



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in
Ingegneria Gestionale (LM-31)
A.a 2025/2026
Sessione di Laurea Marzo/Aprile 2026

**Analisi e Simulazione dell'Economic Lot
Scheduling Problem:
Creazione di un modello**

Relatori:

Alfieri Arianna
Castiglione Claudio
Pastore Erica

Candidato:

Giacalone Davide

Indice

Introduzione.....	3
Revisione della letteratura.....	6
Descrizione del modello simulato.....	11
KPI scelti.....	16
Impostazioni della simulazione.....	19
Scenari.....	21
Confronto tra scenari.....	33
Conclusioni e sviluppi futuri.....	39
Appendice.....	43

1.Introduzione

L'Economic Lot Scheduling Problem (ELSP) rappresenta uno dei temi centrali nell'ambito della gestione della produzione e della pianificazione dei sistemi manifatturieri. Nel corso degli ultimi decenni, questo problema ha attirato un crescente interesse da parte della comunità scientifica, dando origine a un ampio corpus di letteratura volto allo studio di modelli, strategie e politiche in grado di ottimizzare i processi produttivi in presenza di vincoli di capacità.

L'ELSP nasce dall'esigenza di gestire sistemi produttivi reali caratterizzati dalla produzione di più articoli su una risorsa a capacità limitata, in presenza di tempi di setup non trascurabili. Il problema si colloca all'intersezione tra due ambiti fondamentali della gestione della produzione: da un lato, le problematiche di determinazione delle quantità economiche di produzione, riconducibili ai modelli di lot sizing come l'Economic Order Quantity (EOQ), e dall'altro le questioni legate alla sequenza e alla schedulazione delle lavorazioni tipiche dei sistemi multi-prodotto. La ricerca operativa interviene come disciplina di supporto, fornendo strumenti di modellizzazione e metodi di risoluzione che consentono di formalizzare il problema e di individuare soluzioni più efficienti, pur non rappresentando l'unico approccio possibile alla sua analisi.

A differenza dei modelli classici di gestione delle scorte, l'ELSP affronta il caso in cui più prodotti devono essere pianificati e prodotti su una risorsa produttiva condivisa, caratterizzata da capacità limitata e da tempi di setup non trascurabili. In tale contesto, le decisioni relative alla dimensione dei lotti di produzione non possono essere considerate indipendentemente dalle decisioni di schedulazione temporale.

Il problema si concentra quindi sulla determinazione congiunta delle quantità di produzione e dei tempi di avvio dei lotti, con l'obiettivo di minimizzare i costi complessivi del sistema. Tali costi includono tipicamente i costi di setup, i costi di mantenimento delle scorte e, in alcuni casi, costi legati a carenze o rilavorazioni. La presenza simultanea di questi elementi rende l'ELSP particolarmente complesso.

Gli approcci sviluppati per l'ELSP risultano particolarmente rilevanti nei contesti produttivi caratterizzati da domanda relativamente stabile ma da elevata competizione per la capacità produttiva. In tali situazioni, una pianificazione integrata della produzione e degli approvvigionamenti diventa essenziale per reagire in modo efficace

alle variazioni della domanda per evitare costi eccessivamente derivanti sia dall'accumulo di scorte sia dal rischio di stockout. La gestione ottimale dei lotti di produzione assume quindi un ruolo strategico nel garantire continuità operativa e livelli di servizio adeguati.

La sfida principale dell'ELSP risiede nella necessità di coordinare le produzioni di più articoli all'interno di un unico sistema produttivo, evitando conflitti di capacità e garantendo al contempo la fattibilità del piano di produzione. Questo aspetto distingue l'ELSP dai modelli tradizionali di lot sizing, non perché introduca la dimensione temporale in senso stretto – già presente, ad esempio, nell'EOQ attraverso il tasso di domanda e l'orizzonte temporale – ma perché integra esplicitamente la decisione sulla sequenza di produzione su una risorsa a capacità limitata. Nell'ELSP, infatti, non si tratta soltanto di determinare la quantità ottimale da produrre, ma anche stabilire l'ordine e la frequenza con cui i diversi prodotti vengono lavorati nel tempo, tenendo conto dei tempi di setup e dei vincoli di capacità.

La presente tesi si propone di analizzare l'Economic Lot Scheduling Problem attraverso un approccio simulativo, con l'obiettivo di studiare il comportamento dinamico di un sistema produttivo multiprodotto soggetto a vincoli di capacità. Sulla base del modello sviluppato, vengono quindi analizzati diversi scenari produttivi, ottenuti variando i principali parametri di pianificazione e di controllo del sistema. Il confronto tra gli scenari consente di valutare l'impatto delle diverse configurazioni sulle performance operative, mettendo in evidenza i trade-off esistenti tra efficienza produttiva, livelli di scorta e stabilità del sistema.

L'approccio adottato permette di offrire una visione più realistica e dinamica del comportamento del sistema produttivo. Nel Capitolo 2 viene presentata la revisione della letteratura prendendo in esame 21 contributi scientifici sviluppati da diversi ricercatori nel corso degli anni.

Nel capitolo 3 vengono illustrate le ipotesi assunte, la struttura del flusso produttivo e la logica di implementazione del modello sviluppato in Arena, descrivendone i principali moduli e il funzionamento complessivo.

Il capitolo 4 presenta gli indicatori di performance operativa ed economica utilizzati per valutare per il sistema, spiegandone il significato e le modalità di calcolo all'interno del modello.

Nel capitolo 5 viene descritta l'impostazione della simulazione, con particolare riferimento alla durata della run, alla determinazione del periodo di warm-up e al

numero di repliche effettuate.

Il Capitolo 6 analizza e confronta le diverse configurazioni simulate, evidenziando l'impatto delle variazioni introdotte in termini di prestazioni operative e costi.

Infine, il capitolo 7 vengono sintetizzati i principali risultati ottenuti e delineate possibili estensioni del modello e linee di ricerca future.

2.Revisione della letteratura

I primi studi sulla pianificazione della produzione e sulla gestione delle scorte si sono concentrati principalmente su modelli di lot sizing per singolo prodotto, nei quali le decisioni di produzione o approvvigionamento venivano prese ipotizzando una capacità produttiva non vincolante. In questo contesto si colloca il noto modello dell'Economic Order Quantity (EOQ), che fornisce una soluzione analitica elegante per il bilanciamento tra costi di ordinazione e costi di mantenimento delle scorte. Il modello si basa su ipotesi strutturali ben definite – tra cui domanda deterministica e costante, assenza di vincoli di capacità e tempi di approvvigionamento noti – che lo rendono particolarmente adatto a contesti monoprodotto e a sistemi nei quali la capacità non rappresenta un vincolo operativo.

Tali modelli, pur risultando efficaci in contesti semplici, mostrano evidenti limiti quando applicati a sistemi produttivi reali [1],[2], nei quali più articoli devono essere lavorati utilizzando le stesse risorse produttive. In presenza di una capacità limitata, la pianificazione indipendente dei lotti per ciascun prodotto porta frequentemente a soluzioni che non possono essere realizzate operativamente, poiché i cicli produttivi ottimali dei diversi articoli tendono a sovrapporsi nel tempo[2].

Questa discrepanza tra i modelli teorici e le effettive condizioni operative ha reso necessario lo sviluppo di approcci in grado di integrare le decisioni di dimensionamento dei lotti con quelle di schedulazione temporale, dando origine a una nuova classe di problemi più complessi e aderenti alla realtà industriale [1],[3].

L'ELSP nasce proprio dall'esigenza di superare i limiti dei modelli classici di lot sizing in contesti multiprodotto. In termini generali, l'ELSP riguarda la pianificazione della produzione di più articoli su una singola risorsa condivisa a capacità limitata, integrando simultaneamente le decisioni relative alle quantità da produrre, alla frequenza di produzione e alla sequenza con cui i diversi prodotti vengono lavorati nel tempo. A differenza di un semplice problema di lot sizing con vincoli di capacità, l'ELSP incorpora esplicitamente il problema del sequenziamento ciclico dei prodotti, rendendo necessario stabilire non solo quanto produrre, ma anche in quale ordine e con quale periodicità ciascun articolo debba essere realizzato.

Il primo contributo riconducibile a questo filone è attribuito a Rogers (1958) [1] che evidenzia come l'applicazione diretta del modello EOQ a ciascun prodotto risulti

inadeguata quando le produzioni devono essere coordinate su una risorsa condivisa.

Rogers osserva che la presenza di una capacità limitata introduce un problema di sincronizzazione tra i cicli produttivi, rendendo necessario un approccio integrato alla pianificazione.

Sebbene tale lavoro non presenti una formulazione matematica completa nel senso moderno del termine, esso introduce un elemento concettuale fondamentale: le decisioni relative alla dimensione dei lotti e quelle relative alla loro collocazione temporale sono strettamente interdipendenti e non possono essere trattate separatamente.

Un passo decisivo verso la formalizzazione dell'ELSP viene compiuto da Bomberger (1966) [2], che propone una delle prime strutturazioni sistematiche del problema.

L'autore introduce l'idea di organizzare la produzione secondo uno schema ciclico, ipotizzando che il sistema operi in modo ripetitivo nel tempo.

L'introduzione di una struttura ciclica consente di:

- Coordinare le produzioni dei diversi articoli;
- Evitare conflitti nell'utilizzo della risorsa produttiva;
- Semplificare l'analisi dei costi complessivi del sistema.

In particolare, Bomberger propone il concetto di Basic Period, imponendo che i cicli produttivi dei singoli prodotti siano multipli interi di tale periodo. Questa impostazione garantisce la fattibilità del piano produttivo, ma introduce anche una certa rigidità che caratterizzerà molte delle soluzioni successive.

Nel corso degli anni successivi, l'ELSP viene oggetto di numerosi studi, ma è il lavoro di Elmaghraby (1978) [3] a rappresentare un punto di riferimento fondamentale per la sistematizzazione del problema. In una delle prime revisione organiche della letteratura, l'autore analizza criticamente i contributi sviluppati fino a quel momento, mettendo in evidenza le principali difficoltà teoriche e operative dell'ELSP.

Elmaghraby sottolinea come:

- I vincoli di capacità e sincronizzazione siano difficilmente rappresentabili in forma analitica;
- La funzione obiettivo del problema risulti non convessa;
- Molte delle soluzioni proposte si basano su ipotesi semplificative per garantire la fattibilità

Questo lavoro contribuisce a chiarire che l'ELSP, nella sua formulazione generale, è un problema estremamente complesso, per il quale risulta necessario adottare strutture di pianificazione vincolate, come quella basate sui cicli produttivi.

Un ulteriore contributo rilevante alla comprensione dell'ELSP è fornito dalla dimostrazione della sua complessità computazionale. Hsu (1983) [4] dimostra che l'ELSP è un problema NP-hard, anche sotto ipotesi restrittive, a causa della combinazione dei vincoli di capacità con quelli di sincronizzazione temporale. Questo risultato ha un impatto significativo sulla letteratura successiva, poiché giustifica l'impossibilità di sviluppare algoritmi esatti efficienti per il problema generale e spiega perché la maggior parte degli studi successivi si concentri su:

- Approcci euristici, volti a individuare soluzioni di buona qualità in tempi computazionali contenuti;
- Politiche di schedulazione strutturale, ossia regole di pianificazione che impongono una struttura predefinita al ciclo produttivo (ad esempio Common Cycle, Basic Period o Power of two), riducendo lo spazio delle soluzioni ammissibili e rendendo il problema trattabile;
- Modelli approssimati o semplificati, che introducono ipotesi restrittive per ottenere formulazioni analiticamente risolvibili.

Le politiche strutturali, in particolare, non cercando la soluzione ottima nel senso generale del problema, ma vincolano il sistema a seguire uno schema ciclico predeterminato, trasformando un problema di schedulazione complesso in un problema parametrico più gestibile.

Di conseguenza, l'attenzione della ricerca si sposta progressivamente dalla ricerca dell'ottimo globale alla definizione di soluzioni praticabili e robuste dal punto di vista operativo.

Per rendere l'ELSP affrontabile in contesti reali, la letteratura introduce diverse politiche di schedulazione, basate sull'imposizione di strutture cicliche alla produzione [3],[8],[16]. Queste politiche permettono di ridurre la complessità del problema, mantenendo al contempo il rispetto dei vincoli di capacità. Tali politiche non rappresentano soluzioni universali, ma piuttosto differenti compromessi tra flessibilità, semplicità di implementazione e qualità della soluzione ottenuta [7],[8].

Una delle politiche più semplici e al tempo stesso più studiate è il Common Cycle

[3],[9]. In questo approccio si assume che tutti i prodotti vengano realizzati secondo un unico ciclo produttivo comune, che si ripete indefinitamente nel tempo. All'interno di ciascun ciclo, ogni prodotto viene fabbricato una sola volta, con una quantità proporzionale alla domanda durante il ciclo stesso. L'imposizione di un ciclo comune consente di eliminare completamente i problemi di sincronizzazione tra le produzioni, garantendo la fattibilità del piano per costruzione. [3] Tuttavia, questa semplicità strutturale può comportare livelli di inventario più elevati, soprattutto nel caso di prodotti con domande molto eterogenee [8].

