. Murat Fadioglu [34] come Hainan Sun, Huei-Chuen Huang & Wikrom Jaruphongsa si sono approcciati al problema con l'EBP e il PoT, ma utilizzando algoritmi di risoluzione differenti. L'obiettivo principale del loro studio consiste nel determinare la sequenza di produzione ottimale e i tempi di ciclo (o le dimensioni dei lotti) per minimizzare il costo totale medio, comprendente i costi di configurazione e di mantenimento degli inventari.

Il modello utilizza una serie di parametri per ogni articolo, quali costi di configurazione, tempi di configurazione, tassi di domanda e tassi di produzione, insieme a fattori relativi al costo di mantenimento dell'inventario. Si introduce inoltre la densità di produzione e un fattore di costo di mantenimento per l'articolo.

Le variabili decisionali includono la lunghezza di un periodo di base, i moltiplicatori PoT per ciascun articolo, e i periodi base in cui viene prodotto ciascun articolo.

L'algoritmo proposto, denominato Discrete Artificial Bee Colony (DABC) è una modifica dell'algoritmo di ottimizzazione dell'Artificial Bee Colony (ABC).

Questo algoritmo mira a cercare soluzioni discrete per il problema descritto, sfruttando la ricerca intelligente ispirata al comportamento degli sciami delle api. Si distinguono tre gruppi di api artificiali: api impiegate, osservatrici ed esploratrici.

L'algoritmo DABC inizia con una popolazione di soluzioni generate casualmente, in seguito vengono seguiti passaggi iterativi per sfruttare e valutare queste soluzioni fino al soddisfacimento di un criterio di terminazione. L'approccio di ricerca include la manipolazione delle soluzioni, rappresentate come vettori reali d-dimensionali, e l'effettuazione di ricerche locali per migliorare la qualità delle soluzioni.

La rappresentazione della soluzione include i moltiplicatori PoT e le posizioni di produzione per ciascun articolo. La fattibilità delle soluzioni è determinata attraverso l'applicazione di opportune disuguaglianze derivate dai vincoli del problema.

Per gestire le soluzioni inammissibili, vengono utilizzati metodi di gestione dei vincoli come Superiority of Feasible Solutions (SF) e ϵ -Constraint (EC), che permettono di valutare la superiorità delle soluzioni rispetto a vincoli e funzione obiettivo.

L'algoritmo DABC impiega una fase di ricerca locale denominata Variable Neighborhood Search (VNS) che sfrutta tre diverse strutture di vicinato per esplorare soluzioni migliori intorno alle soluzioni correnti.

I risultati computazionali mostrano che l'algoritmo DABC è in grado di trovare soluzioni ottimali EBP-PoT per diversi livelli di utilizzo. Nei problemi di basso utilizzo, il DABC ha ottenuto soluzioni ottimali come altri algoritmi della letteratura. Nei problemi ad alto utilizzo, il DABC ha superato altri approcci nonostante l'adozione di politiche più restrittive. Gli stessi autori hanno provato a risolvere il problema dell'ELSP in un altro studio [35] con

un algoritmo genetico nell'approccio dell'Extended Basic Period (EBP) e con la politica del Power-of-Two (PoT).

Il modello matematico è stato formulato utilizzando una serie di parametri e variabili decisionali, dove gli individui della popolazione sono rappresentati da multipli PoT e posizioni di produzione separate. L'algoritmo genetico è stato progettato per mantenere sia soluzioni ammissibili che non ammissibili nella popolazione attraverso l'uso di metodi sofisticati di gestione dei vincoli.

Inoltre, è stato implementato un algoritmo Variable Neighborhood Search (VNS) per intensificare la ricerca sui minimi locali e migliorare ulteriormente la qualità della soluzione. I risultati sperimentali hanno dimostrato che l'algoritmo genetico proposto è in grado di trovare soluzioni ottimali EBP-PoT sia per problemi a bassa che ad alta utilizzazione, presenti nella letteratura.

L'algoritmo genetico sviluppato utilizza una rappresentazione multi-cromosomica per affrontare il problema complesso della programmazione economica dei lotti sotto l'approccio EBP-PoT, mantenendo sia soluzioni fattibili che non fattibili. I risultati sperimentali dimostrano l'efficacia di questo algoritmo nell'ottenere soluzioni ottimali per una vasta gamma di problemi di pianificazione della produzione.

Il paper di Zhao Peixin & Qi Guijie [37] esplora l'utilizzo di un algoritmo partheno-genetic per risolvere il Problema di Pianificazione Economica dei Lotti (ELSP) sotto la politica del Power-of-Two (PoT). Date le complessità di questo problema, si propone un algoritmo genetico migliorato dotato di operatori partheno-genetics per risolvere il modello. Gli esempi numerici dimostrano che questo algoritmo partheno-genetic migliorato è un approccio efficiente per risolvere l'ELSP sotto la politica PoT. La principale differenza tra i due algoritmi risiede nel modo in cui gestiscono la diversità e l'esplorazione dello spazio delle soluzioni durante il processo di ottimizzazione.

Un algoritmo genetico normale utilizza una singola popolazione di individui (soluzioni candidato) che evolvono nel corso delle generazioni attraverso operazioni di selezione, crossover e mutazione. Tuttavia, poiché questo processo può portare a una convergenza prematura verso soluzioni localmente ottimali, soprattutto in problemi complessi come l'ELSP, può essere difficile esplorare in modo efficace l'intero spazio delle soluzioni.

D'altra parte, un algoritmo pantheon-genetico opera con più popolazioni di individui, chiamate "pantheon". Queste popolazioni coesistono e si evolvono in parallelo, ciascuna con il proprio insieme di soluzioni candidate. Durante il processo di evoluzione, gli individui migliori di ciascuna popolazione vengono periodicamente scambiati tra i pantheon, permettendo una più ampia esplorazione dello spazio delle soluzioni e una migliore preservazione della diversità genetica.

L'algoritmo genetico proposto è stato adattato con operatori partheno-genetics, riprendendo l'idea di selezione e riproduzione biologica per esplorare lo spazio delle soluzioni complesse. Gli operatori partheno-genetics, come Swap, Reverse e Insert, sono stati introdotti per generare nuove soluzioni dai cromosomi esistenti. Questo algoritmo è stato implementato per risolvere il problema ELSP sotto la politica PoT, dimostrando la sua efficacia nel fornire soluzioni efficienti.

Attraverso esempi numerici, si è applicato l'algoritmo partheno-genetic migliorato a un problema classico di Bomberger. I risultati hanno mostrato soluzioni ottimali vicine ai limiti inferiori precedentemente conosciuti, confermando l'efficacia dell'algoritmo proposto.

Il documento ha esplorato l'utilizzo di un algoritmo genetico migliorato con operatori partheno-genetics per risolvere l'ELSP sotto la politica PoT. Gli esempi numerici hanno dimostrato l'efficienza di questo approccio nella ricerca di soluzioni ottimali per problemi complessi di pianificazione economica.

3.2 Deterioramento degli articoli

Gli autori Ming-Jong Yao & Jian-Xiong Huang [36] hanno proposto un modello matematico, nel loro articolo, che considera il costo di deterioramento degli articoli, definisce la frequenza di produzione di ciascun articolo e utilizza l'approccio EBP per minimizzare i costi totali. Include vincoli di capacità, politiche di produzione e tassi di deterioramento esponenziali degli articoli. Inoltre, sfrutta un algoritmo genetico (GA) per risolvere il problema di ottimizzazione della politica PoT.

Il GA mantiene una popolazione di soluzioni potenziali e simula processi di evoluzione attraverso selezioni e operatori genetici come crossover (Tabella 6: Un esempio di two-point crossover; Tabella 7: Un esempio di crossover uniforme) e mutazione.

Before	individual 1: 0101001100011100001111100
crossover	individual 2: 0001010000101010111011010
After	off spring 1: 0101001100001010111111100
crossover	off spring 2: 0001010000111100001011010

Tabella 6: Un esempio di two-point crossover.
Ming-Jong Yao & Jian-Xiong Huang [36]

individual 1	0 1 1 1 0 0 1 1 0 1 0 0 1 1 1 0 0
individual 2	1 0 1 0 1 1 0 0 1 0 1 1 0 1 0 1 1
sample mask 1	0 1 1 0 0 0 1 1 0 1 0 0 1 1 0 0 0
sample mask 2	1 0 0 1 1 1 0 0 1 0 1 1 0 0 1 1 1
off spring 1	1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 1
off spring 2	0 0 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 0 0

Tabella 7: Un esempio di crossover uniforme.
Ming-Jong Yao & Jian-Xiong Huang [36]

Il processo di selezione attribuisce maggiore probabilità di sopravvivenza alle soluzioni con migliori valori di fitness, mentre gli operatori genetici generano nuove soluzioni dalla popolazione esistente.

Il modello propone una rappresentazione cromosomica per codificare le frequenze di produzione di ogni articolo e definisce una funzione di fitness per valutare le soluzioni. Si discute anche la scelta dei parametri del GA, come il numero di generazioni, il tasso di crossover, il tasso di mutazione e la dimensione della popolazione.

In sintesi, il testo presenta un modello matematico per l'ELSP con articoli deterioranti sotto la politica PoT, utilizzando un approccio basato su EBP per minimizzare i costi complessivi. Il modello incorpora vincoli di capacità, politiche di produzione e considerazioni sui costi di deterioramento degli articoli per ottimizzare i costi totali.

La sezione principale del testo si focalizza sulla generazione di programmi di produzione realizzabili. Si spiega come l'euristica Proc FT venga impiegata per verificare la fattibilità di determinati programmi di produzione. Inoltre, si illustra l'utilizzo di una ricerca binaria per individuare valori di base che consentano una programmazione realizzabile, quando i valori dati non lo permettono.

L'euristica Proc FT è un metodo per verificare la fattibilità dei programmi di produzione in base a determinati vincoli, e si fa riferimento a un metodo di smoothing della programmazione per migliorare i risultati ottenuti.

Inoltre, si propone un'altra euristica, una ricerca binaria, per cercare valori di base che consentano una programmazione realizzabile quando i valori dati non lo permettono. Questa ricerca si basa sull'idea di stabilire un range di valori e utilizzare un metodo di ricerca apposito per individuare il valore ottimale.

Successivamente, viene presentato l'algoritmo genetico ibrido che sfrutta Proc FT e la ricerca binaria per ottenere programmi di produzione ottimali per gli insiemi dati di articoli deterioranti.

Infine, vengono forniti esempi numerici tratti dalla letteratura per valutare le prestazioni dell'algoritmo proposto. Si evidenzia che l'algoritmo genetico ibrido ottiene risultati di alta qualità in termini di soluzioni, mantenendo tempi di esecuzione ragionevoli. Si raccomanda l'uso di questo algoritmo come strumento di supporto decisionale per la pianificazione della produzione che coinvolge articoli soggetti a deterioramento.

L'articolo di Kayvanfar & Zandieh [38] delinea un'approfondita esplorazione del problema della pianificazione economica dei lotti (ELSP) in ambienti produttivi che affrontano sfide legate ai costi di slack e al deterioramento degli articoli. Attraverso l'impiego dell'approccio del periodo di base esteso sotto la politica Power-of-Two (PoT), l'obiettivo primario è stato individuare una dimensione ottimale del lotto per specifici prodotti, minimizzando i costi totali associati a questo intricato problema.

Con una funzione di costo comprendente setup, conservazione con fattore di deterioramento e slack, l'ELSP si concentra sulle decisioni di pianificazione per un numero n di elementi e le relative dimensioni dei lotti. La sfida principale risiede nella gestione delle interferenze nell'orario di produzione, una questione ampiamente esaminata in questo studio.

