

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Gestionale



Confronto tra politiche pull di controllo della produzione: Kanban, Conwip, Base Stock ed Extended Kanban

Relatrice:

Prof.ssa Arianna Alfieri

Candidato:

Giovanni Gunnella

Correlatore:

Prof. Claudio Castiglione

331162

Anno Accademico 2024-2025

SOMMARIO

La tesi esamina in chiave comparativa quattro politiche pull di controllo della produzione: Conwip, Kanban, Base Stock ed Extended Kanban (EXCS), applicate a una linea a cinque stazioni con buffer intermedi e scorta di prodotto finito. L'obiettivo è mostrare come la scelta della politica e la decisione dei parametri (C , K , S) incidano congiuntamente su prestazioni operative (TH, CT, WIP), livello di servizio (SL) e impatti economici legati alla giacenza del prodotto finito (Dwell) al variare della domanda, bilanciamento e variabilità di processo. L'elemento centrale è l'equilibrio tra regolarità del flusso, qualità del servizio e costi di giacenza.

La ricerca viene condotta su simulazione a eventi discreti, l'architettura della linea rimane invariata mentre si modificano sistematicamente i fattori di contesto. Vengono analizzati vari indicatori per ogni politica: TH, CT, WIP, utilizzi, SL e Dwell, stimati con l'utilizzo di un adeguato warm-up, un numero sufficiente di repliche e intervalli di confidenza in modo tale da garantire un corretto confronto e robustezza statistica.

Nel caso base analizzato, a parità di SL, si nota che Conwip e Base Stock mantengono CT e WIP più contenuti, mentre Kanban ed EXCS riescono a ridurre il Dwell grazie ad un maggiore buffering interno, tollerando tempi di attraversamento maggiori. L'esito è coerente con la legge di Little e con la diversa collocazione della scorta nelle diverse politiche.

In presenza di elevata variabilità dei tempi di processo o sbilanciamenti della linea, Conwip riesce a preservare la regolarità del ciclo grazie al vincolo globale, Base Stock raggiunge alti livelli di SL ma con valori crescenti di Dwell, Kanban necessita di una modifica dei cartellini mostrando maggiore sensibilità alla variabilità ed EXCS sposta in modo favorevole la frontiera tra SL e Dwell grazie ai due parametri K ed S .

Un elemento fondamentale dell'analisi è la frontiera delle scelte efficienti (SL – Dwell), applicabile alle politiche a controllo locale (Kanban e EXCS). Ciò consente di capire quali configurazioni dei parametri devono essere scartate poiché meno vantaggiose e di individuare un punto di equilibrio tra servizio offerto e costi associati alla giacenza del prodotto finito. Per Conwip e Base Stock la decisione risulta più lineare, l'aumento del singolo parametro fa crescere in contemporanea SL e Dwell.

Da queste osservazioni emerge che non esiste una politica migliore in assoluto, la scelta dipende dal contesto e dalle priorità che possono riguardare la stabilità del flusso, il rapporto tra CT e WIP, il servizio al cliente e il costo di giacenza del prodotto finito. Bisogna rivalutare la politica di gestione e la decisione dei parametri quando cambiano la domanda, la variabilità o la presenza di colli di bottiglia.

INDICE

1. Introduzione	5
1.1 Contesto e motivazioni	5
1.2 Obiettivo della tesi	5
1.3 Approccio Metodologico	6
2. Revisione della letteratura	7
2.1 Obiettivo	7
2.2 Fondamenti: push vs pull, buffering e metriche.....	7
2.3 Evidenze comparative dalla letteratura	7
2.3.1 Conwip vs Kanban: efficienza WIP - TH e stabilità.....	7
2.3.2 Base Stock/Extended Kanban vs WIP limitato.....	8
2.4 Variabilità di domanda, processo e carico	9
2.5 Colli di bottiglia, bilanciamento e sensibilità	10
2.6 Varianti ibride e sviluppi recenti delle politiche pull.....	11
2.7 Modellazione e impatti sul livello di servizio nel Base Stock	12
2.8 Confronti recenti tra Kanban, Conwip e sistemi ibridi	12
2.9 Posizionamento nella letteratura	13
3. Metodologia e piano sperimentale.....	14
3.1 Obiettivi specifici.....	14
3.2 Sistema di riferimento e scenari.....	14
3.3 Politiche implementate	15
3.4 Impostazione statistica	16
4. Risultati simulazione	17
4.1 Scenario base	17
4.1.1 Obiettivi e perimetro	17
4.1.2 Throughput TH e Utilizzo	18
4.1.3 Cycle Time CT e Work in Process WIP	19
4.1.4 Service Level e Dwell Time	20
4.1.5 Trade-off	22
4.1.7 Sintesi scenario base.....	26
4.2 Scenario A	27
4.2.1 Obiettivi e perimetro	27
4.2.2 Throughput TH e Utilizzo	27