Un'evoluzione concettuale del Common Cycle è rappresentata dalla politica del Basic Period [3],[8]. In questo caso, la produzione è organizzata a partire da un periodo base, rispetto al quale i cicli di produzione dei singoli prodotti devono essere multipli interi. Tale approccio introduce una maggiore flessibilità rispetto al ciclo comune, consentendo a prodotti diversi di avere cicli di lunghezza differente, pur mantenendo una struttura temporale ordinata. Tuttavia, la necessità di rispettare relazioni di multiplo intero rende il problema più complesso dal punto di vista computazionale [4],[8] e può rendere non immediata la verifica della fattibilità del piano produttivo.

A partire dal Basic Period, la letteratura ha proposto ulteriori estensioni, tra cui l'Extended Basic Period [8],[16]. Questa politica consente una maggiore articolazione della schedulazione, permettendo di rilassare alcune delle ipotesi restrittive del modello base. L'Extended Basic Period mira a migliorare l'efficienza del sistema riducendo i livelli medi di inventario, ma introduce al contempo un aumento della complessità modellistica [16], rendendo più difficile sia l'analisi teorica sia implementazione pratica.

Un altro filone di ricerca riguarda le politiche Time Varying Lot Size. In questi approcci, la dimensione dei lotti e i tempi di produzione non sono costanti, ma possono variare nel tempo per adattarsi a cambiamenti della domanda o ad altre condizioni operative [5], [16]. Sebbene tali politiche offrano una maggiore flessibilità e possano teoricamente portare soluzioni più efficienti, esse risultano spesso difficili da gestire dal punto di vista operativo e computazionale, soprattutto in sistemi produttivi complessi.

Infine, merita particolare attenzione la Power of two policy, che rappresenta un compromesso tra la rigidità del Common Cycle e la flessibilità del Basic Period [8], [9]. In questo approccio i cicli di produzione dei prodotti sono vincolati a essere potenze di due di un ciclo base. Questa struttura consente di mantenere una sincronizzazione

regolare delle produzioni, semplificando la schedulazione, e allo stesso tempo di ridurre i livelli di inventario rispetto al Common Cycle puro[8]. La power of two policy è stata ampiamente studiata come una soluzione struttura ed efficiente, sebbene anch'essa presenti una complessità superiore rispetto al ciclo comune[8].

Nel complesso, queste politiche rappresentano differenti strategie per affrontare l'ELSP, ciascuna con specifici punti di forza e limiti. La scelta dell'approccio più adatto dipende dal contesto produttivo, dagli obiettivi dell'analisi e dal livello di dettaglio richiesto.

Nonostante i significativi progressi tecnici, i modelli analitici dell'ELSP si basano spesso su ipotesi fortemente semplificative, come la domanda perfettamente deterministica e l'assenza di variabilità nei tempi di processo. Tali ipotesi limitano la capacità dei modelli di rappresentare il comportamento reale dei sistemi produttivi.

Per questo motivo, negli ultimi anni si è affermata l'esigenza di affiancare agli approcci analitici strumenti in grado di catturare la dinamicità dei sistemi produttivi[16],[21]. In questo contesto, la simulazione a eventi discreti rappresenta uno strumento particolarmente efficace per analizzare l'ELSP, consentendo di valutare le prestazioni operative del sistema attraverso opportuni indicatori e di confrontare differenti scenari produttivi.

3. Descrizione del modello simulato

La presente tesi adotta un approccio simulativo, con l'obiettivo di analizzare l'ELSP da un punto di vista operativo e dinamico. In particolare, viene sviluppato un modello di simulazione a eventi discreti mediante il software Arena, al fine di rappresentare il funzionamento di un sistema produttivo multiprodotto soggetto a vincoli di capacità e a una specifica logica di pianificazione.

Il modello di simulazione sviluppato (Figura 3) nel presente lavoro rappresenta un flusso logistico-produttivo orientato al recupero di materiali provenienti da prodotti a fine vita, con successiva trasformazione in nuovi prodotti finiti. Il caso di studio costruito rappresenta un sistema in cui il flusso prende in ingresso due tipologie di prodotti a fine vita: jeans e borse. Tali prodotti vengono inizialmente sottoposti ad una fase di disassemblaggio, finalizzata al recupero dei componenti riutilizzabili. In particolare, dal disassemblaggio si ottengono:

- Per ciascun Jeans a fine vita: 3 pezze di tessuto denim e 1 zip
- Per ciascuna borsa a fine vita: 2 pezze di cuoio e 1 zip

I componenti recuperati costituiscono gli input del processo produttivo vero e proprio e vengono instradati alle fasi successive del flusso logistico simulato.

Una volta completata la fase di disassemblaggio, le pezze di materiale recuperate vengono inviate a una macchina di taglio, che rappresenta la prima fase di lavorazione del processo produttivo. Questa macchina trasforma le materie prime recuperate in semilavorati, pronti per la fase finale di assemblaggio.

In particolare:

- Da una pezza di jeans vengono ricavati due semilavorati di borsetta;
- Da una pezza di cuoio vengono ricavati due semilavorati di portafoglio.

La fase di taglio introduce quindi una trasformazione quantitativa dei materiali, aumentando il numero di unità disponibili per le lavorazioni successive e influenzando direttamente il bilanciamento dei flussi nel sistema.

I semilavorati generati dalla fase di taglio vengono successivamente inviati all'ultima risorsa produttiva del sistema, rappresentata dalla macchina di cucitura. Questa

macchina realizza l'assemblaggio finale dei prodotti, combinando i semilavorati con i componenti accessori recuperati durante il disassemblaggio.

In particolare:

- Un semilavorato di borsetta e una zip vengono utilizzati per ottenere una borsetta di jeans;
- Un semilavorato di portafoglio consente di ottenere un portafoglio.

La fase di cucitura rappresenta il completamento del ciclo produttivo e determina l'output finale del sistema. I prodotti finiti vengono quindi contabilizzati ai fini dell'analisi delle prestazioni e utilizzati per il calcolo dei KPI definiti nei capitoli successivi.

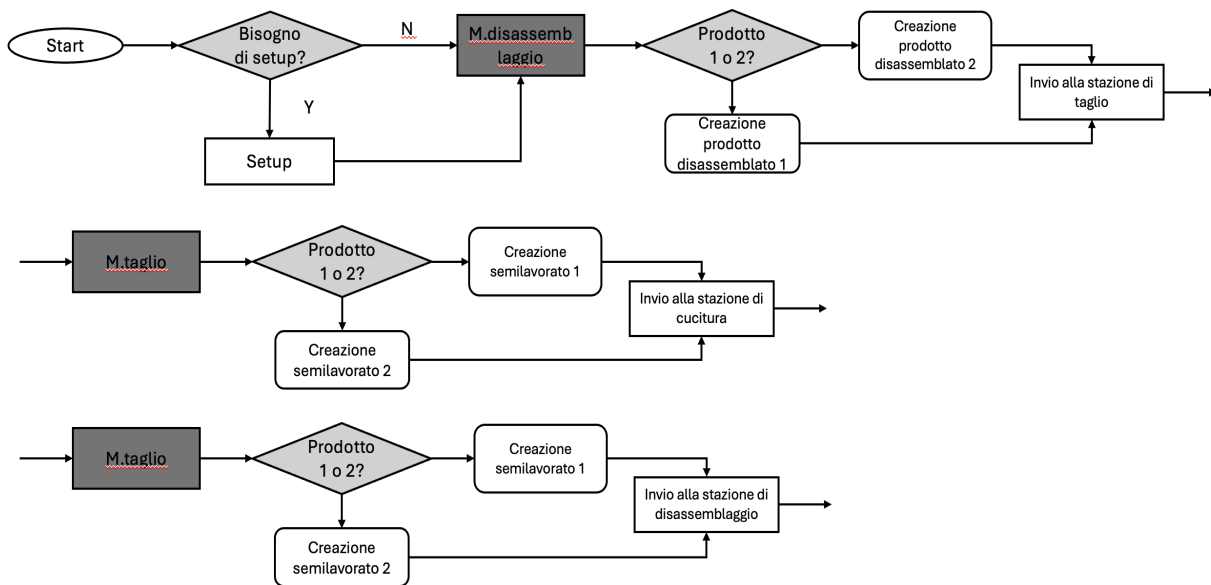


Figura 3 FlowChart modello

3.1 Integrazione dell'ELSP nel modello

La sola fase di disassemblaggio è governata da una logica di pianificazione coerente con l'Economic Lot Scheduling Problem. In particolare, il disassemblaggio dei prodotti a fine vita avviene su una risorsa condivisa, soggetta a tempi di setup, e segue una pianificazione di tipo Common Cycle.

All'interno di ciascun ciclo produttivo:

- Viene realizzato un lotto di jeans a fine vita;
- Successivamente, viene realizzato un lotto di borse a fine vita.

Il ciclo viene ripetuto nel tempo mantenendo costante la sequenza produttiva. Ogni passaggio da una tipologia di prodotto all'altra comporta un tempo di setup, durante il quale la risorsa non è operativa. Questa impostazione consente di analizzare in modo esplicito l'impatto della dimensione dei lotti e dei setup sulle prestazioni complessive del sistema.

3.2 Ipotesi assunte

Il sistema oggetto di studio è stato modellato mediante simulazione a eventi discreti, introducendo alcune ipotesi di base necessarie a rendere il problema. Tali ipotesi consentono di focalizzare l'attenzione sugli aspetti di pianificazione del disassemblaggio e sulle dinamiche dei flussi di materiale all'interno del sistema. Si assume innanzitutto che i prodotti a fine vita, identificati come jeans e borse, siano disponibili in quantità tali da non costituire un vincolo per il processo. Il sistema modellato è quindi configurato come capacity-constrained, in cui il limite alla produzione è rappresentato esclusivamente dalla capacità delle risorse interne (disassemblaggio, taglio e cucitura), e non dalla disponibilità di input o dalla domanda di mercato.

Il modello non considera pertanto problematiche legate all'approvvigionamento a monte o alla raccolta dei prodotti dismessi, concentrandosi esclusivamente sulla gestione e pianificazione delle risorse produttive interne.

I tempi associati alle diverse fasi del processo, ossia disassemblaggio, taglio e cucitura, sono assunti deterministici e costanti. Questa scelta consente di limitare la variabilità del sistema e di analizzare in modo più diretto l'impatto delle politiche di pianificazione,

dei setup e della struttura dei flussi sulle prestazioni operative.

Dal disassemblaggio si ottengono componenti riutilizzabili, in particolare pezze di tessuto, pezze di cuoio e zip, che alimentano le fasi produttive a valle. Le lavorazioni di taglio e cucitura sono modellate come processi sequenziali successivi al disassemblaggio e non sono soggette a politiche di schedulazione di tipo ELSP. Esse operano in funzione della disponibilità dei componenti e dei semilavorati generati nelle fasi precedenti.

Le scorte di componenti e di semilavorati sono modellate come variabili di stato aggiornate esclusivamente al verificarsi di eventi produttivi (ad esempio completamento di un'operazione o avvio di una nuova lavorazione). Coerentemente con l'approccio a eventi discreti adottato in Arena, i livelli di inventario non evolvono in modo continuo nel tempo, ma vengono modificati solo quando il sistema subisce una variazione operativa.

Si assume inoltre che durante il processo non si generino scarti, che tutti i componenti recuperati siano idonei all'utilizzo nelle fasi a valle e che le risorse produttive non siano soggette a guasti o interruzioni. Gli spazi di stoccaggio intermedi sono considerati sufficientemente ampi da non introdurre ulteriori vincoli di capacità.

La domanda dei prodotti finiti non viene modellata in modo esplicito. Si assume che tutti i prodotti realizzati vengano immediatamente assorbiti, così da poter analizzare il sistema in condizioni a regime e concentrare l'attenzione sulle prestazioni interne del flusso produttivo, senza introdurre ulteriori elementi di complessità legati alla gestione degli ordini o clienti.

Sono presenti anche attività di trasporto interno tra le diverse fasi del processo, implementate tramite i moduli di trasporto di Arena. Tali attività hanno una funzione esclusivamente strutturale e servono a collegare in modo coerente le diverse stazioni del sistema. I tempi di trasporto sono trascurabili rispetto ai dei tempi di lavorazione e dei tempi di setup. Di conseguenza, il contributo dei trasporti al tempo complessivo di attraversamento del sistema è considerato non significativo e non influisce in modo apprezzabile sui risultati della simulazione. Questa ipotesi consente di mantenere l'attenzione focalizzata sugli elementi centrali dell'analisi, ossia la pianificazione del disassemblaggio, i tempi di setup e l'utilizzo della capacità produttiva, evitando di introdurre ulteriori fonti di variabilità non rilevanti per gli obiettivi dello studio.