Data la complessità NP-hard dell'ELSP, è stato adottato un algoritmo competitivo imperialista per fornire soluzioni ottimali entro tempi computazionali ragionevoli, in figura 16 si può vedere la generazione degli imperi iniziali, più colonie possiede un imperialista, più grande è la sua stella.

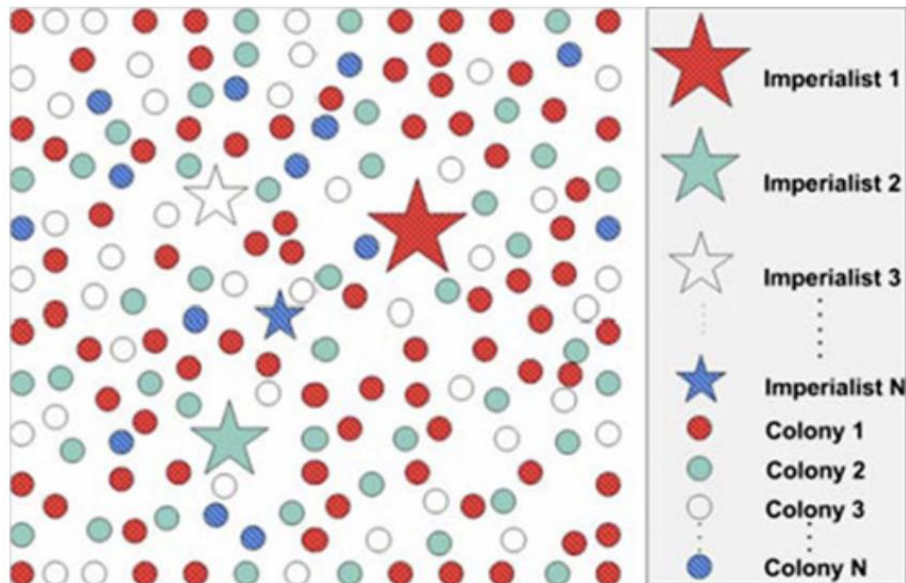


Figura 16: Generazione degli imperi iniziali, più colonie possiede un imperialista, più grande è la sua stella
 Kayvanfar & Zandieh[38]

I risultati computazionali hanno dimostrato l'efficacia di questo approccio nell'effettiva risoluzione di problemi di notevole complessità.

L'ELSP coinvolge la pianificazione della produzione di diversi articoli in un'unica struttura con l'intento di minimizzare i costi complessivi di conservazione e setup. L'articolo espone come questo problema si dimostri complesso, coinvolgendo la pianificazione ciclica della produzione per due o più articoli su una struttura singola, mirando a ridurre i costi di inventario e setup.

Il modello proposto nella ricerca integra il fattore di deterioramento e il costo di slack, aspetti rilevanti soprattutto in settori come l'industria alimentare, in cui la deperibilità dei prodotti è un'importante variabile da considerare. Un modello matematico è stato presentato per ottimizzare la produzione tenendo conto sia della capacità della struttura che del deterioramento degli articoli.

L'utilizzo della politica PoT, che richiede cicli di rifornimento multipli interi al fine di ridurre le interferenze, è stato esplorato nell'ambito dell'articolo. L'approccio proposto, mediante l'utilizzo dell' algoritmo competitivo imperialista, si è dimostrato efficace nel risolvere problematiche complesse legate alla pianificazione economica dei lotti.

Nel concludere, il documento presenta una struttura sperimentale che confronta i risultati ottenuti con altri algoritmi, offrendo inoltre prospettive future per ulteriori ricerche.

L'articolo propone un algoritmo di competizione imperialista (ICA) per risolvere il problema di programmazione economica dei lotti con articoli deteriorabili e costi di slack, utilizzando l'approccio del periodo di base esteso (EBP) sotto la politica Power-of-Two (PoT).

Sperimentazioni condotte su problemi di varie dimensioni hanno confrontato i risultati ottenuti dall'ICA con quelli di un algoritmo genetico (GA). I risultati hanno evidenziato le prestazioni superiori dell'ICA in termini di efficienza e capacità di ottenere soluzioni di qualità per il problema Slack-Deter-ELSP (EBP, PoT).

In chiusura, l'articolo riconosce l'efficacia dell'ICA proposto per il problema in questione e suggerisce ulteriori direzioni di ricerca, suggerendo l'adattamento dell'algoritmo a problemi multi-obiettivo o versioni discrete del problema di programmazione dei lotti.

3.3 PoT

Heinrich Kuhn & Thomas Liske [39] si sono concentrati sull'utilizzo della sola power of two, che richiede che i tempi di produzione siano multipli interi di un periodo base, facilitando l'implementazione di metodi di soluzione efficienti.

Il modello matematico proposto è basato su politiche di produzione più flessibili rispetto alla politica di common cycle, proponendo l'utilizzo del metodo dei punti di giunzione per trovare soluzioni ottimali. Questo metodo sfrutta la struttura convessa dell'obiettivo per determinare ottimi locali all'interno di intervalli in cui la funzione costo è convessa.

L'analisi condotta confronta l'approccio power of two con la politica di common cycle, variando i parametri del problema come i costi di inventario, le distanze tra fornitori e sito di produzione, nonché i costi di setup. I risultati indicano che l'approccio power of two può condurre a risparmi di costo fino al 18% rispetto all'approccio ciclico comune, ma questa percentuale varia a seconda delle specifiche condizioni dei parametri del problema.

Il testo sottolinea l'applicabilità pratica dell'approccio power of two, suggerendo possibili settori di utilizzo come i centri di distribuzione al dettaglio o l'industria automobilistica. (Figura 17: Costo medio di un item in un ELSP usando la politica power of two).

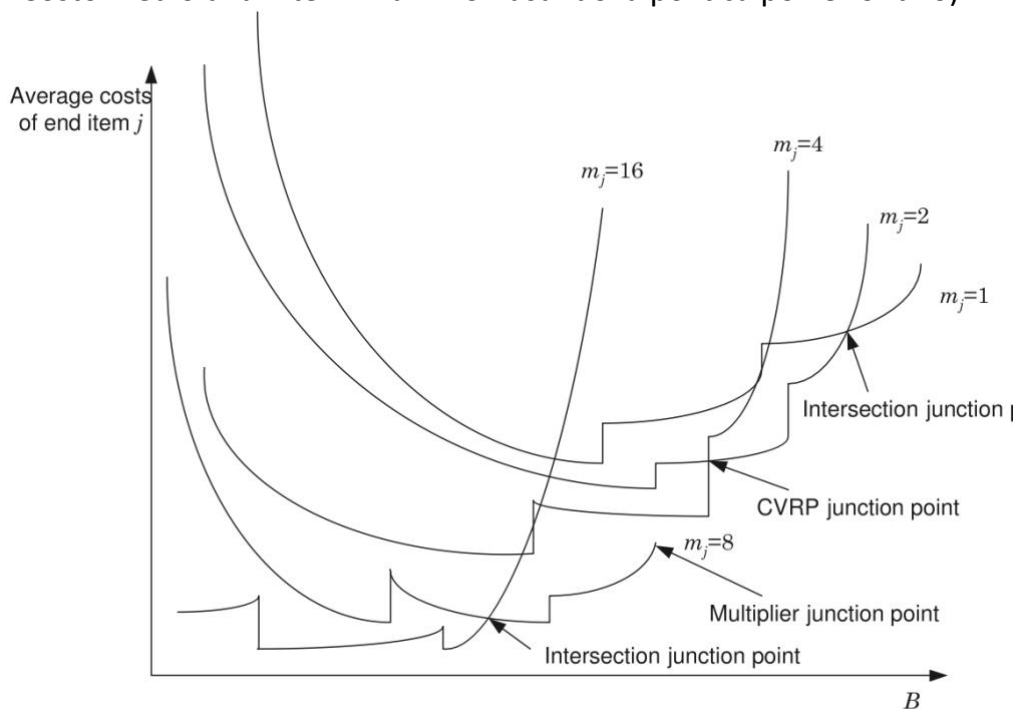


Figura 17: Costo medio di un item in un ELSP usando la politica power of two.
Heinrich Kuhn & Thomas Liske [39]

Tuttavia, enfatizza anche che questi risparmi non sono sempre ottenibili, ma dipendono dalle circostanze specifiche del problema.

Alcuni percorsi futuri per la ricerca includono l'espansione del modello per gestire più fornitori per gli stessi articoli finali e l'analisi delle situazioni in cui variazioni nella consegna dei materiali di input possono influenzare positivamente le soluzioni proposte.

Lo studio dimostra che l'approccio power of two può migliorare la soluzione del problema ELSP, ma il suo successo dipende dalle specifiche condizioni dei parametri del problema.

Ming-Jong Yao & S. E. Elmaghraby [40], affrontano nel loro documento il problema dell'ELSP con l'approccio PoT (Power of Two) per rendere la funzione obiettivo trattabile. In sostanza, si cerca di trovare il periodo ottimale di produzione (B) e i moltiplicatori associati ai vari prodotti in modo da minimizzare il costo totale.

La strategia principale consiste nell'esprimere i moltiplicatori come potenze di due, e nella rappresentazione binaria dei moltiplicatori e delle loro reciproche. Questo approccio consente di trasformare la funzione obiettivo in una forma lineare e binaria, rendendo più semplice la risoluzione del problema utilizzando strumenti di ottimizzazione.

Per determinare la soluzione ottimale, si possono utilizzare diverse strategie. Una di queste è la procedura di ricerca a passi piccoli (SSSP), che parte da un valore massimo di B e procede verso valori minori in decrementi incrementali, coprendo l'intervallo dei valori possibili di B. Questo approccio può condurre a una soluzione "vicina" all'ottimo globale, sebbene possa richiedere tempo a causa della sua natura iterativa.

Un aspetto cruciale nell'ottimizzazione del ciclo di produzione è individuare i punti in cui le curve di costo per i singoli prodotti si intersecano sulla funzione complessiva TCpoT. Questi punti di giunzione sono importanti perché indicano dove e quando è vantaggioso modificare i moltiplicatori dei singoli prodotti per ottenere il costo totale ottimale.

Esistono diverse procedure per identificare questi punti di giunzione, come la procedura di ricerca incrementale della differenza (ID) e la procedura di individuazione dei punti di giunzione (JP). Queste procedure mirano a determinare quali prodotti e a quali valori di B è conveniente raddoppiare il moltiplicatore k_i per ottenere i valori ottimali dei costi di produzione.

L'approccio PoT e le strategie di ricerca associate si concentrano sulla rappresentazione binaria dei moltiplicatori per semplificare la ricerca della soluzione ottimale nell'ELSP.

Questo metodo sfrutta i punti di giunzione delle curve di costo per determinare i valori ottimali dei moltiplicatori e del periodo base di produzione, permettendo di minimizzare efficacemente il costo totale di produzione per un dato set di prodotti.

L'attenzione, quindi, è rivolta alla ricerca della soluzione ottimale globale. L'algoritmo si propone di individuare i minimi locali della funzione del Costo Totale per Tempo d'Ordine (TCpoT), basandosi principalmente sui punti di giunzione del TCpoT che indicano i cambiamenti ottimali nei moltiplicatori per specifici articoli al fine di ottenere il valore ottimale della funzione.

L'algoritmo segue passaggi che includono la classificazione dei punti di giunzione e l'applicazione di condizioni per la località ottimale e la terminazione. Sfrutta la convessità della funzione TCpoT per determinare minimi locali all'interno di intervalli specifici, riducendo lo sforzo di ricerca sulla base dell'affermazione teorica. L'algoritmo procede esaminando iterativamente questi intervalli fino al raggiungimento delle condizioni di terminazione.