4.2.3 Cycle Time CT e Work in Process WIP	28
4.2.4 Service Level SL e Dwell time	29
4.2.5 Trade-off	30
4.2.6 Confronto con il caso base	31
4.2.7 Sintesi scenario A	31
4.3 Scenario B	32
4.3.1 Obiettivi e perimetro	32
4.3.2 Throughput TH e Utilizzo	32
4.3.3 Cycle Time CT e Work in Process WIP	33
4.3.4 Service Level SL e Dwell time	34
4.3.5 Trade-off	35
4.3.6 Confronto con il caso base	36
4.3.7 Sintesi scenario B	37
4.4 Scenario C	38
4.4.1 Obiettivi e perimetro	38
4.4.2 Service Level SL e Dwell time	39
5. <i>Sintesi dei risultati</i>	41
5.1 Riepilogo comparato per politica	41
5.2 Relazioni di compromesso tra le prestazioni	41
5.3 Effetti e lettura della variabilità e sbilanciamento	42
5.4 Dinamiche di funzionamento delle politiche	42
5.5 Sintesi decisionale in funzione del contesto	43
6. <i>Confronto delle politiche</i>	43
6.1 Confronto a SL target nei quattro scenari	43
6.2 Robustezza e implicazioni di scelta	44
7. <i>Conclusioni</i>	45
7.1 Scelte efficienti e punto operativo	45
7.2 Contributi emersi dalle simulazioni comparative	46
7.3 Condizioni di preferibilità delle politiche	46
Appendice	48

1. Introduzione

1.1 Contesto e motivazioni

La gestione della produzione in contesti manifatturieri affetti da variabilità dei tempi di processo e dalla domanda necessita l'uso di politiche di controllo del flusso in grado di bilanciare: stabilità operativa del sistema, capacità di reagire rapidamente alle variazioni della domanda e di contenere i costi di giacenza dei prodotti finiti. Tra le principali politiche di controllo della produzione, che regolano i rilasci e il livello di WIP nel sistema influenzando la disponibilità del prodotto, si distinguono: Conwip, Kanban, Extended Kanban (EXCS) e Base Stock. L'analisi è condotta su un modello applicativo costituito da una linea di cinque stazioni con buffer intermedi e un buffer finale collegato alla domanda esterna.

Le decisioni che riguardano il WIP, la quantità di scorte presenti nel sistema e il meccanismo con cui vengono rilasciati nuovi prodotti incidono in modo diretto sulla probabilità di soddisfare la domanda in modo immediato, quindi sul livello di servizio. Allo stesso tempo influenzano la rapidità del flusso, la congestione che può formarsi nei vari punti della linea e i costi legati alla giacenza dei prodotti finiti oltre che alle eventuali penalità dovute al backlog. Bisogna valutare insieme prestazioni operative e di servizio tramite l'uso di trade-off.

1.2 Obiettivo della tesi

L'obiettivo della tesi è confrontare le quattro politiche pull citate, applicandole ad una struttura di base comune e valutare come le prestazioni variano in funzione della domanda e delle condizioni di processo. Nello specifico si intende:

- Valutare l'effetto sulla decisione dei parametri di controllo delle politiche (WIP, cartellini e livelli di stock) sul SL e sul Dwell.
- Valutare gli indicatori di servizio (service level, consegne immediate all'arrivo della domanda e ordini evasi in backlog) e operativi (CT, TH, WIP e utilizzi).
- Misurare il tempo medio di permanenza dei prodotti finiti disponibili a magazzino, con il fine di quantificare il costo di giacenza per valutare il bilancio con i prodotti evasi in backlog.
- Verificare la robustezza delle politiche nei diversi livelli di variabilità e gradi di bilanciamento della linea.