Infine, si assume che il sistema operi secondo un calendario di lavoro settimanale, con attività svolte dal lunedì al venerdì nella fascia oraria compresa tra le 9:00 e le 18:00

[Appendice A – Figura 2]. Al di fuori di tali orari, le risorse sono considerate inattive e non disponibili per le lavorazioni. Poiché il sistema rappresenta un processo produttivo operativo in modo continuativo, la simulazione è impostata come analisi di tipo a regime, escludendo la fase iniziale e transitorio tramite un periodo di warm-up.

4. KPI scelti

Al fine di valutare le prestazioni del sistema simulato, sono stati definiti alcuni Key Performance Indicators (KPI) ritenuti maggiormente significativi rispetto agli obiettivi dell'analisi:

- Throughput settimanale;
- Lead Time;
- Vendite Perse;
- Numero Setup;
- Utilizzazione risorsa disassemblaggio.

L'interpretazione dei risultati consente di analizzare l'impatto delle politiche di pianificazione adottate sul comportamento complessivo del sistema.

Il throughput settimanale misura il numero di prodotti finiti completati nell'arco di una settimana lavorativa.

Il Lead Time rappresenta il tempo medio di attraversamento di un lotto all'interno del sistema, dalla fase di disassemblaggio fino all'ottenimento del prodotto finito. Nel modello, esso viene calcolato misurando il tempo trascorso tra l'ingresso dell'entità nella fase di disassemblaggio e il completamento della fase di cucitura.

Il Lead Time è calcolato separatamente per ciascuna tipologia di prodotto, consentendo di confrontare il comportamento delle due famiglie lungo l'intero flusso produttivo.

Questo indicatore è particolarmente utile per valutare l'effetto delle scelte di pianificazione sul livello di servizio e sulla rapidità di risposta del sistema.

Le vendite perse rappresentano la quota di domanda che il sistema non riesce a soddisfare entro l'orizzonte di riferimento. Nel modello, questo indicatore è calcolato confrontando la produzione effettiva dei prodotti finiti con un livello di domanda prefissato. La differenza tra domanda e output realizzato viene interpretata come vendite non soddisfatte.

L'introduzione di questo KPI consente di tradurre le prestazioni operative del sistema in termini più dal punto di vista economico, evidenziando l'impatto delle politiche di pianificazione non solo sull'efficienza interna, ma anche sulla capacità di soddisfare il mercato.

Il numero di setup indica quante volte la risorsa di disassemblaggio viene riconfigurata per il passaggio da una tipologia di prodotto all'altra.

A partire dal numero di setup, viene calcolato il costo totale di setup, moltiplicando il numero di riconfigurazioni per un costo unitario di setup assunto a priori. Questo indicatore consente di valutare l'impatto economico delle scelte di pianificazione e di confrontare scenari alternativi non solo in termini temporali, ma anche in termini di costo.

L'Utilizzo della risorsa di disassemblaggio misura la frazione di tempo in cui la macchina risulta occupata rispetto al tempo totale disponibile. Nel modello, questo indicatore include sia il tempo di lavorazione sia il tempo di setup, poiché entrambi impegnano la risorsa. Valori elevati indicano un utilizzo intenso della capacità disponibile, mentre valori più bassi possono evidenziare inefficienze legate alla pianificazione o alla struttura del flusso.

Al fine di arricchire l'analisi e rendere più immediata l'interpretazione dei risultati, nel modello sono stati introdotti anche alcuni elementi di costo, utilizzati come supporto alla valutazione dei diversi scenari. L'obiettivo non è quello di sviluppare un'analisi economica dettagliata, ma di fornire una lettura dei risultati in termini comparativi, coerente con le scelte operative simulate.

In particolare, sono stati considerati:

- Il costo di produzione, associato alla realizzazione dei prodotti finiti e proporzionale al numero di unità prodotte;
- Il costo di mantenimento a scorta, legato alla permanenza dei materiali all'interno del sistema, in particolare per quanto riguarda componenti e semilavorati;
- Il costo delle vendite perse, derivante dal mancato soddisfacimento della domanda rispetto alla produzione effettivamente realizzata.

I costi di produzione e di mantenimento a scorta consentono di valutare l'effetto delle politiche di pianificazione non solo in termini di capacità e flusso, ma anche rispetto all'accumulo di materiali nel sistema, che rappresenta uno degli elementi centrali del trade-off tipico dell'ELSP.

Analogamente, il costo delle vendite perse permette di collegare le prestazioni operative del sistema al livello di servizio, evidenziando l'impatto che una pianificazione non adeguata può avere sulla capacità di soddisfare la domanda.

Tutti i costi introdotti nel modello vengono utilizzati per confrontare i diversi scenari simulati su una base omogenea. I valori assoluti non rappresentano stime reali, ma consentono di evidenziare in modo chiaro i trade-off tra produttività, frequenza dei setup, livello delle scorte e livello di servizio.

5. Impostazione della simulazione

La simulazione è stata eseguita su un orizzonte temporale complessivo di 365 giorni di calendario, con unità di tempo di base espresse in ore. Le risorse produttive operano secondo il calendario di lavoro definito nel modello, mentre il tempo di simulazione evolve in modo continuo. Al fine di garantire che i risultati analizzati siano rappresentativi del comportamento del sistema in condizioni di regime, è stato introdotto un periodo di transitorio, durante il quale le statistiche raccolte non vengono considerate.

La durata del warm-up non è stata fissata in modo arbitrario, ma è stata determinata mediante un'analisi di sensibilità, valutando l'andamento dei principali KPI al variare della lunghezza del periodo di warm-up. In particolare, sono stati monitorati:

- Utilizzo della risorsa di disassemblaggio;
- Throughput settimanale;
- Lead time di produzione del lotto, calcolato per ciascuna tipologia di prodotto.

I risultati di questa analisi [figura 4], riportati nella relativa tabella di confronto, mostrano che l'utilizzazione della risorsa di disassemblaggio oscilla stabilmente intorno a valori compresi tra il 31% e il 33% già a partire da warm-up di circa 14-28 giorni, senza evidenziare trend sistematici. Analogamente, il throughput settimanale per entrambe le tipologie di prodotto risulta stabile a partire da warm-up compresi tra 28 e 42 giorni, con variazioni riconducibili a normali oscillazioni e non a effetti transitori.

Il lead time, pur essendo stato monitorato, non è stato utilizzato come indicatore primario per la scelta del warm-up, in quanto risulta più rumoroso e sensibile alla dinamica interna del sistema, rendendo meno indicativo per l'individuazione del termine della fase transitoria.

Dall'analisi complessiva emerge che, a partire da un warm-up di 42 giorni, tutti i KPI rilevanti non mostrano più dipendenza dalle condizioni iniziali e oscillano attorno a valori medi stabili. Per valori superiori, non si osservano miglioramenti significativi nella stabilità dei risultati, mentre un warm-up eccessivamente lungo comporterebbe una riduzione non necessaria dell'orizzonte utile di osservazione.

WARM UP	Lead time produzione x lotto [giorni]		Troughput settimanale		Utilizationscheduled disassembly	
	PF1	PF2	PF1	PF2	TOTAL	
0 DAYS	58,6	59	57	85	32%	WARM UP
14 DAYS	59,4	59,6	56,4	85,2	31,8	
28 DAYS	59,5	60	56,25	84,375	31,7	
42 DAYS	59,2	59,7	56,52173913	84,7826087	31,9	
60 days	58,4	58,9	56,81818182	85,22727273	32,4	
74 DAYS	58,3	58,8	56,66666667	85	32,3	
88 DAYS	57,8	58,3	57	85,5	32,5	
102 DAYS	57,8	57,8	56,84210526	85,26315789	32,4	
116 DAYS	58,9	59,6	55,55555556	83,33333333	32,1	
130 DAYS	59,7	60	54,70588235	82,94117647	31,6	
158 DAYS	58,2	59	56,66666667	85	32,5	
182 DAYS	57,8	57,8	58,46153846	87,69230769	33	
210 DAYS	59,1	60,2	56,36363636	84,54545455	32	
238 DAYS	59	60,3	56,66666667	85	32,1	
266 DAYS	56	58	58,57142857	87,85714286	33,2	
280 DAYS	57,7	58,8	58,33333333	90	33,2	
294 DAYS	63,4	61	54	81	31	
322 DAYS	62	66	53,33333333	80	30,8	
336 DAYS	57,7	63,6	55	82,5	32,1	
350 DAYS	50	60,6	60	90	35	

Figura 4 Calcolo Warm up

Sulla base delle considerazioni precedenti, il periodo di warm-up è stato fissato pari a 42 giorni.

La simulazione è pertanto impostata come segue:

- Run length: 365 giorni
- Warm-up: 42 giorni

6. Scenari

Al fine di valutare l'impatto delle scelte di pianificazione ELSP sulle prestazioni operative ed economiche del sistema, sono stati analizzati sei scenari distinti, costruendo mantenendo invariati i parametri tecnologici ed economici del modello e modificando esclusivamente le variabili di pianificazione. In particolare, i tempi di lavorazione, tempi di setup, costi unitari, prezzi di vendita e struttura del sistema produttivo rimangono costanti in tutte le configurazioni, così da isolare l'effetto delle sole decisioni di pianificazione.

Lo scenario AS-IS rappresenta la configurazione di riferimento ed è caratterizzato dal periodo di pianificazione minimo, che comporta la massima frequenza di setup . Gli scenari successivi introducono variazioni controllate:

- Scenario 1 e Scenario 2: incremento progressivo del periodo di pianificazione T , al fine di analizzare il trade-off tra riduzione dei setup e livello di servizio;
- Scenario 3: mantenimento della struttura AS-IS ma introduzione di domanda variabile, per valutare la robustezza del sistema in presenza di picchi;
- Scenario 4 e Scenario 5: inversione della sequenza produttiva rispetto agli scenari con medesimo T , per analizzare l'effetto dell'ordine di produzione sulle prestazioni.

Gli scenari non rappresentano configurazioni progettuali (TO-BE) , bensì esperimenti controllati finalizzati a comprendere come il sistema reagisce al variare del periodo di pianificazione e della sequenza produttiva, in termini di setup, throughput, lead time, vendite perse e costo totale.

Nei paragrafi seguenti vengono presentati e discussi i risultati ottenuti per ciascuna configurazione.

6.1 AS IS

Lo scenario AS-IS rappresenta la configurazione di riferimento del sistema ed è costruito a partire da un insieme di parametri operativi e di costo che vengono mantenuti invariati in tutti gli scenari successivi. In particolare, i tempi di lavorazione, i tempi di setup e i parametri economici (costi di produzione, costi di setup, costi di mantenimento a scorta e prezzi di vendita) sono assunti come costanti lungo l'intera analisi.

Questa scelta metodologica consente di isolare l'effetto delle modifiche introdotte nella pianificazione ELSP, evitando che le variazioni nei risultati siano influenzate da cambiamenti nei dati di base.

Lo scenario AS-IS assume un periodo di pianificazione T di base pari a 0,6 giorni lavorativi, ottenuto dalla somma dei tempi di processo per ogni prodotto sulla macchina di disassemblaggio, risultando essere il minimo ottenibile che comporta una frequenza elevata di cambi di prodotto e quindi un numero massimo di setup. Tale configurazione è stata scelta come baseline proprio perché mette in evidenza in modo chiaro l'impatto dei setup sulle prestazioni del sistema.

Nello scenario AS-IS, i lotti di disassemblaggio sono composti da 20 unità per i Jeans e 30 unità per le borse, con un tempo di setup pari a 30 minuti per ogni cambio di prodotto. I tempi di disassemblaggio per pezzo risultano pari a 6 minuti per i Jeans e 3 minuti per le borse, corrispondenti a tempi complessivi per lotto rispettivamente pari a 120 e 90 minuti.

Le fasi di taglio e cucitura presentano tempi di lavorazione proporzionali alla dimensione del lotto e coerenti con le ipotesi del modello, come citate nel paragrafo 2.2. In particolare, la fase di cucitura è caratterizzata da tempi più elevati rispetto alle fasi precedenti e contribuisce in modo significativo al lead time complessivo del lotto, pur non essendo direttamente coinvolta nelle scelte di pianificazione.

Nel periodo di osservazione successivo al warm-up, il numero totale di setup risulta pari a 261, distribuiti in modo uniforme tra le due tipologie di prodotto. Questo valore conferma che lo scenario AS-IS rappresenta una condizione di massima frequenza di riconfigurazione della risorsa di disassemblaggio, coerente con la scelta di un periodo T ridotto.

L'utilizzazione programmata della risorsa di disassemblaggio risulta pari a circa 31,9% complessivo. Tale valore include sia il tempo di lavorazione sia il tempo di setup e

riflette una risorsa non saturata, ma penalizzata dall'elevato numero di cambi di prodotto. In linea con quanto osservato nell'analisi del warm-up, il tempo di setup incide per circa il 22% del tempo totale di utilizzo della macchina, valore che rimarrà costante negli scenari successivi in virtù delle ipotesi sui tempi adottate.

Il throughput settimanale si attesta su valori pari a circa 57 pezzi/settimana per il primo prodotto e 84 pezzi/settimana per il secondo. I valori risultano stabili e coerenti con il calendario di lavoro e con la capacità produttiva del sistema.