L'algoritmo di ricerca del massimo globale opera sequenzialmente dal punto di giunzione più grande verso il basso, aggiornando i moltiplicatori ottimali per ciascun intervallo. La

complessità di questo algoritmo è limitata ed efficiente grazie al suo approccio sistematico nel gestire i punti di giunzione e le condizioni di terminazione.

In un esempio numerico presentato, l'algoritmo dimostra la sua funzionalità identificando i minimi locali, garantendo la soluzione ottimale globale e fornendo infine l'insieme ottimale di moltiplicatori e il valore ottimale della funzione TCpoT

In sintesi, questo articolo approfondisce l'ELSP sotto la politica del PoT, mostrando la struttura della sua ottimalità e proponendo un algoritmo efficiente per trovare il massimo globale. I risultati offrono spunti sulle soluzioni ottimali dell'ELSP e possono fungere da punto di riferimento per convalidare altre euristiche di ricerca in questo ambito.

3.4 Considerazioni finali

In conclusione, Hainan Sun et al. [33] e M. Fatih Tasgetiren et al. [34] utilizzano entrambi la politica dell'Elemento Base del Periodo (EBP) e del Power of Two (PoT) per ottimizzare la sequenza di produzione e i lotti di produzione. Anche un altro studio dello stesso gruppo di autori [35] segue lo stesso approccio. D'altra parte, Ming-Jong Yao & Jian-Xiong Huang [36] si concentrano sull'EBP per minimizzare i costi totali, mentre Zhao Peixin & Qi Guijie [37] adottano l'approccio partheno-genetico per risolvere il problema sotto la politica PoT. Kayvanfar & Zandieh [38] si concentrano sull'approccio PoT. Heinrich Kuhn & Thomas Liske [39] adottano una politica di produzione a lotti economici, in cui cercano di minimizzare i costi di produzione e di gestione degli stock. Ming-Jong Yao & S. E. Elmaghraby [40], d'altra parte, si concentrano sulla programmazione dei lotti di produzione in un ambiente JIT (Just-in-Time) e con vincoli di capacità.

Passando ai modelli matematici, notiamo che Hainan Sun et al. [33] propongono un modello di programmazione non lineare per determinare la sequenza di produzione ottimale e le dimensioni dei lotti. M. Fatih Tasgetiren et al. [34] presentano un algoritmo chiamato Discrete Artificial Bee Colony (DABC), mentre un altro studio dello stesso gruppo di autori [35] formula un modello utilizzando una rappresentazione multi-cromosomica. Ming-Jong Yao & Jian-Xiong Huang [36] propongono un modello matematico per minimizzare i costi totali considerando il costo di deterioramento degli articoli. Zhao Peixin & Qi Guijie [37], d'altra parte, adottano un algoritmo genetico migliorato con operatori partheno-genetici. Kayvanfar & Zandieh [38] utilizzano un modello matematico basato su politiche di produzione flessibili rispetto alla politica di common cycle. Heinrich Kuhn & Thomas Liske [39] utilizzano un modello matematico basato sulla programmazione lineare intera per determinare la quantità ottimale di produzione per ogni articolo e il momento ottimale per la produzione di lotti. Infine, Ming-Jong Yao & S. E. Elmaghraby [40] utilizzano un modello matematico per minimizzare i costi totali, tenendo conto dei costi di setup, dei costi di produzione, dei costi di trasporto e dei costi di inventario.

Quanto alle variabili coinvolte, Hainan Sun et al. [33] considerano parametri come lunghezza del periodo base, moltiplicatori PoT per ciascun articolo e costi associati. M. Fatih Tasgetiren et al. [34] includono parametri come costi di configurazione, tempi di configurazione, tassi di domanda, tassi di produzione e costi di mantenimento dell'inventario. Ming-Jong Yao & Jian-Xiong Huang [36] considerano parametri come costi di deterioramento, domande di produzione e politiche di produzione. Zhao Peixin & Qi

Guijie [37] includono parametri come frequenze di produzione, costi di setup e costi di deterioramento. Kayvanfar & Zandieh [38] considerano parametri come costi di slack, costi di setup e distanze tra fornitori e siti di produzione. Le variabili considerate da Heinrich Kuhn & Thomas Liske [39] includono i costi di setup, i costi di produzione e i costi di mantenimento dell'inventario. Gli autori Ming-Jong Yao & S. E. Elmaghraby [40], invece, introducono anche una variabile di slack per gestire la variazione nella domanda e nel tempo di consegna.

Per quanto riguarda gli algoritmi utilizzati, Hainan Sun et al. [33] confrontano l'efficienza di algoritmi come Small-Step Search (SS), Efficient Heuristic (EH) e algoritmi genetici. M. Fatih Tasgetiren et al. [34] utilizzano un algoritmo DABC, mentre un altro studio dello stesso gruppo di autori [35] implementa un algoritmo di ricerca di vicinato variabile (VNS). Ming-Jong Yao & Jian-Xiong Huang [36] utilizzano un algoritmo genetico per risolvere il problema di ottimizzazione della politica PoT, e lo stesso vale per Zhao Peixin & Qi Guijie [37], che adattano un algoritmo genetico con operatori partheno-genetici. Kayvanfar & Zandieh [38] utilizzano un algoritmo competitivo imperialista per fornire soluzioni ottimali. Kuhn & Thomas Liske [39] propongono un algoritmo basato sulla programmazione dinamica per risolvere il problema in modo efficiente, tenendo conto di vincoli come la capacità di produzione e le scorte minime e massime consentite. Ming-Jong Yao & S. E. Elmaghraby [40] utilizzano un algoritmo iterativo che ottimizza la sequenza di produzione e la dimensione dei lotti, mantenendo il livello di inventario desiderato e rispettando i vincoli di capacità.

Infine, per quanto riguarda i costi e i parametri coinvolti nei vari studi, tutti considerano una serie di costi legati alla produzione, tra cui costi di configurazione, costi di produzione e costi di mantenimento dell'inventario. Ming-Jong Yao & Jian-Xiong Huang [36] e Zhao Peixin & Qi Guijie [37] considerano anche costi specifici come i costi di deterioramento degli articoli, mentre Kayvanfar & Zandieh [38] considerano i costi di slack e le distanze tra i fornitori e i siti di produzione.

4. Time Varying Lot Size

Il "time-varying lot sizing", o dimensionamento del lotto variabile nel tempo, è una pratica strategica nell'ambito della gestione della produzione industriale. Si riferisce alla capacità di adattare le dimensioni dei lotti di produzione in risposta alle fluttuazioni e alle variazioni che si verificano nel tempo all'interno di un processo produttivo.

Questo approccio prende in considerazione diversi fattori dinamici che possono influenzare le decisioni di produzione. Tra questi, la domanda dei clienti, i costi operativi e le capacità di produzione possono variare considerevolmente durante periodi diversi, spesso in risposta a condizioni di mercato mutevoli, stagionalità o altre variabili ambientali ed economiche.

Nella pratica, l'obiettivo del time-varying lot sizing è ottimizzare l'allocazione delle risorse e la gestione della produzione, cercando di ridurre al minimo i costi complessivi di produzione e di stoccaggio. Questa ottimizzazione si ottiene regolando le dimensioni dei lotti in modo flessibile, producendo quantità maggiori quando la domanda è alta e quantità ridotte quando la domanda è bassa. Inoltre, tiene conto dei costi di setup delle macchine, dei costi di mantenimento dell'inventario e delle capacità disponibili durante diversi periodi temporali.

L'implementazione del time-varying lot sizing coinvolge l'utilizzo di modelli matematici avanzati e algoritmi di ottimizzazione che prendono in considerazione una serie di parametri e vincoli. Questi modelli valutano i costi totali di produzione, la gestione degli stock, la capacità produttiva e altri fattori critici per determinare le dimensioni ottimali dei lotti in ciascun periodo di tempo.

4.1 Algoritmi euristici

Per adeguare le dimensioni dei lotti di produzione in relazione alle fluttuazioni e alle variazioni temporali interne a un processo produttivo la scheduling policy più adeguata è il time varying lot size, il testo di S. A. Raza, A. Akgunduz & M. Y. Chen [41] discute l'applicazione di algoritmi euristici per risolvere il problema di pianificazione economica della produzione (ELSP), concentrandosi sull'approccio a dimensione lotto variabile nel tempo (VLTB).

Parte dell'attenzione è dedicata all'efficacia di due tipi di algoritmi:

Il primo è l'Algoritmo di Tabu Search (TS), noto per affrontare problemi complessi di ottimizzazione come l'ELSP, grazie alla sua capacità di esplorare soluzioni diverse e memorizzare le mosse "tabù" per evitare configurazioni già esplorate. L'approccio mira a trovare la soluzione ottima o una sua prossima approssimazione.

Il secondo è l'Approccio di Ricerca nel Vicinato, che si concentra sull'esplorazione delle soluzioni vicine a quella corrente e sull'apportare piccoli cambiamenti per migliorare gradualmente la soluzione.

Il testo dettaglia l'implementazione di questi algoritmi, esplorando varie configurazioni e strategie per ottimizzarne le prestazioni. Vengono condotti test su casi specifici di

pianificazione della produzione, analizzando attentamente i parametri e le condizioni sperimentali.

Infine, l'analisi dei risultati ottenuti dai due algoritmi euristici fornisce un confronto con altri approcci esistenti per l'ELSP. L'obiettivo è valutare l'efficacia e l'efficienza di ciascun metodo, considerando le loro prestazioni nella risoluzione pratica di problemi complessi di pianificazione della produzione.

L'obiettivo fondamentale dell'articolo di Syed Asif Raza & Ali Akgunduz [43] è minimizzare i costi totali di setup e mantenimento dell'inventario garantendo al contempo la soddisfazione della domanda di prodotti. Questo obiettivo è definito attraverso una serie di equazioni e vincoli che specificano le condizioni che il modello deve rispettare.

Successivamente, l'articolo propone e illustra l'implementazione di due approcci di metaeuristiche: Tabu Search (TS) e Simulated Annealing (SA). Questi metodi di ottimizzazione vengono utilizzati per cercare soluzioni ottimali al problema ELSP. Inoltre, vengono presentate due euristiche di ricerca di vicinato, NSa e NSb, utilizzate come confronto per valutare le prestazioni dei due algoritmi principali.

Il Tabu Search (TS) è un algoritmo iterativo che utilizza una lista "tabu" per evitare cicli eccessivi e una strategia di intensificazione e diversificazione per migliorare le prestazioni dell'algoritmo. Simulated Annealing (SA), invece, si basa su un procedimento analogo all'annealing metallico, utilizzando parametri come temperatura iniziale, schema di raffreddamento e funzione di accettazione.

Le euristiche di ricerca di vicinato, NSa e NSb, generano soluzioni iniziali e cercano soluzioni migliori attraverso iterazioni successive, differenziandosi nell'approccio di arrotondamento delle frequenze di produzione.

I risultati computazionali mostrano che TS e SA superano altre euristiche esistenti, dimostrando una migliore performance rispetto all'euristica di Dobson e all'algoritmo genetico ibrido in diverse configurazioni di problemi testati, in Tabella 8 si può notare ciò, data la comparazione tra i problemi di Mallya e Bomberger.