Il lead time di produzione del lotto è pari a circa 2,5 giorni per entrambe le tipologie di prodotto. La vicinanza dei valori indica che il flusso produttivo risulta bilanciato e che le fasi a valle del disassemblaggio non introducono colli di bottiglia rilevanti nello scenario di riferimento.

Nel corso della simulazione non si registrano vendite perse, a conferma del fatto che, nonostante l'elevata frequenza dei setup, la capacità produttiva risulta sufficiente a soddisfare il livello di domanda considerato.

Poiché i parametri economici sono mantenuti costanti in tutti gli scenari, l'analisi dei costi nello scenario AS-IS fornisce un riferimento economico per la valutazione delle configurazioni successive. Il costo di produzione rappresenta la componente principale del costo totale, con un valore complessivo pari al 90% del costo totale, mentre il costo di mantenimento a scorta risulta contenuto, coerentemente con i bassi livelli di work-in-process osservati.

Il costo di setup, pari al 2% del costo totale è direttamente legato all'elevato numero di riconfigurazioni della risorsa disassemblaggio e rappresenta una voce di costo non produttiva che, a parità di altri parametri, può essere influenzata esclusivamente dalle scelte di pianificazione.

Il costo associato alle vendite perse, ottenuto come ricavo perso, e quindi costo di opportunità:

$$\text{Ricavo perso} = (p - c) * q$$

è nullo in quanto il sistema è in grado di soddisfare interamente la domanda. Il costo totale dello scenario AS-IS risulta quindi circa 168.000 €, valore che viene assunto come benchmark per gli scenari successivi.

Nel complesso, lo scenario AS-IS costituisce una baseline intenzionalmente penalizzante dal punto di vista dei setup, costruita mantenendo invariati tempi e costi e modificato unicamente la struttura della pianificazione. Questa impostazione consente di valutare in modo chiaro se e in che misura le variazioni introdotte negli scenari successivi permettano di ridurre il numero di setup e i relativi costi, senza compromettere throughput, lead time e livello di servizio.

6.2 Scenario 1

Lo scenario 1 è ottenuto modificando esclusivamente la struttura della pianificazione, mantenendo invariati tutti i parametri operativi ed economici (tempi di lavorazione, tempi di setup, costi unitari e domanda). In particolare, rispetto allo scenario AS-IS, viene adottato un periodo di pianificazione T più lungo pari a 1 giorno lavorativo, con l'obiettivo di ridurre la frequenza dei cambi di prodotto.

La prima conseguenza è la riduzione del numero totale dei setup, che passa da 261 a 211. Tale riduzione si riflette direttamente sul costo di setup, che diminuisce rispetto allo scenario di riferimento del 19%, confermando l'effetto atteso di un ciclo di pianificazione più lungo.

Dal punto di vista dell'utilizzo della capacità produttiva, l'utilizzazione programmata della risorsa di disassemblaggio risulta pari a circa 26%, inferiore rispetto allo scenario AS-IS. Questo risultato è coerente con la struttura del sistema: la riduzione dei setup comporta una diminuzione del tempo complessivamente dedicato alla risorsa, ma allo stesso tempo l'allungamento dei lotti porta ad una minore frequenza di lavorazione nel periodo osservato.

Il throughput settimanale risulta inferiore rispetto allo scenario AS-IS per entrambe le tipologie di prodotto. Questo effetto è accompagnato da un aumento del lead time di produzione del lotto, che passa a circa 3 giorni, evidenziando come cicli di pianificazione più lunghi possano incidere negativamente sulla rapidità di attraversamento del sistema.

Un aspetto rilevante dello Scenario 1 è la comparsa di vendite perse, assenti nello scenario AS-IS. La riduzione del throughput, a fronte di una domanda invariata, comporta infatti l'impossibilità di soddisfare completamente il fabbisogno, con un

conseguente costo associato alle vendite perse che diventa la principale voce di costo aggiuntiva nello scenario.

Dal punto di vista economico complessivo, nonostante la riduzione del costo di setup e del costo di mantenimento a scorta il costo totale dello Scenario 1 risulta fortemente influenzato dal costo delle vendite perse. Questo risultato evidenzia come una pianificazione orientata esclusivamente alla riduzione dei setup possa avere effetti negativi sul livello di servizio, rendendo necessario un compromesso tra efficienza interna e capacità di soddisfare la domanda.

Lo scenario 1 mette in evidenza uno dei trade-off centrali dell'ELSP: la riduzione dei setup, ottenuta tramite un aumento del periodo di pianificazione, comporta benefici in termini di costi non produttivi, ma può peggiorare le prestazioni di flusso e il livello di servizio. Il confronto con lo scenario AS-IS mostra quindi che una riduzione dei setup non è di per sé sufficiente a migliorare le prestazioni complessive del sistema, se non accompagnata da un'adeguata capacità di soddisfare la domanda.

6.3 Scenario 2

Lo Scenario 2 è ottenuto introducendo un'ulteriore modifica alla pianificazione ELSP, mantenendo invariati tutti i parametri operativi ed economici del modello. In particolare, viene adottato un periodo di pianificazione T ancora più lungo pari a $T = 2$ giorni lavorativi, con l'obiettivo di ridurre ulteriormente la frequenza dei cambi di prodotto.

Come atteso, il numero totale di setup diminuisce ulteriormente, passando a 181, valore significativamente inferiore rispetto sia allo scenario AS-IS sia allo scenario 1. Questa riduzione si riflette in un'ulteriore diminuzione del costo di setup, che raggiunge il valore minimo tra gli scenari analizzati finora, ovviamente più aumenta T meno saranno i cambi di prodotto e meno il costo di setup, a discapito di livello di servizio sempre minore.

Dal punto di vista dell'utilizzo della capacità produttiva, l'utilizzazione programmata della risorsa disassemblaggio scende circa a 22%. Tale riduzione indica che, pur diminuendo i tempi non produttivi legati ai setup, il sistema lavora complessivamente meno nel periodo osservato, a causa dell'allungamento dei cicli produttivi.

Il Throughput settimanale subisce un'ulteriore contrazione rispetto allo Scenario 1, attestandosi su valori pari circa a 40 pezzi/settimana per il primo prodotto e 59 pezzi/settimana per il secondo. Parallelamente, il lead time di produzione del lotto aumenta fino a circa 4 giorni, segnalando un peggioramento delle prestazioni di flusso.

L'effetto più rilevante dello Scenario 2 è rappresentato dall'aumento significativo delle vendite perse, che raggiungono valori elevati per entrambe le tipologie di prodotto. Questo fenomeno è direttamente riconducibile alla riduzione del throughput, che rende il sistema incapace di soddisfare il livello di domanda considerato.

Dal punto di vista economico, nel caso analizzato, con i parametri economici adottati nel modello, la riduzione del costo di setup non risulta sufficiente a compensare il costo associato alle vendite perse, che rappresenta la componente prevalente del costo totale nello scenario considerato. Di conseguenza, il costo complessivo dello Scenario 2 risulta superiore sia allo Scenario AS-IS sia allo Scenario 1, evidenziando un peggioramento delle prestazioni economiche del sistema.

Lo Scenario 2 rappresenta una configurazione estrema dal punto di vista della pianificazione, nella quale la riduzione dei setup viene spinta oltre un livello sostenibile per il sistema. I risultati mostrano chiaramente che un'eccessiva estensione del periodo di pianificazione, pur riducendo i costi non produttivi, compromette in modo significativo il livello di servizio e le prestazioni di flusso.

Il confronto con gli scenari precedenti mette in evidenza il trade-off fondamentale dell'ELSP: esiste un compromesso tra riduzione dei setup e capacità di soddisfare la domanda e una pianificazione orientata esclusivamente alla minimizzazione dei setup può portare a risultati complessivamente peggiori.

6.4 Scenario 3

Lo scenario 3 introduce la modifica della domanda dei prodotti finiti viene modellata esplicitamente, con l'obiettivo di valutare la capacità del sistema di rispondere a variazioni improvvise del fabbisogno. A differenza degli scenari precedenti, nei quali l'analisi era focalizzata principalmente sugli effetti della pianificazione ELSP a parità di condizioni stabili, in questo scenario l'attenzione si sposta anche sul livello di servizio, misurato tramite le vendite perse.

La domanda è stata impostata in modo da rappresentare picchi legati a periodi festivi, cioè fasi dell'anno in cui è realistico attendersi un incremento degli ordini. Questa scelta ha l'obiettivo di stressare il sistema e verificare come la politica di pianificazione reagisca quando il carico richiesto aumenta rispetto alla capacità media disponibile.

Poiché l'introduzione di una domanda non costante rende i risultati soggetti a variabilità, lo Scenario 3 è stato valutato tramite 20 repliche, così da ottenere stime più robuste dei KPI e ridurre l'influenza di singole realizzazioni della simulazione.

I risultati mostrano che, mantenendo invariata la struttura della pianificazione e i parametri di processo, il sistema continua a presentare un numero totale di setup pari a 261, coerente con lo scenario AS-IS, dato che la logica di sequenziamento non è stata modificata. Anche l'utilizzazione programmata della risorsa di disassemblaggio rimane su livelli simili, con un valore complessivo intorno al 32%, confermando che la configurazione produttiva di base non cambia.

Il throughput settimanale si mantiene sui valori già osservati nello scenario di riferimento, circa 57 pezzi/settimana per il primo prodotto e 85 pezzi/settimana per il secondo, mentre il lead time di lotto risulta pari a circa 2 giorni per entrambe le tipologie di prodotto. Questo indica che, dal punto di vista puramente operativo, il sistema conserva la stessa capacità e la stessa dinamica di flusso.

L'elemento distintivo dello Scenario 3 è però la presenza di vendite perse, che assumono valori positivi per entrambe le tipologie di prodotto (17 e 32). Ciò significa che, in corrispondenza dei picchi di domanda simulati, la capacità produttiva non è sempre sufficiente a soddisfare completamente il fabbisogno, generando mancate vendite.

Dal punto di vista dei costi, la presenza della domanda rende visibile una componente che negli scenari precedenti era nulla o molto ridotta: il costo associato alle vendite perse, pari complessivamente a 2.469. Le altre voci principali (costo di produzione e costo di setup) restano invece confrontabili con lo scenario AS-IS, poiché tempi e parametri economici sono stati mantenuti invariati.

Il costo totale dello scenario 3 risulta pari a 169.123,33 leggermente superiore al caso di riferimento. Questo incremento non è dovuto ad un peggioramento dell'efficienza interna, ma al fatto che l'introduzione della domanda rende esplicito l'impatto economico di una capacità insufficiente nei periodi di picco.

Lo scenario 3 evidenzia un aspetto importante: una politica di pianificazione che in condizione medie appare stabile può comunque risultare fragile in presenza di domanda non uniforme. In altre parole, i picchi stagionali mettono in luce il limite principale della configurazione di base: la capacità produttiva e la frequenza dei setup, così come impostate, non garantiscono sempre un livello di servizio completo nei periodi di maggiore carico.

Questo risultato è utile perché consente di valutare gli scenari successivi non solo in termini di setup e produttività, ma anche in termini di robustezza rispetto alla domanda, aspetto particolarmente rilevante in contesti reali caratterizzati da stagionalità e picchi di vendita.

6.5 Scenario 4

Lo scenario 4 è costruito mantenendo il periodo di pianificazione T pari a 1 giorno lavorativo, in continuità con lo scenario 1, e modificando esclusivamente la sequenza di produzione all'interno del Common Cycle. In particolare, rispetto allo scenario 1, l'ordine di lavorazione viene invertito, prevedendo la produzione prima del prodotto a fine vita borse e successivamente del prodotto a fine vita jeans, mentre tutte le altre ipotesi del modello rimangono invariate. La domanda è assunta costante, così da isolare l'effetto della sola sequenza produttiva.

Di conseguenza, il confronto dei risultati dello scenario 4 deve essere effettuato rispetto allo scenario 1, che rappresenta il corretto riferimento in termini di struttura del ciclo di pianificazione, e non rispetto allo scenario AS-IS, caratterizzato da un diverso valore di T .

L'inversione dell'ordine di produzione comporta una totale di setup pari a 231, valore in aumento rispetto scenario 1. Sebbene il periodo di pianificazione rimanga invariato, la diversa successione dei prodotti all'interno del ciclo, unita agli effetti di inizio e fine orizzonte della simulazione, determina un numero differente di cambi di prodotto effettivamente realizzati nel periodo osservato.

L'utilizzazione programmata della risorsa di disassemblaggio si attesta intorno al 28%, valore leggermente superiore rispetto allo scenario 1. Questo risultato indica un utilizzo più intenso della risorsa, pur rimanendo lontano da condizioni di saturazione, e riflette la diversa distribuzione temporale delle lavorazioni e dei setup.

Il throughput settimanale risulta pari a 50 pezzi/settimana per PF1 e 76 pezzi/settimana per PF2, valori superiori rispetto allo scenario 1. Parallelamente, il lead time di produzione del lotto si riduce, attestandosi intorno a 3,1 giorni per entrambe le tipologie di prodotto. Nel corso della simulazione non si registrano vendite perse, confermando che la modifica della sequenza non compromette il livello di servizio in presenza di domanda costante.

L'effetto più evidente dell'inversione della sequenza produttiva emerge osservando l'andamento temporale dell'inventario, riportato in Figura 5. Il grafico mostra un comportamento periodico e regolare, tipico di una pianificazione a Common Cycle, con un andamento a dente di sega per entrambe le tipologie di prodotto.

In particolare, la produzione anticipata di PF2 determina un accumulo iniziale di inventario per tale prodotto, che raggiunge il valore massimo nella prima parte del ciclo. Successivamente, quando la produzione si sposta su PF1, l'inventario di PF2 viene progressivamente assorbito, mentre cresce quello relativo a PF1. Entrambe le curve oscillano tra valori minimi prossimi allo zero e valori massimi costanti, senza evidenziare trend crescenti o instabilità nel tempo.

Questo comportamento indica che il sistema opera in condizioni di regime stazionario e che l'inversione della sequenza produttiva non genera accumuli strutturali di scorte, ma modifica esclusivamente la distribuzione temporale dell'inventario all'interno del ciclo. Il valore medio delle scorte rimane infatti contenuto e confrontabile con quello osservato nello scenario 1.

Dal punto di vista economico, lo Scenario 4 presenta un costo totale inferiore al 4% rispetto lo Scenario 1. Tale riduzione è attribuibile principalmente al diverso profilo dei setup e al contenimento dei costi di mantenimento a scorta, coerenti con l'andamento regolare dell'inventario osservato.

Il costo di produzione rimane invariato rispetto agli altri scenari con domanda costante, mentre il costo associato alle vendite perse è nullo. Questo conferma che l'inversione della sequenza produttiva consente di migliorare le prestazioni economiche e operative del sistema.

Questo risultato conferma che, oltre alla scelta del periodo di pianificazione, anche la sequenza produttiva gioca un ruolo significativo nel bilanciamento tra efficienza operativa, profilo delle scorte e prestazioni economiche del sistema.

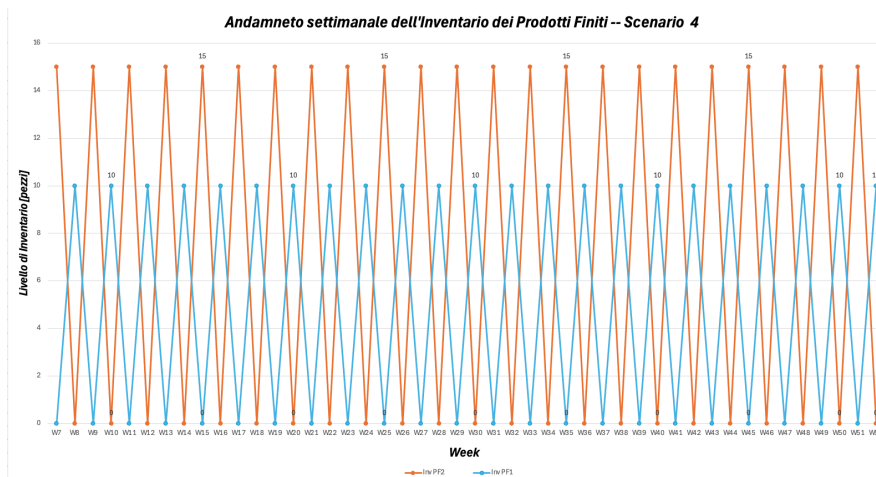


Figura 5 Andamento Inventario PF (scenario 4)

6.6 Scenario 5

Lo scenario 5 è costruito mantenendo il periodo di pianificazione $T = 2$, in continuità con lo Scenario 2, e modificando esclusivamente la sequenza di produzione all'interno del Common Cycle. In particolare, rispetto allo Scenario 2, l'ordine di lavorazione dei prodotti viene invertito, prevedendo la produzione prima del prodotto PF2 e successivamente del prodotto PF1, mentre tutte le altre ipotesi del modello rimangono invariate. Anche in questo scenario la domanda è assunta costante, così da isolare l'effetto della sola sequenza produttiva.

Di conseguenza, il confronto dei risultati dello scenario 5 viene effettuato rispetto allo Scenario 2, che rappresenta il riferimento corretto in termini di struttura della pianificazione.

L'inversione della sequenza produttiva comporta una riduzione del numero totale di setup, che si attesta a 225, rispetto ai valori osservati nello scenario 2. A parità di periodo di pianificazione, questo risultato è attribuibile esclusivamente alla diversa successione dei prodotti all'interno del ciclo e agli effetti di inizio e fine orizzonte della simulazione.

L'utilizzazione programmata della risorsa di disassemblaggio risulta pari a circa 28%, valore sostanzialmente allineato a quello dello scenario 2. Ciò indica che la modifica della sequenza non altera in modo significativo il livello di utilizzo complessivo della risorsa, ma incide principalmente sulla distribuzione temporale delle lavorazioni e dei setup.

Il throughput settimanale si attesta sui valori pari a circa 49 pezzi/settimana per PF1 e 73 pezzi/settimana per PF2, mentre il lead time di produzione del lotto risulta pari a circa 3 giorni per entrambe le tipologie di prodotto. Le prestazioni di flusso risultano quindi comparabili a quelle dello Scenario 2.

L'aspetto più rilevante dello Scenario 5 riguarda le vendite perse, che risultano drasticamente ridotte rispetto allo Scenario 2. In particolare, il numero di vendite perse diminuisce in modo netto (oltre il 900%), evidenziando un sensibile miglioramento del livello di servizio ottenuto esclusivamente attraverso la modifica della sequenza produttiva.

L'andamento settimanale dell'inventario dei prodotti finiti, riportato in figura 6, mostra un comportamento regolare e periodico, tipico di una pianificazione a common cycle con periodo $T = 2$. Le curve di inventario presentano un andamento a dente di sega, con oscillazioni stabili tra valori minimi prossimi allo zero e valori massimi costanti (circa 10 unità PF1 e 15 unità PF2), senza evidenziare trend crescenti lungo l'orizzonte di simulazione.

Dal punto di vista economico, lo Scenario 5 presenta un costo totale inferiore di circa il 19% rispetto allo Scenario 2. Il miglioramento è dovuto principalmente alla forte riduzione del costo associato alle vendite perse, che nello Scenario 2 rappresentava la voce dominante del costo totale. Il costo di setup e di produzione rimangono coerenti con una pianificazione caratterizzata da $T = 2$, mentre il costo di mantenimento a scorta risulta contenuto, in linea con l'andamento regolare dell'inventario osservato.

Nel complesso, lo Scenario 5 evidenzia come anche in presenza di un periodo di pianificazione lungo, la sequenza di produzione rappresenti una leva decisiva nell'ambito dell'ELSP. Rispetto allo scenario 2, l'inversione dell'ordine di lavorazione consente di migliorare in modo significativo il livello di servizio e le prestazioni economiche del sistema, senza penalizzare throughput, lead time o utilizzazione della risorsa. Questo risultato conferma che una corretta scelta della sequenza produttiva è fondamentale per bilanciare efficienza operativa e soddisfazione della domanda.

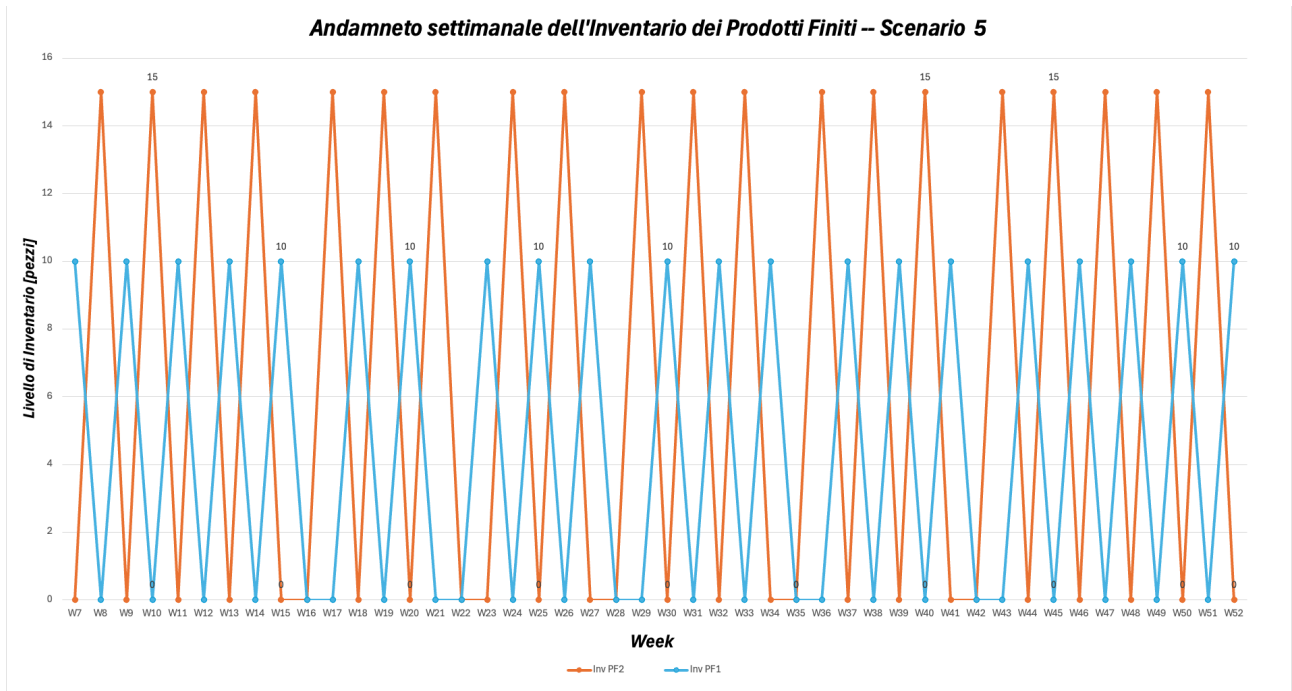


Figura 6 Andamento Inventario PF (scenario 5)

7. Confronto tra scenari

Prima di analizzare nel dettaglio i risultati, è opportuno chiarire la logica con cui sono stati costruiti e confrontati gli scenari.

Tutti gli scenari analizzati condividono gli stessi parametri operativi ed economici: tempi di lavorazione, tempi di setup, costi unitari di produzione, costi di mantenimento a scorta, costo di setup e prezzi di vendita rimangono invariati lungo l'intera analisi. Tale scelta metodologica consente di isolare l'effetto delle sole decisioni di pianificazione proprie dell'ELSP, evitando che le variazioni nei KPI siano influenzate da modifiche nei dati di base.

Gli scenari si differenziano esclusivamente per:

- Il valore del periodo di pianificazione T;
- La sequenza di produzione all'interno del ciclo) ordine PF1-PF2 o PF2-PF1);
- Nel caso dello Scenario 3, il profilo della domanda (costante vs con picchi).

L'obiettivo non è individuare una configurazione ottima in senso assoluto, ma comprendere come le leve decisionali tipiche dell'ELSP – periodo di pianificazione e sequenziamento – influenzino simultaneamente:

- Numero di setup;
- Livello di utilizzo della risorsa;
- Throughput e lead time;
- Vendite perse;
- Struttura dei costi.

L'analisi viene pertanto condotta in chiave comparativa, attraverso tabelle e grafici che consentono di osservare le variazioni dei principali KPI al variare delle scelte di pianificazione, mettendo in evidenza i trade-off strutturali tra efficienza interna e livello di servizio.

Il grafico riportato in Figura 7 confronta, per gli scenari AS-IS, Scenario 1 (T=1) e Scenario 2 (T=2), l'andamento del costo di setup e del costo associato alle vendite perse.

L'obiettivo è evidenziare come la variazione del periodo di pianificazione T influenzi la struttura economica del sistema, mettendo in luce il trade-off tipico dell'ELSP tra efficienza interna (riduzione dei setup) e livello di servizio (capacità di soddisfare la domanda).

Nello scenario AS-IS il numero di setup è massimo e, di conseguenza, il costo di setup è più elevato tra gli scenari analizzati.

Tuttavia, il sistema è in grado di soddisfare completamente la domanda, per cui il costo associato alle vendite perse è nullo.

In questa configurazione il sistema privilegia la reattività e la frequenza di produzione, garantendo il livello di servizio a scapito di una maggiore incidenza dei costi di riconfigurazione.

L'aumento del periodo di pianificazione comporta una riduzione del numero di setup e quindi del relativo costo. Tuttavia, emerge per la prima volta un costo significativo associato alle vendite perse. Il sistema, producendo con cicli più lunghi, riduce la propria capacità di risposta alla domanda nel periodo osservato.

Il risultato economico mostra che, con i parametri adottati nel modello, il beneficio ottenuto dalla riduzione dei setup viene in parte compensato dall'incremento del costo di mancato servizio.

L'estensione ulteriore del periodo T riduce ancora il costo di setup.