Problem type	Lower bound	Existing solutions		Proposed solutions			
		DH	GA	SA	TS	NS _a	NS _b
Mallya	57.726	60.874	60.911	60.911	60.911	60.911	60.782
Mallya [§]	-	-	-	60.782	60.782	-	-
Bomberger	122.945	128.339	126.12	125.135	125.31	125.754	130.346

*Tabella 8: Comparazione tra i problemi di Mallya e Bomberger.
Syed Asif Raza & Ali Akgunduz [43]*

L'articolo, infine, propone e valuta l'efficacia di diverse tecniche di ottimizzazione (TS, SA e due euristiche di ricerca di vicinato) per risolvere il problema ELSP, evidenziando come TS e SA siano in grado di ottenere risultati migliori rispetto ad altre euristiche su una serie di problemi di test.

Il documento fornitoci da Raffaele Pesenti & Walter Ukovich [44] tratta della programmazione della produzione su diverse linee parallele, considerando vincoli di incompatibilità tra gli oggetti da produrre. L'obiettivo principale è minimizzare i costi associati alla produzione, allo stoccaggio e alle perdite dovute alla mancanza di soddisfacimento della domanda.

Vengono introdotte notazioni specifiche per caratterizzare elementi come il numero di prodotti e linee di produzione, i tassi di domanda e produzione, i costi di tenuta e di mancato soddisfacimento della domanda, i costi di setup, i costi di produzione, e altri parametri.

Viene proposto un approccio euristico per generare programmi di produzione praticabili. Questo approccio prevede strategie per assegnare priorità agli oggetti sulla base delle incompatibilità e dei costi associati alla mancanza di soddisfacimento della domanda. Il processo di risoluzione del problema avviene in tre fasi: assegnazione, scheduling e valutazione. Durante l'assegnazione, si cerca di assegnare gli oggetti alle linee di produzione in modo efficiente, considerando le incompatibilità e i costi associati. Lo scheduling consiste nel pianificare gli intervalli di produzione per gli oggetti assegnati alle linee, mentre la valutazione verifica se il programma di produzione soddisfa i vincoli e minimizza i costi.

Il testo offre una panoramica dettagliata di come affrontare la programmazione della produzione su linee parallele tenendo conto delle incompatibilità tra gli oggetti da produrre, proponendo strategie euristiche e condizioni per garantire soluzioni ottimali o fattibili. Le condizioni presentate portano a complessità nell'espressione dei costi di mantenimento e richiedono la gestione delle incompatibilità tra oggetti e dei vincoli legati ai tempi di setup.

Una delle principali sfide è rappresentata dall'espressione analitica dei costi di mantenimento quando un oggetto può essere prodotto su più linee. Questo perché il livello di stoccaggio di un oggetto, al momento della produzione su una linea specifica, può essere influenzato dalla produzione passata su altre linee. Inoltre, il tasso di domanda da soddisfare in ogni istante rimane costante, indipendentemente dalla frazione di domanda assegnata a ciascuna macchina.

L'algoritmo proposto affronta questa complessità suggerendo di utilizzare il limite superiore nell'espressione dei costi da minimizzare quando si ammettono assegnazioni a diverse linee. In questo modo, si considera ogni assegnazione di un oggetto a una linea come un oggetto distinto. Questo approccio introduce la creazione di grafi con nodi specifici per ogni assegnazione di oggetti alle linee, consentendo di gestire in modo più efficace la produzione su più linee.

In aggiunta, l'introduzione di tempi di setup diversi da zero comporta ulteriori complicazioni, soprattutto nella gestione delle incompatibilità tra operazioni di setup e di produzione. L'algoritmo suggerito riduce le capacità delle linee di produzione di un fattore costante determinato attraverso tentativi, evitando una precisa determinazione di quanto i tempi di setup influenzino effettivamente le capacità delle linee.

Attraverso esempi numerici dettagliati e test su diverse istanze del problema, l'algoritmo mostra la sua efficacia nella gestione delle complessità legate alle assegnazioni multiple degli oggetti, alle incompatibilità tra oggetti e ai tempi di setup. I risultati numerici dimostrano una buona corrispondenza tra i costi ottenuti dall'algoritmo e i limiti inferiori derivati da altre metodologie, confermando la sua capacità di trovare soluzioni soddisfacenti in scenari realistici.

4.2 Algoritmi deterministici

Rongwu Luo [42] nel suo studio si è concentrato sulla sequenza di produzione, tempo di produzione e tempo di inattività di vari articoli in una singola struttura su base ripetitiva. L'obiettivo è minimizzare i costi medi di detenzione delle scorte e i costi di configurazione. Dato che l'ELSP è NP-hard, la ricerca si è concentrata nello sviluppare approcci euristici efficienti.

Il testo propone un nuovo algoritmo basato sul TVLS, affrontando l'ELSP come due problemi indipendenti: la sequenza di produzione e il tempo di produzione, l'inattività e il ciclo. Questo algoritmo deterministico si differenzia dagli algoritmi euristici moderni che sono principalmente stocastici.

Il modello ELSP è descritto in termini di assunzioni e parametri, fornendo vincoli matematici e costi minimi. Viene proposto un nuovo algoritmo che ottiene una sequenza di produzione ottimale, prestando particolare attenzione agli "articoli ostacolo" con tempi di produzione più lunghi.

Il testo include un esempio numerico per valutare le prestazioni del nuovo algoritmo, dimostrando la capacità dell'algoritmo di fornire soluzioni di alta qualità in confronto ad altri approcci noti.

4.3 Paper di confronto del TVLS con EBP e CC

Nello studio di Yu-Jen Chang e Ming-Jong Yao [45], è stata eseguita un'analisi comparativa per valutare l'efficacia di tre approcci principali - l'Approccio a Ciclo Comune (CC), l'Approccio a Periodo di Base Esteso (EBP), e l'Approccio di Dimensionamento dei Lotti Variabili nel Tempo (TVLS) - per la risoluzione del Problema di Assegnazione di Lotti Economici (ELSP). L'obiettivo è stato determinare il più efficace tra questi approcci considerando variazioni nei costi e nei tempi di configurazione.

Le ricerche precedenti non avevano fornito una chiara evidenza numerica sulla superiorità dell'approccio TVLS rispetto agli approcci basati sul periodo di base. Pertanto, questo studio ha condotto esperimenti casuali per valutare le prestazioni di CC, EBP e TVLS in relazione ai costi e ai tempi di setup.

I risultati principali sono i seguenti:

- L'EBP, in molti casi, tende a generare soluzioni più ottimali rispetto al CC. Tuttavia, quando i tempi di setup sono elevati, EBP e CC possono raggiungere soluzioni simili, soprattutto con un numero crescente di prodotti. Ciò potrebbe contraddire le aspettative riguardanti soluzioni differenziate in condizioni di utilizzo più intenso della struttura.
- Il CC può superare il TVLS in presenza di costi o tempi di setup elevati, mentre il TVLS può superare l'EBP in circostanze analoghe.
- L'efficacia del TVLS è significativamente influenzata sia dai costi che dai tempi di setup, con un impatto equiparabile sulle performance.

- In condizioni di utilizzo intenso e con un numero maggiore di prodotti, il TVLS può superare gli approcci basati sul periodo di base. Tuttavia, potrebbe risultare inferiore al CC in condizioni di utilizzo basso o con pochi prodotti, soprattutto se i costi o i tempi di setup assumono valori specifici.

4.4 Considerazioni finali

Comparando i paper appena citati, S. A. Raza, A. Akgunduz & M. Y. Chen [41] si concentrano sulla minimizzazione dei costi totali di setup e mantenimento dell'inventario, garantendo al contempo la soddisfazione della domanda di prodotti. Hanno presentato due approcci di metaeuristiche: Tabu Search (TS) e Simulated Annealing (SA), insieme a due euristiche di ricerca di vicinato.

Raffaele Pesenti e Walter Ukovich [44], d'altra parte, affrontano la programmazione della produzione su linee parallele, considerando vincoli di incompatibilità tra gli oggetti da produrre. Hanno proposto un approccio euristico che comprende tre fasi: assegnazione, scheduling e valutazione. L'obiettivo è assegnare gli oggetti alle linee di produzione in modo efficiente, considerando le incompatibilità e i costi associati. L'algoritmo suggerito gestisce in modo efficace la produzione su più linee, affrontando sfide come l'espressione analitica dei costi di mantenimento e la gestione delle incompatibilità tra oggetti.

Yu-Jen Chang e Ming-Jong Yao analizzano l'efficacia di tre approcci principali per risolvere l'ELSP: l'approccio a Common Cycle (CC), l'approccio a Extended Basic Period (EBP) e l'approccio di Time Varying Lot Size (TVLS). La valutazione si è concentrata sui costi e sui tempi di setup. I risultati hanno mostrato che l'efficacia del TVLS è influenzata sia dai costi che dai tempi di setup, e che può superare gli approcci basati sul periodo di base in determinate condizioni.

Mentre Syed Asif Raza e Ali Akgunduz [43] propongono di minimizzare i costi totali di setup e mantenimento dell'inventario mentre si soddisfa la domanda di prodotti.

Infine, Rongwu Luo [42]: L'autore si concentra sulla minimizzazione dei costi medi di detenzione delle scorte e dei costi di configurazione in una struttura produttiva su base ripetitiva. Ha proposto un algoritmo basato sul Time-Varying Lot Sizing (TVLS), che considera l'ELSP come due problemi indipendenti: la sequenza di produzione e il tempo di produzione, l'inattività e il ciclo. Questo algoritmo deterministico si differenzia dagli approcci euristici stocastici e mira a fornire soluzioni di alta qualità. Un esempio numerico è stato condotto per valutare le prestazioni del nuovo algoritmo, dimostrando la sua capacità di fornire soluzioni di alta qualità rispetto ad altri approcci noti.

Dalle comparazioni dei paper citati emerge una varietà di approcci euristiche e algoritmi proposti per affrontare problemi di ottimizzazione legati alla gestione della produzione e dell'inventario. I ricercatori hanno focalizzato la loro attenzione sulla minimizzazione dei costi totali di setup e mantenimento dell'inventario, considerando vincoli specifici e obiettivi di soddisfazione della domanda di prodotti.

Le metaeuristiche proposte, come Tabu Search (TS) e Simulated Annealing (SA), sono state valutate in termini di efficienza e capacità di superare altre euristiche esistenti in diverse configurazioni di problemi. L'efficacia di questi approcci è stata evidenziata attraverso test

empirici che dimostrano il loro potenziale nel trovare soluzioni ottimali o vicine all'ottimalità.

Per di più, gli autori hanno affrontato specifici contesti di produzione, come la programmazione su linee parallele e la struttura produttiva su base ripetitiva, proponendo algoritmi euristici che tengono conto di vincoli complessi come incompatibilità tra oggetti, costi di mantenimento e configurazione. La valutazione empirica condotta su tali approcci ha evidenziato la capacità di fornire soluzioni di alta qualità e di superare altri metodi noti, contribuendo così alla letteratura sulla ricerca operativa e alla pratica industriale.

5. Other Policy

In questo capitolo saranno presenti policy che ho riscontrato di meno all'interno della letteratura, ma che presentavano interessanti metodologie di approccio all'Economic Lot Scheduling Problem.