Tuttavia, il costo delle vendite perse cresce in modo marcato e diventa la componente dominante del costo totale.

Nel caso specifico analizzato – e con i valori economici adottati – la riduzione dei costi di riconfigurazione non risulta sufficiente a compensare la perdita di ricavi dovuta alla mancata soddisfazione della domanda.

E' importante sottolineare che questo risultato dipende dai valori assoluti dei parametri economici del modello: con una diversa struttura di costi o margini unitari, l'equilibrio potrebbe risultare differente.

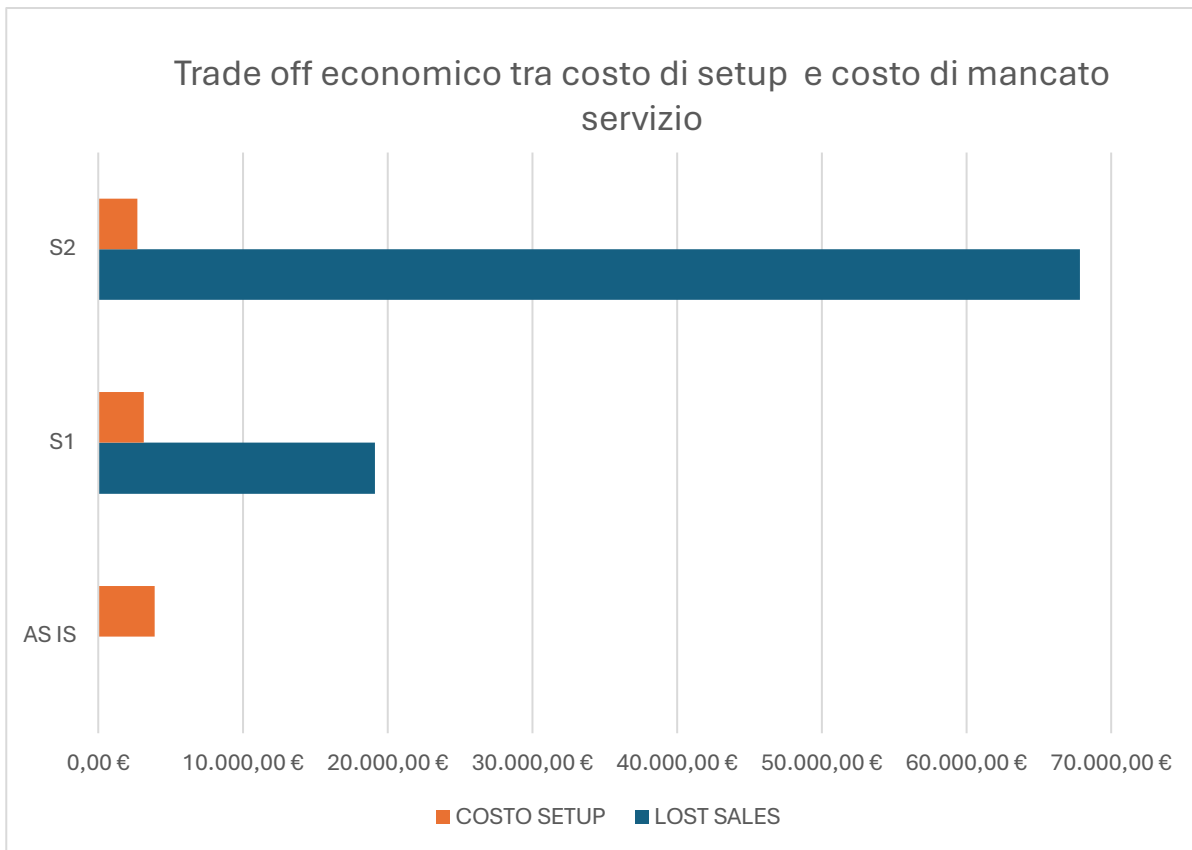


Figura 7 trade-off costo setup e margine perso

Il grafico, Figura 7, rende evidente il trade-off strutturale dell'ELSP:

- All'aumentare di T, il sistema diventa più efficiente dal punto di vista dei setup;
- Ma contemporaneamente perde flessibilità e capacità di servizio.

La minimizzazione dei costi di setup, se perseguita isolatamente, può quindi condurre a un peggioramento delle prestazioni economiche complessive.

Questo risultato conferma che la scelta del periodo di pianificazione non può essere effettuata considerando una sola voce di costo, ma deve tenere conto simultaneamente di efficienza operativa e livello di servizio.

Il confronto tra scenario AS-IS e Scenario 3 evidenzia che la struttura di pianificazione adottata è adeguata in condizioni di domanda media costante, ma non garantisce piena copertura nei periodi di picco. L'introduzione di una domanda variabile comporta la comparsa di vendite perse, pur in assenza di modifiche alla capacità produttiva o alla frequenza dei setup. Ciò indica che il sistema rappresenta una robustezza limitata rispetto ad incrementi temporanei del fabbisogno, anche se il valore del costo totale rimane pressoché uguale.

Lo scenario 3 evidenzia che l'adeguatezza di una politica di pianificazione non può essere valutata esclusivamente in condizioni stazionarie, ma deve essere analizzata anche in termini di capacità di assorbire variazioni temporanee della domanda.

AS IS			
KPI - COSTI	PF1	PF2	TOT
Production cost	91000	70200	161200
Holding cost	1558,9	1294,65	2853,55
Lost sales[Margine]	0	0	0
Setup cost	1965	1950	3915
TOTAL COST	94523,9	73444,65	167968,55

SCENARIO 3			
KPI - COSTI	PF1	PF2	TOT
Production cost	91000	70200	161200
Holding cost	866,541	672,7905	1539,3315
Lost sales[Margine]	1445	1024	2469
Setup cost	1950	1965	3915
TOTAL COST	95261,5	73861,7905	169123,3315

Figura 8 trade-off costi Scenario AS-IS vs Scenario 3

Il grafico in Figura 9 rappresenta la relazione tra costo totale e margine perso nei diversi scenari analizzati. Si osserva che scenari caratterizzati da un elevato livello di vendite perse presentano anche un costo totale superiore. In particolare, lo Scenario 2 si colloca nella regione meno favorevole del piano decisionale, combinando alto margine perso e costo totale massimo.

Nel confronto tra gli scenari analizzati è opportuno precisare che gli scenari 4 e 5 non introducono modifiche nella struttura della pianificazione rispetto rispettivamente agli scenari 1 e 2. In particolare, lo scenario 4 mantiene invariato il periodo di pianificazione $T = 1$ adottato nello scenario 1, mentre lo Scenario 5 conserva il periodo $T = 2$ dello Scenario 2. Analogamente, rimangono invariati i tempi di lavorazione, i tempi di setup, i parametri economici e il livello di domanda (assunta costante in entrambi i casi).

L'unica differenza introdotta negli scenari 4 e 5 riguarda la sequenza produttiva all'interno del Common Cycle: viene invertito l'ordine di lavorazione dei prodotti, prevedendo la produzione prima di PF2 e successivamente di PF1. Tale modifica non altera la capacità produttiva complessiva del sistema né la strutturata dei costi unitari, ma incide esclusivamente sulla distribuzione sequenziale dei lotti all'interno del ciclo.

I risultati mostrano che questa semplice variazione nella sequenza è sufficiente a determinare un miglioramento significativo del livello di servizio, con una riduzione – fino all'azzeramento, nel caso dello Scenario 4 – delle vendite perse. La conseguente diminuzione del margine perso si riflette direttamente sul costo totale, che risulta inferiore rispetto agli scenari con la medesima lunghezza del ciclo ma diversa sequenza produttiva.

Questo risultato evidenzia che, nell'ambito dell'ELSP, non è soltanto la scelta del periodo di pianificazione a influenzare le prestazioni del sistema, ma anche l'ordine con cui i prodotti vengono realizzati all'interno del ciclo. La sequenza produttiva rappresenta quindi una leva decisionale autonoma e strategica, capace di incidere in modo significativo sulla performance economica complessiva senza richiedere variazioni nella capacità o nei parametri strutturali del sistema.

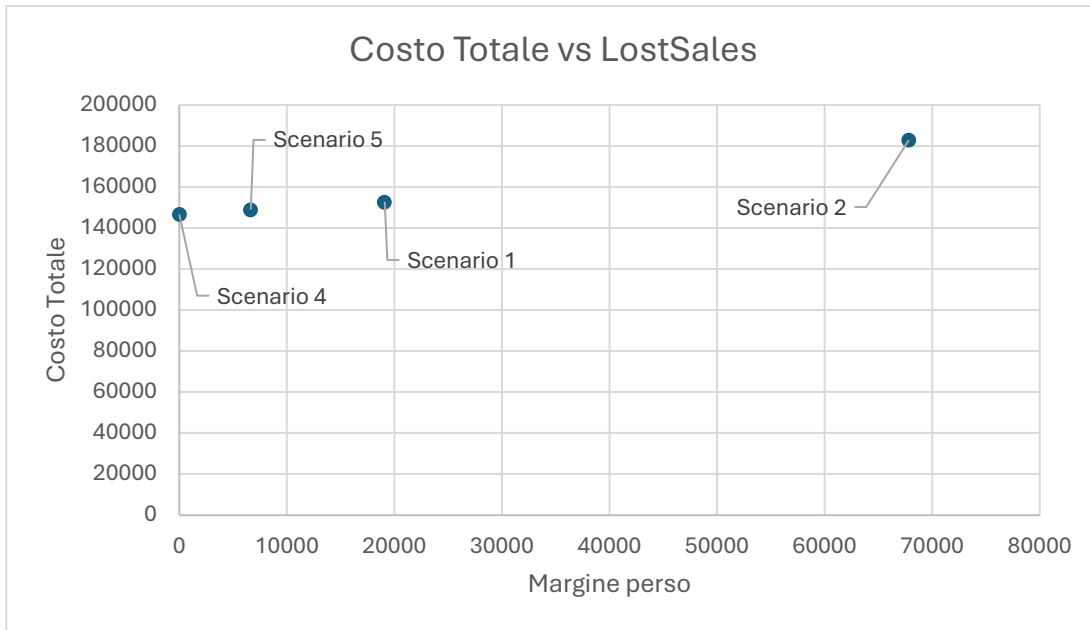


Figura 9 Trade-Off Cost Totale vs Margine Perso dalle vendite

8. Conclusioni e sviluppi futuri

La presente tesi ha avuto come obiettivo principale lo sviluppo e l'analisi di un modello di simulazione dell'Economic Lot Scheduling Problem (ELSP), con lo scopo di studiare il comportamento di un sistema produttivo soggetto a vincoli di capacità, tempi di setup e politiche di pianificazione cicliche.

Il modello sviluppato si è dimostrato in grado di rappresentare in modo coerente ed efficace le logiche fondamentali dell'ELSP, consentendo di simulare il funzionamento del sistema in condizioni di regime e di calcolare i principali Key Performance Indicators, quali throughput, lead time, utilizzazione della risorsa critica, numero di setup, livelli di inventario, vendite perse e costi associati.

L'utilizzo della simulazione ha permesso di affiancare all'approccio analitico tradizionale uno strumento flessibile, in grado di valutare scenari alternativi e di analizzare l'impatto di singole modifiche alla pianificazione mantenendo invariati i parametri base. In questo senso, il modello consente non solo di replicare configurazioni teoriche, ma anche di effettuare analisi di tipo "what-if", supportando il processo decisionale attraverso una letteratura integrata di KPI operativi ed economici.

Un risultato particolarmente rilevante emerso dall'analisi degli scenari riguarda il ruolo della sequenza di produzione. Come evidenziato negli scenari 4 e 5, il semplice cambiamento dell'ordine di lavorazione dei prodotti all'interno del Common Cycle porta ad un miglioramento significativo del livello di servizio, con una drastica riduzione delle vendite perse e un impatto positivo sul costo totale del sistema. Questo risultato consente di individuare in modo chiaro e oggettivo l'ordine di produzione più favorevole, ovvero la sequenza PF2→PF1, che risulta preferibile rispetto all'alternativa analizzata.

Per quanto riguarda la riduzione dei costi di setup, i risultati mostrano che essa non può essere ottenuta esclusivamente agendo sulla sequenza di produzione, ma richiede una riflessione più ampia sulla struttura della politica di pianificazione. In particolare, una possibile direzione è rappresentata dall'aumento della dimensione dei lotti, e di conseguenza, dall'allungamento del periodo di pianificazione T. Tuttavia, l'ottimo di T deve essere sempre contestualizzato rispetto al numero di prodotti coinvolti e alle caratteristiche specifiche del sistema. Sebbene per questo tipo di linea di produzione l'ottimo teorico di T è collocato intorno a due settimane, tale valore non può essere

preso in considerazione senza un'adeguata modifica del contesto produttivo, con conseguenza di un basso livello di servizio se non si modificano contestualmente il numero di prodotti all'interno di un lotto.

Il modello sviluppato costituisce una base sulla quale possono essere costruiti diversi sviluppi futuri. Una prima direzione di estensione riguarda la scalabilità del modello, che potrebbe essere adattato per gestire non soltanto due prodotti, ma un numero arbitrario di famiglie di prodotto. Ciò consentirebbe di analizzare sistemi più complessi e di studiare come l'aumento del numero di prodotti influisca sulla scelta del periodo di pianificazione, sulla frequenza dei setup e sulle prestazioni complessive del sistema.

Un ulteriore sviluppo riguarda l'introduzione e il confronto di politiche di pianificazione alternative al Common Cycle, quali il Basic Period, l'Extended Basic Period o il Power of Two. L'integrazione di queste politiche all'interno del modello di simulazione permetterebbe di confrontare in modo strutturato approcci diversi, valutandone l'efficacia in termini di costi, livello di servizio e robustezza rispetto alla variabilità della domanda.

Infine, il modello potrebbe essere arricchito introducendo una maggiore dinamicità della domanda, integrando meccanismi di forecasting più avanzati o scenari caratterizzati da stagionalità e incertezza. Questo consentirebbe di analizzare il comportamento delle politiche ELSP in contesti ancora più realistici, rafforzando il legame tra teoria e applicazione pratica.

Bibliografia

- [1] H. M. Rogers, "A production scheduling problem," *Journal of Industrial Engineering*, vol. 9, no. 3, pp. 225–232, 1958.
- [2] E. E. Bomberger, "A dynamic programming approach to a lot size scheduling problem," *Management Science*, vol. 12, no. 11, pp. 778–784, 1966.
- [3] S. E. Elmaghraby, "The economic lot scheduling problem (ELSP): Review and extensions," *Management Science*, vol. 24, no. 6, pp. 587–598, 1978.
- [4] W. L. Hsu, "On the general feasibility of scheduling lot sizes of several products on one machine," *Management Science*, vol. 29, no. 1, pp. 93–105, 1983.
- [5] H. Narro-López and J. Sicilia, "Lot sizing and scheduling in production systems," *European Journal of Operational Research*, vol. 55, no. 1, pp. 1–15, 1991.
- [6] S. M. Grznár and M. Krajčovič, "Scheduling in multi-product manufacturing systems," *International Journal of Production Economics*, vol. 53, no. 2, pp. 131–140, 1997.
- [7] A. Ben-Daya and A. Raouf, "The economic lot scheduling problem: A review and extensions," *Journal of the Operational Research Society*, vol. 51, no. 4, pp. 432–440, 2000.
- [8] S. Khouja, "The economic lot scheduling problem: A review of models and algorithms," *Omega*, vol. 28, no. 5, pp. 541–557, 2000.
- [9] A. Khoury, "Common cycle approaches for the ELSP," *International Journal of Production Research*, vol. 39, no. 3, pp. 475–490, 2001.
- [10] I. Moon, S. Lee, and W. Yun, "A study on the economic lot scheduling problem with multiple products," *International Journal of Production Economics*, vol. 76, no. 1, pp. 1–12, 2002.
- [11] O. Tang and R. H. Teunter, "Economic lot scheduling problem with returns," *Production and Operations Management*, vol. 15, no. 4, pp. 488–497, 2006.
- [12] T. Chang, "Integrated production and remanufacturing scheduling," *International Journal of Production Research*, vol. 47, no. 12, pp. 3231–3248, 2009.
- [13] R. Teunter, O. Tang, and K. Kaparis, "Heuristics for the economic lot scheduling problem with returns," *International Journal of Production Economics*, vol. 118, no. 2, pp. 323–330, 2009.
- [14] H. Sun, W. Chen, and X. Liu, "Economic lot scheduling problem in a remanufacturing system with returns at different quality grades," *Journal of Cleaner Production*, vol. 170, pp. 559–569, 2018.
- [15] T. Winands, "Scheduling and lot sizing in single-machine environments," *International Journal of Production Economics*, vol. 133, no. 1, pp. 93–101, 2011.

- [16] R. Santander-Mercado, J. A. Pacheco, and J. A. Carrasco-Gallego, “Integrated lot-sizing and scheduling: A review,” *Computers & Industrial Engineering*, vol. 98, pp. 247–262, 2016.
- [17] A. Zanoni, L. Bettoni, and M. Glock, “Remanufacturing and lot-sizing models,” *International Journal of Production Economics*, vol. 183, pp. 313–325, 2017.
- [18] D. Giglio, M. Paolucci, and A. Roshani, “Integrated lot sizing and scheduling in manufacturing/remanufacturing systems,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 148, pp. 624–641, 2017.
- [19] C. Devoto, E. Fernández, and P. Piñeyro, “The economic lot-sizing problem with remanufacturing and inspection for grading heterogeneous returns,” *Journal of Remanufacturing*, vol. 10, no. 1, pp. 1–17, 2020.
- [20] A. Alle, P. Thai, and M. Rework, “Lot-sizing and scheduling with rework processes,” *International Journal of Production Economics*, vol. 135, no. 1, pp. 240–251, 2012.
- [21] T. Sunarni, W. A. Jauhari, and N. A. Kurdhi, “Sustainable lot-sizing and scheduling model: A systematic literature review,” *Proceedings of the IEEE IEEM Conference*, pp. 1527–1531, 2023.

Disassemblaggio

La figura 1.1 mostra la fase di disassemblaggio del flusso logistico produttivo, nella quale due tipologie di prodotti a fine vita, jeans e borse, vengono processate su una risorsa condivisa, soggetta a tempi di setup. E' in questa fase che viene implementata la logica riconducibile all'Economic Lot Scheduling Problem.

Il flusso ha origine da due Create distinti:

- Arrive Jeans
- Arrive Borse

Questi moduli generano una singola entità ciascuno, corrispondente ad un lotto delle due tipologie di prodotto a fine vita e, quindi successivamente di prodotto finito. Tale scelta consente di far circolare all'interno del modello un numero limitato di entità, semplificando la gestione del flusso e riducendo il rischio di errori di modellazione, senza compromettere la validità dell'analisi.

Subito dopo i Create, i moduli Assign vengono utilizzati per:

- Attribuire alle entità un attributo che identifica il tipo di prodotto (jeans o borse), chiamato *Item* con valore 1 per i jeans e 2 per le borse;
- Attribuire alle entità la sequenza delle stazioni che dovranno girare;
- Attribuire alle entità il tempo attuale di arrivo *now* al fine di calcolare un KPI di analisi, il lead time.

I moduli Hold 1 e 2 svolgono un ruolo centrale nella modellazione della politica di schedulazione. Essi vengono utilizzati per:

- Trattenere le entità fino al completamento del lotto previsto;
- Garantire che il disassemblaggio avvenga per lotti omogenei di prodotti.

I moduli Hold presenti sono configurati secondo la modalità Wait For Signal e svolgono un ruolo centrale nell'implementazione della politica di pianificazione adottata. Essi consentono di controllare il rilascio delle entità verso la fase di disassemblaggio, garantendo il rispetto della sequenza produttiva definita dalla logica dell'Economic Lot Scheduling Problem.

Il rilascio delle entità dai moduli Hold è governato da una variabile di stato denominata *CurrentType*, che identifica la tipologia di prodotto che deve essere sottoposto a disassemblaggio in un determinato istante. La variabile inizialmente impostata a valore

1, corrispondente alla prima tipologia di prodotto da processare. In questo modo viene simulata una sequenza ciclica del tipo Item 1 – Item 2 – Item 1 – Item 2, coerente con una politica di pianificazione di tipo Common Cycle.

All'avvio della simulazione, il primo rilascio dell'entità avviene tramite un blocco ausiliario costituito dai moduli Create – Signal – Dispose, utilizzato esclusivamente per generare il segnale iniziale necessario ad avviare il processo. Tale blocco consente di inviare il segnale a modulo Hold 1, permettendo alla prima entità di entrare nel sistema di disassemblaggio. Dopo l'invio del segnale iniziale, questo blocco non genera ulteriori entità e non interviene più nel flusso principale del modello.

Successivamente, i segnali che consentono il rilascio delle entità dai moduli Hold vengono generati in due circostanze principali. La prima si verifica al termine del disassemblaggio di un prodotto a fine vita, quando avviene il cambio prodotto da disassemblare; in questo caso, la variabile CurrentType viene aggiornata e viene inviato un nuovo segnale al modulo Hold corrispondente al prodotto successivo nel ciclo. La seconda circostanza si verifica al completamento del ciclo produttivo, quando, dopo la creazione dei prodotti finiti, le entità ritornano ai moduli Assign iniziali per l'avvio di un nuovo ciclo, passando nuovamente attraverso appositi moduli di segnalazione. Questa struttura consente di sincronizzare in modo efficace il rilascio delle entità con la pianificazione del disassemblaggio, garantendo che una sola tipologia di prodotto venga processata per volta e che la sequenza produttiva segua rigorosamente la logica ciclica prevista. L'utilizzo combinato dei moduli Hold, Signal e della variabile di stato permette così di implementare in Arena una politica di pianificazione coerente con l'impostazione teorica dell'ELSP.

Il modulo Station non svolge una funzione puramente logica, ma è utilizzato nel modello come punto di riferimento per la gestione dei trasporti. In particolare, le station rappresentano le localizzazioni fisiche del sistema tra le quali avviene la movimentazione delle entità mediante i moduli di trasporto (modelli blu di Arena). Nel modello, ciascuna fase del processo è associata ad una specifica station. Quando un'entità raggiunge una Station, essa viene identificata come pronta per essere movimentata verso la fase successiva, attivando una richiesta di trasporto. La Station funge quindi da punto di origine o di destinazione per i movimenti gestiti tramite AGV. In particolare, una volta rilasciata dal modulo Hold, l'entità viene instradata verso la Station di disassemblaggio, dalla quale viene generata la richiesta di trasporto verso la stazione successiva del flusso. Analogamente, al termine delle lavorazioni, le entità

vengono inviate alle station associate alle fasi di taglio e cucitura, consentendo di modellare in modo esplicito i trasferimenti fisici all'interno del sistema.

L'introduzione delle station permette quindi di:

- Separare in modo chiaro le fasi di lavorazione dalle fasi di trasporto;
- Modellare i movimenti delle entità come attività esplicite, soggette a tempi e vincoli;
- Rendere il modello più aderente a un contesto logistico reale, nel quale le operazioni non avvengono istantaneamente nello stesso punto.

Dal punto di vista della simulazione, le Station costituiscono l'interfaccia tra il flusso produttivo e la logica di movimentazione, consentendo l'utilizzo corretto dei moduli di trasporto e la raccolta di informazioni sulle prestazioni del sistema logistico interno.

Dopo l'arrivo dell'entità alla station di disassemblaggio, il flusso prosegue verso un modulo Decide, utilizzato per stabilire se sia necessario eseguire un setup prima di avviare il disassemblaggio vero e proprio. Questo modulo rappresenta il punto in cui la logica di pianificazione si traduce in una decisione operativa all'interno del modello.

La decisione è basata sul confronto tra:

- La tipologia di prodotto a fine dell'entità in ingresso (jeans o borse);
- La tipologia di prodotto lavorata in precedenza sulla risorsa di disassemblaggio.

A tal fine, il modello utilizza una variabile di stato che memorizza l'ultimo tipo di prodotto disassemblato, denominata LastTypeDiss. Se il prodotto in ingresso è diverso da quello precedentemente lavorato, il modulo Decide instrada l'entità verso il ramo dedicato al setup. In caso contrario, se il prodotto è dello stesso tipo, l'entità può accedere direttamente alla fase di disassemblaggio senza richiedere alcun cambio di configurazione.

Questo meccanismo consente di introdurre in modo esplicito il concetto di cambio prodotto, evitando di imporre setup in maniera artificiale. Il setup emerge quindi come conseguenza naturale della sequenza di lavorazione definita dalla pianificazione ciclica.

Il modulo Decide svolge un ruolo centrale nel collegare la pianificazione teorica dell'ELSP con il comportamento operativo del sistema simulato. Poiché le entità vengono rilasciate dai moduli Hold secondo la sequenza prevista dal Common Cycle, la

frequenza con cui il modulo Decide attiva il setup dipende direttamente dalla dimensione dei lotti e dall'alternanza tra le tipologie di prodotto.

In questo modo, il numero complessivo di setup e il tempo totale ad essi associato non sono parametri imposti a priori, ma risultano endogeni al modello e riflettono le scelte di pianificazione adottate. Ciò consente di analizzare in modo realistico il trade-off tipico dell'ELSP tra dimensione dei lotti, tempi di setup e utilizzo della capacità produttiva.

Indipendentemente dall'esito del modulo Decide, il flusso converge successivamente verso la fase di disassemblaggio. Nel caso in cui sia richiesto un setup, l'entità attraversa prima il modulo dedicato al cambio di configurazione della risorsa; in caso contrario, accede direttamente alla lavorazione. Questa struttura garantisce continuità al flusso e mantiene il modello compatto e facilmente leggibile.

Il setup è modellato come un modulo process, un processo che utilizza la risorsa di disassemblaggio, in modo tale che, durante questa fase, la macchina risulti occupata e non disponibile per altre lavorazioni. Questa scelta consente di rappresentare correttamente il fatto che il setup consuma capacità produttiva, pur non generando output.