5.1 Just in Time

S. Ramani e N. Narayanan [46] hanno sperimentato la politica Just In Time. Negli ultimi anni, alcuni modelli per il Problema Economico di Pianificazione dei Lotti (ELSP) sono stati ampliati per integrare i concetti Just-in-Time (JIT), considerando i costi di setup, i tempi di setup e la capacità come variabili decisionali. Questi modelli tendono a generare programmi ciclici, in linea con la filosofia JIT. Hall (1988) enfatizza la pianificazione ciclica per il miglioramento continuo sotto il JIT e raccomanda di analizzare i tempi ciclici per un miglioramento costante. Questo articolo estende i modelli ELSP basati sulla Politica del Ciclo Comune all'interno del quadro dell'"analisi del tempo di ciclo per il miglioramento" e presenta un approccio sistematico a tale analisi utilizzando questi modelli. Lo studio si concentra sulla pianificazione di lotti di articoli multipli con un ciclo condiviso su una singola macchina e offre una procedura passo-passo utilizzando vari modelli, illustrata attraverso un esempio numerico.

Hall [Hall, R.W., 1988. Cycle scheduling for improvement. *Int. J. Prod. Res.*, 26(3): 457-472] introduce il significato della produzione ciclica nel JIT, raccomandando di considerarla come un catalizzatore per le attività di miglioramento continuo, concentrandosi sull'analisi dei tempi di ciclo e sulla sincronizzazione delle operazioni. Ramani e Narayanan estendono questo concetto alla produzione "Limited Repetitive Large Jobbing", allineando le lunghezze dei cicli con i cicli di domanda per i prodotti finali.

I modelli descritti affrontano diversi livelli di miglioramento nei processi produttivi. Il Modello 1 si occupa del flusso dei materiali senza miglioramenti immediati. Il Modello 2 consente aggiustamenti nei costi di setup, mentre il Modello 3 considera i costi di setup, i tempi di setup e la capacità come variabili. Viene delineata una procedura step-by-step per il "cycle time analysis for improvement", facilitando le decisioni attuali sulla pianificazione e identificando aree di miglioramento.

In un esempio numerico che coinvolge tre componenti (A, B e C) prodotte su una singola macchina, il principio JIT guida le decisioni. L'analisi calcola tempi ciclici e dimensioni dei lotti ottimali per i componenti, assegnando priorità ai miglioramenti basati sui costi di setup, i tempi di setup e la capacità.

Lo studio estende i modelli ELSP per adattarli ai principi JIT, enfatizzando la pianificazione ciclica per un miglioramento continuo. L'analisi step-by-step aiuta nelle decisioni immediate sulla pianificazione e identifica le strade per migliorare i processi.

Anche la ricerca svolta da Juho Hahm e Candace Arai Yano [47] riguardo all'Economic Lot and Delivery Scheduling Problem (ELDSP) offre una panoramica dettagliata sulle strategie ottimali di produzione e consegna per un singolo componente, mirando a minimizzare i costi totali per unità di tempo esplorando politiche Just in Time.

Il ELSP è affrontato attraverso l'applicazione della politica di pianificazione dei lotti (lot-sizing), finalizzata a determinare le dimensioni ottimali dei lotti di produzione e consegna. L'obiettivo principale è minimizzare i costi medi, includendo costi di configurazione, costi di mantenimento dell'inventario e spese di trasporto.

La ricerca si distingue per la chiara considerazione dei tassi di produzione finiti, dell'accumulo dell'inventario e dei costi di trasporto. Si rileva che il rapporto tra l'intervallo di produzione e consegna deve essere un numero intero nelle soluzioni ottimali. Questa scoperta fornisce una base solida per una procedura di soluzione ottimale, che si dimostra semplice ed efficiente.

La letteratura esaminata evidenzia una carenza di studi che affrontino congiuntamente l'ottimizzazione di produzione, consegna e costi di trasporto. Molti modelli esistenti ignorano i costi di accumulo dell'inventario o assumono una produzione istantanea. Altri modelli includono i costi di trasporto ma non collegano esplicitamente le pianificazioni di produzione alle frequenze di consegna.

In sintesi, la ricerca di Hahm e Yano offre un'analisi approfondita sulla relazione tra gli intervalli di produzione e consegna, esplorando strategie ottimali di sincronizzazione e di riduzione dei costi nel contesto delle catene di fornitura e delle politiche just-in-time. La politica di scheduling utilizzata è quella dei lotti, cercando di determinare le dimensioni ottimali dei lotti di produzione e consegna per minimizzare i costi totali. La loro ricerca costituisce un importante contributo alla comprensione e all'ottimizzazione dell'ELSP. Entrambi i testi analizzano problemi di pianificazione e gestione della produzione, integrando politiche Just in Time (JIT) per ottimizzare i processi. Entrambi i testi mirano a minimizzare i costi totali considerando variabili come i costi di setup, i tempi di setup, i costi di mantenimento dell'inventario e i costi di trasporto. Tuttavia, ci sono differenze significative nei dettagli e nei contesti specifici trattati.

Per quanto riguarda le similitudini, entrambi i testi si basano sui principi della produzione JIT, che mirano a ridurre al minimo gli sprechi e ottimizzare la produzione e la consegna, inoltre hanno entrambi come obiettivo principale la minimizzazione dei costi totali associati alla produzione, alla gestione dell'inventario e alla consegna.

Infine, i testi considerano la pianificazione ciclica come un meccanismo per migliorare continuamente i processi produttivi e sincronizzare le operazioni.

Analizzando le differenze, il paper di S. Ramani e N. Narayanan [46] si concentra sul Problema Economico di Pianificazione dei Lotti (ELSP) ed estende i modelli ELSP per adattarli ai principi JIT, concentrandosi sulla pianificazione di lotti di articoli multipli su una

singola macchina. Juho Hahm e Candace Arai Yano [47] si occupano dell'Economic Lot and Delivery Scheduling Problem (ELDSP), focalizzandosi sulla determinazione delle dimensioni ottimali dei lotti di produzione e consegna per un singolo componente.

Inoltre, S. Ramani e N. Narayanan [46] enfatizzano l'importanza dell'analisi dei tempi ciclici e offre una procedura step-by-step per tale analisi; invece, Hahm e Yano [47] si concentrano sulla relazione tra gli intervalli di produzione e consegna e sull'ottimizzazione della sincronizzazione per ridurre i costi totali.

Mentre entrambi i paper considerano i costi di trasporto come parte dei costi totali, Hahm e Yano [47] si focalizzano sulla considerazione esplicita dei costi di trasporto e sulla loro integrazione nelle strategie di pianificazione e consegna.

5.2 Policy per affrontare lo Stochastic Economic Lot Scheduling Problem

Nello studio di Mesquita, Marco Aurélio, e João Vitor Tomotani [48] è stato affrontato il complesso problema della pianificazione dei lotti e della programmazione dei prodotti in un ambiente industriale, concentrandosi sullo Stochastic Economic Lot Scheduling Problem (SELSP), una sfida che coinvolge la gestione della domanda stocastica e dei tempi di setup dipendenti dalla sequenza. Questo studio si differenzia dagli approcci esistenti in letteratura per la sua analisi delle politiche di controllo dell'inventario e l'utilizzo di un approccio di simulazione-ottimizzazione per la calibrazione dei parametri.

Due specifiche politiche di controllo dell'inventario sono state esaminate in profondità: il modello "First in Sequence" (FIS), che segue una logica di ciclo fisso, e il modello "Lowest Days of Supply" (LDS), basato su una pianificazione dinamica che considera i livelli di inventario.

Entrambi i modelli, sebbene con strutture simili, differiscono nella strategia per determinare il prossimo articolo da produrre.

La fase di domanda nel processo esegue il riempimento delle richieste giornaliere provenienti dall'inventario dei beni finiti. In caso di insufficiente stock, la domanda può essere soddisfatta solo parzialmente o persa se lo stock raggiunge lo zero (situazione di stockout). Il processo produttivo, caratterizzato da cicli di inattività e occupazione, identifica l'articolo successivo da produrre o si interrompe se non vi è alcun articolo al di sotto dello stock minimo.

Il processo di controllo raccoglie dati dal sistema per calcolare le prestazioni dell'inventario, utilizzate per calibrare i parametri e confrontare le politiche di gestione delle scorte.

Attraverso numerose simulazioni-ottimizzazioni, sono stati analizzati gli effetti di diversi fattori operativi sulle performance delle politiche di controllo dell'inventario.

Le analisi condotte hanno dimostrato che il modello LDS ha costantemente superato il modello FIS, mostrando un risparmio medio di costi in scenari con un numero maggiore di prodotti, maggiore incertezza nella domanda e un carico di lavoro più elevato.

Il contributo principale di questo lavoro consiste nel confronto tra queste politiche di controllo dell'inventario in scenari diversificati attraverso un approccio di simulazione-ottimizzazione, offrendo sia un contributo teorico nel risolvere il SELSP, sia modelli pratici applicabili in contesti industriali reali.

L'articolo è strutturato in modo da presentare il problema di ricerca, revisioni della letteratura, la definizione del problema, il metodo di ricerca e i modelli di simulazione, un design sperimentale, l'analisi dei risultati e una conclusione con possibili direzioni future. In conclusione, l'articolo propone un approccio innovativo per confrontare e valutare le politiche di gestione delle scorte in un contesto produttivo, evidenziando come il modello LDS sia più flessibile e performante rispetto al modello FIS in scenari diversificati e di complessità crescente.

Anche la ricerca di Michael Wagner e Sanne R. Smits [49] propone un modello per affrontare il problema della pianificazione economica dei lotti (SELSP), mirando a ottimizzare la produzione di vari prodotti su una struttura con capacità limitata e tempi di setup significativi, tenendo conto di una domanda stocastica modellata come un processo stazionario di rinnovamento composto. L'obiettivo principale è minimizzare i costi medi a lungo termine legati ai setup e agli inventari, garantendo un tasso di riempimento della domanda specificato.

L'approccio di pianificazione si basa su un ciclo fondamentale (fundamental cycle), dove i tempi ciclo dei prodotti sono multipli di un periodo base. Si crea una sequenza ciclica di produzione per ridurre i costi attesi di setup e di inventario nel lungo periodo. Questa strategia di pianificazione ciclica viene poi integrata con una politica di controllo degli inventari a breve termine, che adotta un approccio di riordino periodico fino a un livello di stock prestabilito. Quando lo stock di un articolo viene controllato, viene emesso un ordine di produzione per riportare lo stock al livello di riordino. Gli ordini di produzione vengono elaborati in base all'ordine di arrivo e completati prima che l'impianto passi all'ordine successivo in attesa.

La strategia di pianificazione si concentra sulla creazione di un programma ciclico ottimale per la produzione, mentre la politica di controllo degli inventari utilizza un approccio di riordino periodico per mantenere gli stock a un livello prestabilito. Entrambe queste strategie sono progettate per ridurre i costi di setup e di mantenimento degli inventari, garantendo al contempo un tasso di riempimento della domanda desiderato.

Il lavoro presenta un algoritmo di ottimizzazione che si articola in varie fasi per affrontare questo problema complesso.

Entrambi i testi affrontano lo Stochastic Economic Lot Scheduling Problem (SELSP), un problema complesso che coinvolge la pianificazione dei lotti e la programmazione dei prodotti in un ambiente industriale con domanda stocastica e tempi di setup dipendenti dalla sequenza. Entrambi mirano a minimizzare i costi totali associati ai setup e agli inventari, garantendo al contempo un tasso di riempimento della domanda specificato.

Partendo dalle similitudini, entrambi i testi si concentrano sullo stesso problema di pianificazione, ovvero il SELSP, e mirano a ottimizzare la produzione di vari prodotti considerando la domanda stocastica e i tempi di setup dipendenti dalla sequenza.

Entrambi hanno come obiettivo principale la riduzione dei costi totali associati ai setup e agli inventari nel lungo termine, utilizzando strategie di pianificazione ciclica e politiche di controllo degli inventari.