All'interno del modulo Process:

- L'entità seizes la risorsa di disassemblaggio;
- Viene applicato un tempo di setup, associato al cambio di tipologia prodotto a fine vita;
- Al termine del setup, la risorsa rimane allocata all'entità che prosegue verso la fase di disassemblaggio.

In questo modo, il setup non è trattato come un semplice ritardo temporale, ma come una vera e propria fase operativa che contribuisce all'utilizzo complessivo della risorsa.

La struttura del modello consente di distinguere in modo chiaro il tempo di setup dal tempo di disassemblaggio, pur mantenendo continuità nell'utilizzo della risorsa. Dopo aver completato il setup, l'entità accede direttamente al modulo di disassemblaggio, senza rilasciare la risorsa nel mezzo.

Questa impostazione permette di:

- Misurare separatamente il tempo speso in setup e quello speso in lavorazione;

- Analizzare l'impatto dei setup sull'utilizzo della risorsa;
- Mantenere una rappresentazione fedele del comportamento reale del sistema.

Dal punto di vista dei KPI, il tempo di setup contribuisce quindi sia al tempo totale di occupazione della macchina, sia al tempo di attraversamento delle entità nel sistema.

La modellazione del setup come processo che occupa la risorsa è coerente con l'impostazione teorica dell'ELSP, nel quale i setup rappresentano un elemento centrale del trade-off tra dimensione dei lotti e utilizzo della capacità produttiva.

Nel modello, la frequenza dei setup non è imposta direttamente, ma emerge come conseguenza della sequenza di lavorazione e della dimensione dei lotti adottati. Di conseguenza, il modulo Process dedicato al setup costituisce un elemento fondamentale per tradurre la logica dell'ELSP in un comportamento operativo osservabile all'interno della simulazione.

Al termine dell'eventuale fase di setup, l'entità accede al modulo Process dedicato al disassemblaggio vero e proprio. Questo modulo rappresenta la lavorazione principale del sistema e costituisce il punto in cui il prodotto a fine vita viene effettivamente trasformato in componenti riutilizzabili.

Il disassemblaggio è modellato come un processo che utilizza la stessa risorsa produttiva impiegata per il setup. La risorsa, già allocata durante l'eventuale fase di riconfigurazione, rimane quindi occupata anche durante la lavorazione, garantendo continuità nell'utilizzo della macchina ed evitando rilasci intermedi non realistici.

All'interno del modulo process di disassemblaggio:

- L'entità utilizza la risorsa di disassemblaggio;
- Viene applicato un tempo di lavorazione, differenziato in funzione della tipologia di prodotto a fine vita;
- Al termine della lavorazione, la risorsa viene rilasciata, rendendola disponibile per il prodotto successivo.

Questa impostazione consente di rappresentare in modo coerente il comportamento della risorsa, che risulta impegnata per l'intera durata del setup e della lavorazione, contribuendo in modo diretto all'utilizzo complessivo della capacità produttiva.

Una volta completato il disassemblaggio, l'entità prosegue verso i moduli successivi del flusso:

- Nei due assign successivi viene cambiato il currentType e LastTypeDiss e aggiornata la variabile LotSize al valore stabilito a priori (numero di prodotti in un lotto).

Successivamente, l'entità arriva in un Decide se è Item di tipo 1 allora si creano le variabili di InvPezzeJeans e InvZip, altrimenti InvPezzeCuoio e InvZip nei corrispondente Assign.

$$InvPezzeJeans = InvPezzeJeans + 3 * Lotto(Item)$$

$$InvPezzeCuoio = InvPezzeCuoio + 2 * Lotto(Item)$$

$$InvPezzeZip = InvPezzeZip + Lotto(Item)$$

Dove Lotto(Item) è una variabile creata ad hoc per calcolare l'inventario che ha gli stessi valori di LottoSize(Item)

Le entità uscite dagli Assign fluiscono nei blocchi di trasporto e vengono trasportate nella stazione successiva.

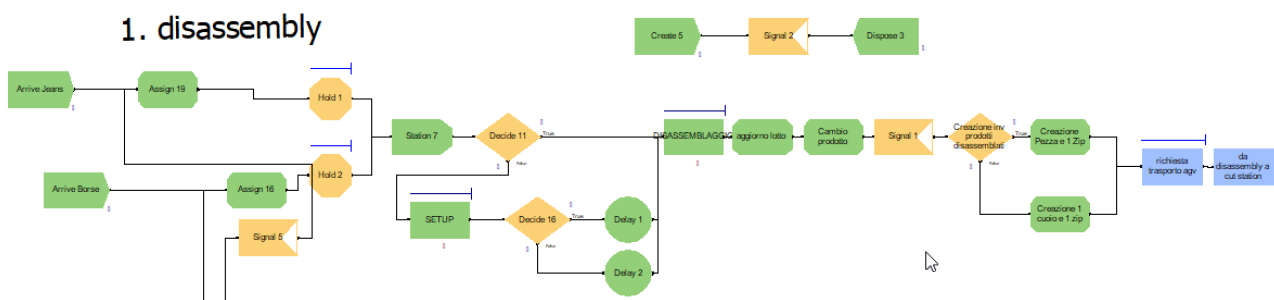


Figura 1.1 Stazione disassemblaggio – ELSP

Taglio

La fase di taglio rappresenta la prima lavorazione a valle del disassemblaggio e ha l'obiettivo di trasformare le pezze recuperate in semilavorati destinati alla fase di assemblaggio finale. Questa fase non è soggetta a politiche di pianificazione di tipo ELSP, ma opera come processo sequenziale alimentato dalla disponibilità dei materiali. Il flusso ha inizio presso la cut station, che identifica la localizzazione fisica della lavorazione di taglio. L'entità, una volta giunta alla station, attiva una richiesta di trasporto e viene instradata verso la risorsa dedicata al taglio.

Il modulo free 2 permette di rilasciare l'AGV al termine del trasporto, consentendo il

ritorno alla stazione iniziale e rendendolo nuovamente disponibile per future richieste di movimentazione. Successivamente, l'entità entra nel modulo *Process Taglio*, che rappresenta l'operazione di taglio vera e propria. In questo modulo:

- Viene utilizzata la risorsa di taglio;
- Viene applicato un tempo di lavorazione associato all'operazione e apposito per Item;
- Al termine del processo la risorsa viene rilasciata.

Una volta completato il taglio, il flusso prosegue verso un modulo *Decide*, che ha lo scopo di distinguere la tipologia di semilavorato generato in funzione del materiale lavorato. In particolare, il modulo *Decide* consente di separare il flusso tra:

- Semilavorati di borsetta, ottenuti dal taglio delle pezze di jeans;
- Semilavorati di portafoglio, ottenuti dal taglio delle pezze di cuoio.

I due rami del flusso convergono rispettivamente nei moduli *SL1 borsetta* e *SL2 portafoglio*, che conteggiano gli inventari dei semilavorati prodotti.

$$InvSLportafoglio = InvSLportafoglio + 2 * Lotto(Item)$$

$$InvSLborsetta = InvSLBorsetta + 2 * Lotto(Item)$$

E la conseguente riduzione dei disassemblati:

$$InvPezzeJeans = InvPezzeJeans - Lotto(Item)$$

$$InvPezzeCuoio = InvPezzeCuoio - Lotto(Item)$$

I semilavorati vengono poi instradati verso la fase successiva del processo mediante una richiesta di trasporto. Il modulo di trasporto collega la cut station alla swing station, che rappresenta il punto di ingresso della fase di cucitura.

2. cutting

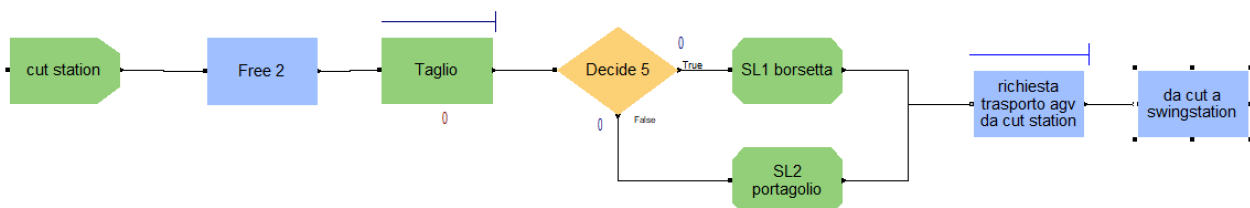


Figura 1.2 Cut station

Cucitura

La fase di cucitura costituisce l'ultima lavorazione del flusso logistico-produttivo e ha l'obiettivo di trasformare i semilavorati ottenuti dal taglio nei prodotti finiti. Questa fase non è soggetta a logiche di pianificazione di tipo ELSP, come il taglio, ma opera come processo sequenziale a valle del disassemblaggio e del taglio.

Il flusso ha inizio presso la swing station, che rappresenta la localizzazione fisica della fase di cucitura. Una volta giunta alla station, l'entità rilascia il mezzo di trasporto tramite il modulo Free, consentendo all'AGV di tornare disponibile per le movimentazioni successive.

Successivamente, l'entità accede al modulo Process *Cucitura*, che rappresenta la lavorazione vera e propria. In questo modulo:

- Viene utilizzata la risorsa dedicata alla cucitura;
- Viene applicato un tempo di lavorazione associato all'assemblaggio finale;
- Al termine del processo, la risorsa viene rilasciata.

Una volta completata la cucitura, il flusso prosegue verso un modulo Decide, utilizzato per distinguere la tipologia di prodotto finito generato. In funzione del tipo di semilavorato lavorato, l'entità instrada verso l'apposito Assign:

- Se $Item = 1 \rightarrow PF1$ borse

$$InvPF1 = InvPF1 + Lotto(Item)$$

$$InvSLborsetta = InvSLBorsetta - Lotto(Item)$$

$$InvZip = InvZip - Lotto(Item)$$

- Se $Item = 2 \rightarrow PF2$ portafoglio

$$InvPF2 = InvPF2 + Lotto(Item)$$

$$InvSLportafoglio = InvSLportafoglio - Lotto(Item)$$

I moduli citati sopra, rappresentano la generazione di prodotti finiti e costituiscono i punti in cui vengono raccolte le informazioni necessarie al calcolo dei KPI. In particolare, in corrispondenza di questi moduli vengono misurati indicatori quali il lead time di lotto (LT lotto PF1 e LT lotto PF2), che consentono di analizzare il tempo complessivo di attraversamento del sistema dalla fase iniziale fino al prodotto finito.

Il modulo Decide 10 è utilizzato per gestire la chiusura del ciclo produttivo e la successiva ripartenza del flusso dalla fase di disassemblaggio. Al termine della fase di cucitura e della generazione dei prodotti finiti, il flusso non viene infatti interrotto, ma viene riportato ai moduli Assign iniziali della fase di disassemblaggio.

Questa struttura consente di creare un loop chiuso, all'interno del quale le stesse entità continuano a circolare nel modello. In questo modo, all'interno della simulazione sono sempre presenti solamente due entità, rappresentative delle due tipologie di prodotto considerate. Tale scelta permette di controllare in modo più efficace la logica del modello, riducendo la complessità del flusso e limitando il rischio di errori di implementazione.

Il ritorno delle entità agli Assign iniziali consente inoltre di simulare una produzione ciclica continua, coerente con la logica del Common Cycle, senza dover generare nuove entità ad ogni ciclo. In questo modo, la ripetizione del processo produttivo avviene attraverso la reiterazione del flusso, mantenendo costante la struttura del modello e garantendo la coerenza del comportamento nel tempo.

Questa impostazione risulta particolarmente utile anche ai fini dell'analisi delle prestazioni, poiché consente di osservare il sistema in condizioni di regime e di raccogliere i KPI sull'intero flusso produttivo, senza introdurre effetti artificiali legati alla creazione o distruzione continua di entità.

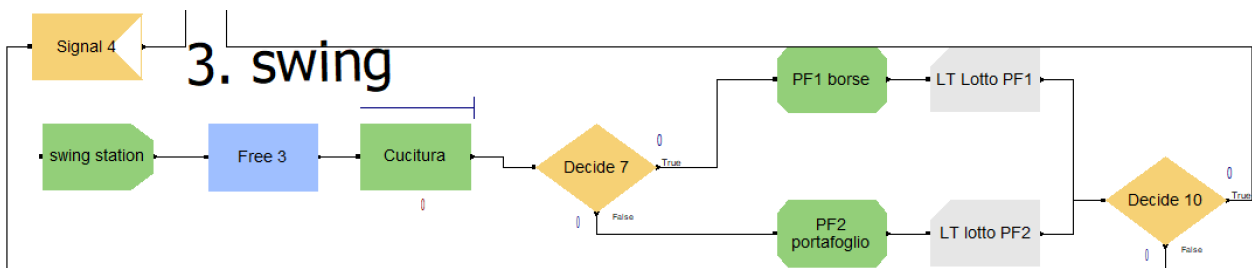


Figura 1.3 Swing station