In merito alle differenze, Mesquita, Marco Aurélio, e João Vitor Tomotani [48] utilizzano un approccio di simulazione-ottimizzazione per confrontare e valutare diverse politiche di controllo degli inventari, mentre Michael Wagner e Sanne R. Smits [49] presentano un algoritmo di ottimizzazione specifico per affrontare il problema, suddiviso in varie fasi. Sebbene entrambi i testi esplorino politiche di controllo degli inventari, il primo testo [48] analizza specificamente due politiche (FIS e LDS) e ne confronta le performance, mentre il secondo testo [49] integra una politica di riordino periodico con una strategia di pianificazione ciclica per mantenere gli stock a un livello prestabilito. Entrambi i testi adottano strategie di pianificazione ciclica per ridurre i costi attesi di setup e di inventario nel lungo periodo, ma Michael Wagner e Sanne R. Smits [49] si concentrano sulla creazione di un programma ciclico ottimale per la produzione, integrando una politica di controllo degli inventari a breve termine.

5.3 Utilization Policy, Dynamic Lot-Sizing Policy, Optimal Dynamic Cyclical Policy e Proposed Policy

L'attenzione di David M. Markowitz, Martin I. Reiman e Lawrence M. Wein [50], è stata posta sull'ottimizzazione delle politiche di pianificazione per sistemi di produzione che gestiscono N tipi di prodotti. Questo studio ha considerato attentamente i costi di setup, di gestione dell'inventario e di backordering per ogni prodotto. Lo scopo principale è stato individuare politiche di pianificazione atte a minimizzare il costo medio su un lungo periodo, tenendo conto delle normalizzazioni del traffico pesante, caratterizzato da densità di traffico prossime all'unità.

L'analisi condotta identifica tre regioni di carico di lavoro: eccesso di inventario (Regione I), mancanza di inventario (Regione III) e una zona intermedia in cui il carico di lavoro si situa in un intervallo compreso tra zero (Regione II). Le dimensioni dei lotti sono variabili in base alla regione di carico di lavoro: costanti nelle Regioni I e III, ma variabili nella Regione II. La politica suggerita si basa sull'ottimizzazione dell'inventario nelle Regioni I e III, concentrandolo nel prodotto con i costi di gestione o backordering più bassi, al fine di ridurre i costi complessivi dell'inventario.

Le dimensioni dei lotti dipendono dalla posizione del sistema nello spazio del carico di lavoro: una produzione frequente è preferibile quando il carico è prossimo allo zero per evitare costosi backordering, mentre l'utilizzo di lotti più grandi risulta vantaggioso con un carico elevato, permettendo di evitare i costi di setup grazie all'inventario concentrato nel prodotto a minor costo.

L'attuazione di questa politica potrebbe risultare in un livello massimo di inventario variabile, dipendente dallo stato attuale del sistema, determinato dalle quantità di inventario esistenti e dalla posizione della macchina. Ad esempio, durante il carico di lavoro nella Regione II, si potrebbe stabilire un livello massimo di inventario per il prodotto correntemente in produzione, variabile in base al carico di lavoro totale.

La politica ottimale di scheduling in un contesto di traffico pesante si basa su regioni di carico di lavoro che influenzano la grandezza dei lotti e l'inventario mantenuto nei prodotti

a minor costo, offrendo così un'ottimizzazione dei costi complessivi di inventario e produzione.

Queste strategie di scheduling si articolano in diverse politiche volte a ottimizzare il funzionamento del sistema in situazioni di carico di lavoro variabile. Queste politiche si concentrano su vari aspetti chiave per garantire un processo efficiente e minimizzare i costi globali.

Innanzitutto, la "Utilization Policy" determina l'attivazione o l'inattività della macchina in base al carico di lavoro, adattandosi alle effettive necessità di produzione. Successivamente, la "Dynamic Lot-Sizing Policy" definisce la quantità di ciascun prodotto da produrre durante il funzionamento della macchina attiva, variando a seconda del livello di carico di lavoro.

L'interconnessione di queste politiche avviene tramite la "Optimal Dynamic Cyclical Policy", che definisce la lunghezza del ciclo e il punto centrale del ciclo per ogni livello di carico di lavoro, influenzando i costi globali del sistema. Infine, la "Proposed Policy" traduce queste politiche cicliche nella gestione delle scorte e della produzione, considerando i livelli attuali di inventario e la posizione della macchina per decidere le azioni operative.

L'obiettivo di queste politiche è minimizzare il costo complessivo del sistema, tenendo conto dei diversi costi associati alla produzione, all'inventario e al backordering. Sono state progettate per funzionare in situazioni di elevato carico di traffico, garantendo una gestione efficiente della produzione anche in condizioni di lavoro intenso. Il documento presenta uno studio computazionale che valuta l'efficacia di diverse politiche di gestione delle scorte e della produzione, concentrando l'attenzione sui problemi dei costi e dei tempi di setup per due e cinque prodotti.

Le politiche proposte sono valutate rispetto a politiche alternative e a una politica ottimale derivata numericamente. Si utilizzano algoritmi di programmazione dinamica e simulazioni a eventi discreti per valutare le prestazioni delle politiche in scenari con diversi livelli di traffico e costi di setup.

In conclusione, le politiche proposte dimostrano una buona adattabilità e si avvicinano all'ottimalità in varie condizioni, sebbene mostrino una leggera subottimalità in alcuni casi. Le politiche alternative esaminate non riescono a riprodurre completamente la complessità della politica ottimale e mostrano prestazioni più variabili in diverse condizioni di traffico e costi.

5.4 ADP: Approximate Dynamic Programming

La questione cruciale dell'Economic Lot Scheduling Problem (ELSP) riguarda la pianificazione ottimale della produzione di diversi articoli su una singola macchina, considerando tempi di configurazione e costi associati. Daniel Adelman e Christiane Barz [51] presentano un approccio innovativo in un recente articolo, focalizzandosi su un'euristica basata su Approximate Dynamic Programming (ADP) per costruire programmi ciclici per l'ELSP dipendenti dalla sequenza dei prodotti.

L'euristica proposta emerge come contributo significativo e competitivo rispetto agli approcci tradizionali. Si concentra sull'uso di prezzi doppi approssimati da un'euristica dinamica, offrendo un chiaro meccanismo di controllo economico. Questo metodo si distingue per l'utilizzo diretto dei parametri ottenuti dalla soluzione matematica del

problema, consentendo un'interpretazione economica chiara e facilitando la decisione di produzione.

L'articolo si discosta dalla consuetudine di utilizzare cicli specifici come rotazioni o potenze di due, puntando invece a generare sequenze di produzione ottimali attraverso un processo iterativo. Questa innovazione è supportata dall'uso di simulazioni delle politiche, consentendo una nuova prospettiva nella costruzione di programmi ciclici dinamici. Una delle sfide affrontate riguarda la gestione delle scorte per evitare esaurimenti, introdotta con un metodo di inizializzazione che stabilisce un sottoinsieme di stati noti, garantendo un programma di produzione che evita esaurimenti di scorte a lungo termine. Questo approccio dinamico permette di aggiungere stati successivi senza compromettere la gestione ottimale delle scorte nel tempo, ampliando le azioni esplorabili dall'euristica dinamica.

L'analisi computazionale dimostra l'efficacia dell'euristica proposta, superando spesso le prestazioni di altre metodologie ben consolidate come il programma di rotazione e l'euristica di Dobson. L'articolo contribuisce significativamente alla ricerca sull'ELSP, offrendo una nuova prospettiva per sviluppare euristiche più robuste e consentendo la generazione di programmi ciclici ottimali nella produzione di vari articoli, bilanciando la generazione di valore con i costi di utilizzo e configurazione della macchina.

5.5 EMQ, Dolly and Whybark & Fransoo

L'articolo di Pilar I. Vidal-Carreras & Jose P. Garcia-Sabater [52] si concentra sul Economic Lot Scheduling Problem (ELSP) con l'aggiunta della coproduzione deliberata di due prodotti diversi che devono essere fabbricati sulla stessa macchina.

La ricerca si propone di trovare politiche di programmazione ottimali che minimizzino i costi totali considerando varie variabili chiave. Tra queste variabili ci sono le scorte di inventario, che richiedono una gestione efficiente per evitare eccessi o carenze, i costi di setup associati alla preparazione della macchina per la produzione di specifici articoli, le velocità di produzione che influenzano i tempi di consegna, e la domanda prevista per i prodotti, fondamentale per la pianificazione della produzione.

Nello specifico, vengono esaminate diverse euristiche di programmazione adattate per affrontare la complessità aggiunta dalla coproduzione:

La Economic Manufacturing Quantity (EMQ) è stata originariamente progettata per gestire cicli di produzione indipendenti per ciascun articolo. L'euristica è stata modificata per gestire la coproduzione, determinando cicli ottimali per gli articoli individuali o la produzione simultanea di più articoli.

Il metodo Doll and Whybark, focalizzato sull'identificazione di cicli temporali ottimali per ciascun articolo, è stato adattato per integrare la coproduzione, calcolando i cicli considerando gli articoli coprodotti.

La politica di Fransoo, che mira a stabilire la stabilità dei tempi di ciclo, è stata adattata per gestire la coproduzione, determinando le quantità da produrre per ogni articolo o combinazione di articoli.

L'articolo introduce nuove formulazioni e modelli matematici per incorporare la coproduzione nei problemi di programmazione della produzione. Successivamente, la metodologia proposta viene testata attraverso simulazioni basate su dati modificati per riflettere la produzione con coproduzione.

L'analisi mostra che l'euristica di Fransoo sembra essere la più adatta per gestire la complessità aggiuntiva della coproduzione, poiché fornisce risultati promettenti per ridurre i costi totali di produzione. Tuttavia, l'articolo evidenzia la necessità di ulteriori ricerche per migliorare la selezione tra produzione separata o congiunta e per esaminare la coproduzione di più di due prodotti o in strutture a più fasi.

5.6 MINLP: Mixed-Integer Nonlinear Programming

Il lavoro di Alessandro Alle, Jose M. Pinto e Lazaros G. Papageorgiou [53] propone un modello di programmazione matematica per affrontare il problema dell'Economic Lot Scheduling Problem (ELSP) integrato con il decadimento delle prestazioni nel tempo. L'articolo inizia formulando il problema come una programmazione mista non lineare intera (MINLP), evidenziando la sua natura non convessa. Successivamente, il modello viene trasformato in un modello di programmazione lineare mista intera (MILP) attraverso la discretizzazione del tempo di ciclo. Il modello MILP viene poi testato su un vasto insieme di problemi generati casualmente con differenti livelli di complessità. I risultati mostrano che il modello MILP è in grado di ottenere soluzioni ottimali in tempi computazionali accettabili.

Nel contesto del problema dell'Economic Lot Scheduling (ELSP), l'obiettivo è pianificare in modo ciclico una serie di prodotti con domande continue su un orizzonte temporale infinito, al fine di minimizzare il costo totale di produzione, che comprende sia costi di setup che costi di conservazione.

Il paper discute anche approcci precedenti per risolvere l'ELSP, citando in particolare l'approccio a common cycle (CC) e l'approccio basic period (BP). L'articolo analizza i vantaggi e gli svantaggi di entrambi gli approcci (Figure 24: Approccio common cycle; Figura 25: Approccio basic period).

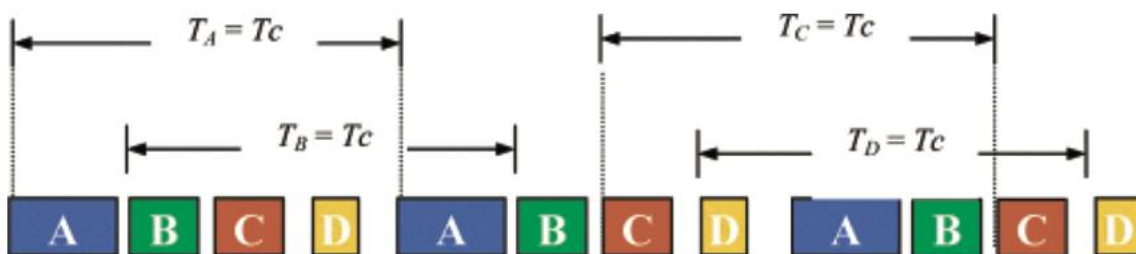


Figura 18: Approccio common cycle
Alessandro Alle, Jose M. Pinto e Lazaros G. Papageorgiou [53]

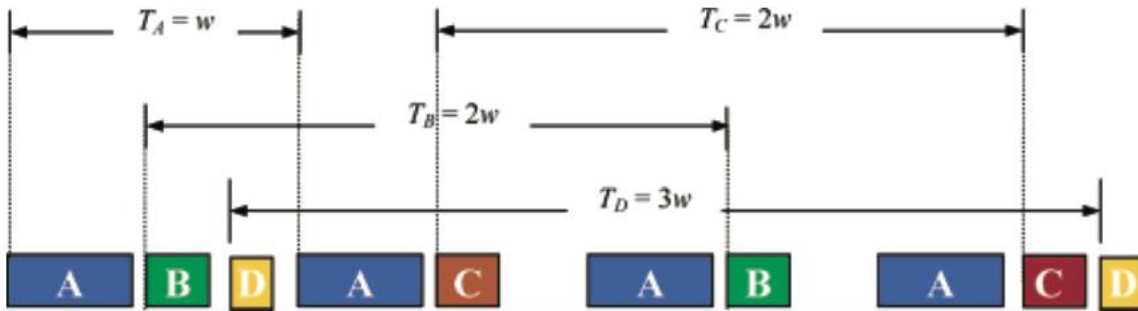


Figura 19: Approccio basic period
Alessandro Alle, Jose M. Pinto e Lazaros G. Papageorgiou [53]

Successivamente, il documento presenta un modello MINLP per risolvere l'ELSP considerando il decadimento delle prestazioni nel tempo. Tuttavia, questo modello non include i costi di inventario. A causa della complessità derivante dalla natura non lineare e non convessa dei termini associati al comportamento dinamico del sistema nel tempo di ciclo, viene proposta un'alternativa: una formulazione MILP che discretizza il tempo di ciclo. Questo nuovo modello tiene conto dei costi di inventario e di altri costi associati alla produzione ciclica dei lotti economici. I risultati dimostrano che il modello MILP può ottenere soluzioni ottimali in tempi computazionali accettabili.

Nell'articolo vengono presentate conclusioni che sottolineano l'applicabilità del modello proposto per risolvere l'ELSP con decadimento delle prestazioni e vengono evidenziati i vantaggi rispetto a un approccio gerarchico. Inoltre, si suggeriscono possibili direzioni future di ricerca, come il confronto tra la soluzione del modello MINLP non convesso e quella del modello MILP proposto, l'analisi dell'inclusione delle velocità di produzione come variabili decisionali e l'esplorazione di una versione stocastica del problema

5.7 Policy per affrontare la gestione delle materie prime

La ricerca condotta da Guillermo Gallego e Dev Joneja [54] esplora un'estensione del tradizionale problema di assegnazione di lotti economici (ELSP), concentrandosi sull'analisi della gestione delle materie prime nell'ambito della produzione di diversi elementi su una singola macchina. Il documento mira a formulare un modello di pianificazione che fornisca un limite inferiore al costo di qualsiasi politica per il problema, considerando la produzione degli elementi, la configurazione della macchina, e gli aspetti legati all'approvvigionamento delle materie prime.

Il contesto di studio riguarda la produzione sequenziale di vari elementi su una stessa struttura, con ciascuno che richiede una fase di configurazione iniziale seguita da una produzione continua. Questo ciclo produttivo può essere seguito da periodi di inattività, durante i quali la struttura non è impiegata per altri scopi. Un aspetto centrale dell'analisi è la gestione delle materie prime, con considerazioni sui costi di ordine, lavorazione e stoccaggio, essendo determinanti nei costi totali di produzione degli articoli finiti. L'applicazione di questo studio può estendersi a diversi settori industriali, come la produzione di componenti in plastica per l'industria automobilistica o l'assemblaggio di dispositivi elettronici. Il modello di pianificazione sviluppato incorpora l'approvvigionamento delle materie prime, dimostrando che le politiche di pianificazione

risultanti sono prossime all'ottimale, con un margine di scostamento massimo del 6% rispetto al limite inferiore del costo.

Tuttavia, va sottolineato che nel documento viene evidenziato un'assenza di una precisa politica di scheduling relativa alla produzione degli articoli finiti. Sebbene la fase di scheduling per la macchina (ovvero la produzione degli elementi finiti) venga menzionata e si suggerisca l'uso di un metodo euristico proposto da Dobson [riferimento a dobson] per generare un programma ciclico, non viene fornita un'analisi dettagliata su una specifica policy di scheduling. Analogamente, per la pianificazione delle materie prime, viene suggerito un approccio più semplice basato sulle quantità medie di ordine, ma senza una policy di scheduling più specifica per quest'ultime.

In conclusione, questo lavoro di ricerca costituisce un contributo significativo nel migliorare il tradizionale modello di assegnazione di lotti economici includendo rilevanti considerazioni sull'approvvigionamento delle materie prime. Le politiche di pianificazione proposte si dimostrano efficienti, tuttavia, emerge la necessità di ulteriori studi per sviluppare politiche di scheduling più precise sia per la produzione degli elementi finiti che per la gestione delle materie prime.

5.8 Programmazione ciclica di diversi articoli su singola struttura

Il paper di J. Larraneta e L. Onieva [55] si concentra sul problema di assegnazione di lotti economici (ELSP), che riguarda la programmazione ciclica della produzione di diversi articoli all'interno di una singola struttura. L'obiettivo è adattare la produzione naturale di ciascun elemento alle necessità della produzione consecutiva sulla stessa struttura, come ad esempio utilizzando una macchina per produrre diverse lavorazioni. Il modello considera diversi fattori, tra cui i costi di configurazione, i tassi di produzione, la domanda, i costi di stoccaggio e la condizione di non avere mancanze di magazzino.

L'approccio proposto ordina gli articoli in base al loro tempo economico, successivamente seleziona il gruppo più piccolo di articoli da produrre ciclicamente fino a ottenere un intervallo fondamentale praticabile. Questo procedimento è iterativo e inizia con il primo articolo, allargando progressivamente il gruppo fino a ottenere un intervallo fondamentale adeguato.

I risultati ottenuti dimostrano alcune caratteristiche significative:

- Gli articoli con tempi economici più brevi vengono prodotti con maggiore frequenza.
- L'intervallo fondamentale risultante è quasi equivalente al tempo economico del gruppo di articoli prodotti ciclicamente.
- Il gruppo di articoli prodotti ciclicamente rappresenta la più piccola selezione pratica, garantendo una differenza minima rispetto alla soluzione ottimale con un costo medio minimo.

Questo metodo, basato su semplici euristiche, fornisce soluzioni pratiche e soddisfacenti per il problema ELSP, costituendo un approccio pratico e logico per affrontare la sfida della pianificazione della produzione di diversi articoli su una singola struttura.

Conclusione

La revisione della letteratura sull'Economic Lot Scheduling Problem (ELSP) offre una panoramica ricca e approfondita degli approcci, delle sfide e delle prospettive future in questo campo di ricerca. Emergono chiaramente diverse direzioni per future indagini che potrebbero arricchire ulteriormente la comprensione e la pratica della pianificazione economica dei lotti nella produzione.

Innanzitutto, la necessità di sviluppare algoritmi più avanzati ed efficienti per risolvere l'ELSP è evidente. L'integrazione di tecniche di intelligenza artificiale potrebbe aprire nuove strade per ridurre i tempi di calcolo e affrontare soluzioni più complesse, migliorando così l'efficacia delle strategie di pianificazione.

Un'altra area di ricerca promettente è l'integrazione più approfondita della dimensione temporale ed economica nella pianificazione dei lotti. Esplorare modelli avanzati che considerino il valore del denaro nel tempo e le dinamiche temporali della produzione potrebbe offrire una visione più completa del problema e portare a soluzioni più efficaci. La gestione della qualità, specialmente in contesti di produzione non perfetta, rappresenta un'altra frontiera di ricerca importante. L'indagine su come integrare aspetti legati alla qualità nella pianificazione economica dei lotti potrebbe migliorare significativamente l'efficienza complessiva del processo produttivo.

Inoltre, la sincronizzazione nelle catene di approvvigionamento multi-stadio è cruciale e richiede ulteriori sforzi di ottimizzazione. Concentrarsi su politiche e strategie che migliorino la coerenza e l'efficienza lungo l'intera catena di approvvigionamento potrebbe portare a vantaggi significativi in termini di costi e tempi di consegna.

L'innovazione nelle politiche di pianificazione, ispirandosi a concetti come il Just-in-Time (JIT) e altre strategie emergenti nella gestione della produzione, potrebbe offrire nuove prospettive e soluzioni per affrontare le sfide dell'ELSP.

La riduzione del tempo di inattività rimane un obiettivo importante per migliorare l'efficienza della produzione. Ulteriori ricerche mirate a massimizzare l'efficienza della produzione, minimizzando i periodi di inattività e ottimizzando la sequenza di produzione, potrebbero portare a miglioramenti significativi nei risultati complessivi.

Infine, considerare gli impatti ambientali e promuovere la sostenibilità nella pianificazione economica dei lotti è cruciale per adattarsi alle esigenze attuali e future. Esplorare come le decisioni di produzione possano influenzare l'ambiente e sviluppare pratiche più sostenibili potrebbe portare a soluzioni che bilancino efficacemente le esigenze economiche con quelle ambientali.

In definitiva, la revisione della letteratura sull'ELSP evidenzia l'importanza di continuare a esplorare nuove idee e approcci per affrontare le sfide della pianificazione economica dei lotti nella produzione.

Riferimenti

- [1] Dah-Chuan Gong et al. "A Mathematical Model on an Economic Lot Scheduling Problem with Shifting Process and Joint Material Replenishment." *2013 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*. IEEE, 2013. 1219–1222. Web.
- [2] Ben-Daya, M, and M Hariga. "Economic Lot Scheduling Problem with Imperfect Production Processes." *The Journal of the Operational Research Society* 51.7 (2000): 875–881. Web.
- [3] Mokhlesian, Maryam, Seyyed Mohammad Taghi Fatemi Ghomi, and Fariborz Jolai. "Economic Lot Scheduling Problem with Consideration of Money Time Value." *International journal of industrial engineering computations* 1.2 (2010): 121–138. Web.
- [4] Jenabi, M. et al. "Two Hybrid Meta-Heuristics for the Finite Horizon ELSP in Flexible Flow Lines with Unrelated Parallel Machines." *Applied mathematics and computation* 186.1 (2007): 230–245. Web.
- [5] Torabi, S.A., S.M.T. Fatemi Ghomi, and B. Karimi. "A Hybrid Genetic Algorithm for the Finite Horizon Economic Lot and Delivery Scheduling in Supply Chains." *European journal of operational research* 173.1 (2006): 173–189. Web.
- [6] Kia, Hamidreza, Seyed Hassan Ghodsypour, and Hamid Davoudpour. "A Hybrid Imperialist Competitive Algorithm for Solving Economic Lot and Delivery Scheduling Problem in a Four-Stage Supply Chain." *Advances in mechanical engineering* 9.2 (2017): 168781401668689-. Web.
- [7] Raza, Syed Asif, and Ali Akgunduz. "The Use of Meta-Heuristics to Solve Economic Lot Scheduling Problem." *EVOLUTIONARY COMPUTATION IN COMBINATORIAL OPTIMIZATION, PROCEEDINGS*. Vol. 3448. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2005. 190–201. Web.
- [8] Clausen, Jens, and Suquan Ju. "A Hybrid Algorithm for Solving the Economic Lot and Delivery Scheduling Problem in the Common Cycle Case." *European journal of operational research* 175.2 (2006): 1141–1150. Web.
- [9] Elhafsi, Mohsen, and Sherman X. Bai. "The Common Cycle Economic Lot Scheduling Problem with Backorders: Benefits of Controllable Production Rates." *Journal of global optimization* 10.3 (1997): 283–303. Web.
- [10] Khouja, Moutaz. "The Scheduling of Economic Lot Sizes on Volume Flexible Production Systems." *International journal of production economics* 48.1 (1997): 73–86. Web.
- [11] Matthews, John P. "The Optimality of the 'Zero-Switch' Rule for a Class of Economic Lot-Scheduling Problems." *The Journal of the Operational Research Society* 39.12 (1988): 1155–1161. Web.
- [12] Ferretti, Ivan. "Multiproduct Economic Lot Scheduling Problem with Returns and Sorting Line." *Systems (Basel)* 8.2 (2020): 1–20. Web.
- [13] Tang, Ou, and Ruud Teunter. "Economic Lot Scheduling Problem with Returns." *Production and operations management* 15.4 (2006): 488–497. Web.
- [14] Huiqing Ouyang, and Xiangyang Zhu. "A Economic Lot Scheduling Problem for Manufacturing and Remanufacturing." *2008 IEEE Conference on Cybernetics and Intelligent Systems*. IEEE, 2008. 1171–1175. Web.

- [15] Ouenniche, Jamal, and Fayez F. Boctor. "The Two-Group Heuristic to Solve the Multi-Product, Economic Lot Sizing and Scheduling Problem in Flow Shops." *European journal of operational research* 129.3 (2001): 539–554. Web.
- [16] Osman, Hany, and Kudret Demirli. "Economic Lot and Delivery Scheduling Problem for Multi-Stage Supply Chains." *International journal of production economics* 136.2 (2012): 275–286. Web.
- [17] Löhndorf, Nils, and Stefan Minner. "Simulation Optimization for the Stochastic Economic Lot Scheduling Problem." *IIE transactions* 45.7 (2013): 796–810. Web.
- [18] Agnew, R A. "Economic Lot Scheduling." *APL quote quad* 17.2 (1986): 26–30. Web.
- [19] M. Heydari, B. Karimi & S.A. Torabi. "The Economic Lot Scheduling Problem in Flow Lines with Sequence-Dependent Setups." *International journal of industrial engineering & production research* 20.1 (2009): 1–10. Print.
- [21] Hennet, J.C. "A Decomposed Resolution Technique for the Cyclic Economic Lot-Sizing and Scheduling Problem." *1999 7th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation. Proceedings ETFA '99 (Cat. No.99TH8467)*. Vol. 2. IEEE, 1999. 1117–1122 Vol.2. Web.
- [22] Wagner, Bret J., Darwin J. Davis, and Hemant V. Kher. "The Production of Several Items in a Single Facility with Linearly Changing Demand Rates." *Decision sciences* 33.3 (2002): 317–346. Web.
- [23] Dousthaghi, S., and R. Tavakkoli-Moghaddam. "An Economic Lot and Delivery Scheduling Problem with the Fuzzy Shelf Life in a Flexible Job Shop with Unrelated Parallel Machines." *International journal of industrial engineering computations* 3.4 (2012): 663–680. Web.
- [24] Torabi, S. A., and M. Jenabi. "Multiple Cycle Economic Lot and Delivery-Scheduling Problem in a Two-Echelon Supply Chain." *International journal of advanced manufacturing technology* 43.7–8 (2009): 785–798. Web.
- [25] Axsater, Sven. "Alternative Dynamic Programming Approaches to Obtain Upper Bounds for the Economic Lot Scheduling Problem." *Engineering costs and production economics* 6.C (1982): 17–23. Web.
- [26] Salvietti, Luciano, and Neale R. Smith. "A Profit-Maximizing Economic Lot Scheduling Problem with Price Optimization." *European journal of operational research* 184.3 (2008): 900–914. Web.
- [27] Kelle, P., G. Clendenen, and P. Dardeau. "Economic Lot Scheduling Heuristic for Random Demands." *International journal of production economics* 35.1 (1994): 337–342. Web.
- [28] Boctor, Fayez Fouad. "A More Efficient Formulation of the Single Machine, Static Demand, Lot Scheduling Problem." *Engineering costs and production economics* 14.1 (1988): 3–10. Web.
- [29] Chan, Hing Kai, Sai Ho Chung, and Tak Ming Chan. "Combining Genetic Approach and Integer Programming to Solve Multi-Facility Economic Lot-Scheduling Problem." *Journal of intelligent manufacturing* 23.6 (2012): 2397–2405. Web.
- [30] Chatfield, Dean C. "The Economic Lot Scheduling Problem: A Pure Genetic Search Approach." *Computers & operations research* 34.10 (2007): 2865–2881. Web.

- [31] Hwang, Hark, and Dug Hee Moon. "A Production Inventory Model for Producing Two-Products at a Single Facility with Deteriorating Raw Materials." *Computers & industrial engineering* 20.1 (1991): 141–147. Web.
- [32] Chang, Yu-Jen, Shih-Chieh Chen, and Po-Yen Hsu. "A Search Algorithm for Solving the Economic Lot Scheduling Problem with Returns under the Basic Period Approach." *2011 International Conference on Management and Service Science*. IEEE, 2011. 1–4. Web.
- [33] Sun, Hainan, Huei-Chuen Huang, and Wikrom Jaruphongsas. "The Economic Lot Scheduling Problem under Extended Basic Period and Power-of-Two Policy." *Optimization letters* 4.2 (2010): 157–172. Web.
- [34] Tasgetiren, M. Fatih, Onder Bulut, and M. Murat Fadioglu. "A Discrete Artificial Bee Colony Algorithm for the Economic Lot Scheduling Problem." *2011 IEEE Congress of Evolutionary Computation (CEC)*. IEEE, 2011. 347–353. Web.
- [35] Bulut, Onder, M. Fatih Tasgetiren, and M. Murat Fadioglu. "A Genetic Algorithm for the Economic Lot Scheduling Problem under Extended Basic Period Approach and Power-of-Two Policy." *Advanced Intelligent Computing Theories and Applications. With Aspects of Artificial Intelligence*. Vol. 6839. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011. 57–65. Web.
- [36] Yao, Ming-Jong, and Jian-Xiong Huang. "Solving the Economic Lot Scheduling Problem with Deteriorating Items Using Genetic Algorithms." *Journal of food engineering* 70.3 (2005): 309–322. Web.
- [37] Peixin, Zhao, and Qi Guijie. "A Partheno-Genetic Algorithm for the Economic Lot Scheduling Problem under Power-of-Two Policy." *2008 International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering*. Vol. 3. IEEE, 2008. 301–304. Web.
- [38] Kayvanfar, V., and M. Zandieh. "The Economic Lot Scheduling Problem with Deteriorating Items and Shortage: An Imperialist Competitive Algorithm." *International journal of advanced manufacturing technology* 62.5–8 (2012): 759–773. Web.
- [39] Kuhn, Heinrich, and Thomas Liske. "An Exact Algorithm for Solving the Economic Lot and Supply Scheduling Problem Using a Power-of-Two Policy." *Computers & operations research* 51 (2014): 30–40. Web.
- [40] Yao, Ming-Jong, and S.E. Elmaghraby. "The Economic Lot Scheduling Problem under Power-of-Two Policy." *Computers & mathematics with applications (1987)* 41.10 (2001): 1379–1393. Web.
- [41] Raza, S. A., A. Akgunduz, and M. Y. Chen. "A Tabu Search Algorithm for Solving Economic Lot Scheduling Problem." *Journal of heuristics* 12.6 (2006): 413–426. Web.
- [42] Luo, Rongwu. "New Algorithm for Economic Lot Scheduling Problem." *2010 International Conference on Logistics Systems and Intelligent Management (ICLSIM)*. Vol. 1. IEEE, 2010. 334–337. Web.
- [43] Raza, Syed Asif, and Ali Akgunduz. "The Use of Meta-Heuristics to Solve Economic Lot Scheduling Problem." *EVOLUTIONARY COMPUTATION IN COMBINATORIAL OPTIMIZATION, PROCEEDINGS*. Vol. 3448. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2005. 190–201. Web.
- [44] Pesenti, Raffaele, and Walter Ukovich. "Economic Lot Scheduling on Multiple Production Lines with Resource Constraints." *International journal of production economics* 81.1 (2003): 469–481. Web.

- [45] Yu-Jen Chang, and Ming-Jong Yao. "Effectiveness Comparison of Solution Approaches for Solving the Economic Lot Scheduling Problem." *International journal of operations research* 14.4 (2017): 169–176. Print.
- [46] Ramani, S., and N. Narayanan. "Single Facility, Multi-Item Lot Sizing under Just-in-Time and 'Cyclic Scheduling for Improvement.'" *International journal of production economics* 26.1 (1992): 333–339. Web.
- [47] Hahm, Juho, and Candace Arai Yano. "The Economic Lot and Delivery Scheduling Problem: The Single Item Case." *International journal of production economics* 28.2 (1992): 235–252. Web.
- [48] Mesquita, Marco Aurélio, and João Vitor Tomotani. "Simulation-Optimization of Inventory Control of Multiple Products on a Single Machine with Sequence-Dependent Setup Times." *Computers & industrial engineering* 174 (2022): 108793-. Web.
- [49] Wagner, Michael, and Sanne R Smits. "A Local Search Algorithm for the Optimization of the Stochastic Economic Lot Scheduling Problem." *International journal of production economics* 90.3 (2004): 391–402. Web.
- [50] Markowitz, David M, Martin I Reiman, and Lawrence M Wein. "The Stochastic Economic Lot Scheduling Problem: Heavy Traffic Analysis of Dynamic Cyclic Policies." *Operations research* 48.1 (2000): 136–154. Web.
- [51] Adelman, Daniel, and Christiane Barz. "A Price-Directed Heuristic for the Economic Lot Scheduling Problem." *IIE transactions* 46.12 (2014): 1343–1356. Web.
- [52] Vidal-Carreras, Pilar I., and José Pedro García Sabater. "Comparison of heuristics for an economic lot scheduling problem with deliberated coproduction." *Journal of industrial engineering and management* 2.3 (2009): 437–463. Web.
- [53] Alle, Alessandro, Jose M Pinto, and Lazaros G Papageorgiou. "The Economic Lot Scheduling Problem under Performance Decay." *Industrial & engineering chemistry research* 43.20 (2004): 6463–6475. Web.
- [54] Gallego, Guillermo, and Dev Joneja. "Economic Lot Scheduling Problem with Raw Material Considerations." *Operations research* 42.1 (1994): 92–101. Web.
- [55] Larrañeta, J., and L. Onieva. "The Economic Lot-Scheduling Problem: A Simple Approach." *The Journal of the Operational Research Society* 39.4 (1988): 373–379. Web.