1.3 Approccio Metodologico

La valutazione è condotta tramite il software ARENA, vengono eseguite simulazioni ad eventi discreti utilizzando uguali modelli di domanda e condizioni operative identiche per tutte le politiche, in questo modo, è possibile garantire un confronto affidabile. Il piano sperimentale prevede la variazione sistematica dei seguenti fattori: parametri di controllo, domanda, variabilità dei processi e bilanciamento della linea. Gli indicatori trovati vengono analizzati utilizzando un numero prefissato di repliche per poter stimare gli intervalli di confidenza. Questo metodo permette di osservare medie e dispersione dei valori ottenuti.

Viene analizzato un caso base di riferimento e vari scenari di stress, valutando i principali trade-off e le variazioni che portano a privilegiare l'adozione di una politica rispetto ad un'altra. Per effettuare un'analisi accurata, si ricorre all'uso di grafici e tavelle (es: relazioni tra TH e WIP, livello di servizio che varia in base ai parametri di controllo, backlog e tempi medi), tenendo in considerazione eventuali costi economici legati alla giacenza del prodotto finito o agli ordini evasi in ritardo.

2. Revisione della letteratura

2.1 Obiettivo

La seguente revisione della letteratura ha l'obiettivo di analizzare e confrontare le principali politiche di controllo della produzione di tipo pull (Kanban, Conwip, Base Stock ed Extended Kanban) applicate a linee con domanda stocastica, evidenziandone le differenze operative e le prestazioni. A tal fine vengono richiamati i concetti fondamentali che consentono di interpretare tali politiche, quali la distinzione tra sistemi push e pull, la legge di Little, il ruolo del buffering nella gestione della variabilità e le relative prestazioni in termini di throughput, cycle time, WIP, livello di servizio, Dwell e utilizzo delle risorse.

2.2 Fondamenti: push vs pull, buffering e metriche

Nei sistemi push il rilascio è determinato dalla pianificazione e dalle previsioni, mentre nei sistemi pull il consumo reale ‘tira’ i rilasci e va a limitare il WIP. In presenza di variabilità, i sistemi pull mostreranno sempre minori livelli di WIP e CT rispetto ai sistemi push, dovuti ai vincoli esplicativi sul contenuto del sistema e alla sincronizzazione dei flussi più stretta (Spearman e Zazanis, 1992).

La legge di Little si focalizza sul legame tra WIP, TH e CT ed è dato da $WIP = TH \times CT$, valido con ampia generalità (Little, 1961).

La variabilità viene gestita attraverso capacità, inventario e lead time. Le politiche pull si distinguono in base al modo in cui coordinano il rilascio dei lotti e alla localizzazione del buffer di controllo. Nel sistema Kanban il rilascio è vincolato da un limite locale di WIP in ciascuna stazione, mentre nel sistema Conwip il monitoraggio riguarda un limite globale di WIP per l'intera linea. La politica Base Stock è caratterizzata da uno stock finale che autorizza il rilascio verso il sistema produttivo. L'Extended Kanban integra entrambe le logiche, un rilascio condizionato sia dallo stock finale sia da un vincolo di WIP interno. (Spearman e Zazanis, 1992; Liberopoulos e Dallery, 2000).

2.3 Evidenze comparative dalla letteratura

2.3.1 Conwip vs Kanban: efficienza WIP - TH e stabilità

Nei sistemi Kanban il controllo è di tipo locale, ogni stazione è regolata da un numero definito di cartellini K che limita il WIP nel punto specifico della linea. Nel Conwip

invece il controllo è globale, si utilizza un numero totale di cartellini C per l'intero sistema ed ogni uscita dà il permesso per un nuovo solo ingresso. La differenza strutturale fra le due politiche ha due effetti chiave, nel Kanban possiamo ricorrere a sbilanciamenti locali, ovvero, mancanza di materiale a valle o accodamento a monte, nel Conwip, dal momento che il rilascio è sincronizzato a livello di sistema, si tende a smussare le fluttuazioni mantenendo più regolare il WIP lungo la linea (Spearman, Woodruff e Hopp, 1990; Spearman e Zazanis, 1992).

Dai risultati di studi e simulazioni emerge che, a parità di obiettivi produttivi, Conwip impiega in media livelli inferiori di WIP rispetto a Kanban, soprattutto quando c'è un aumento della variabilità oppure quando ci sono più varianti di prodotto (Spearman, Woodruff e Hopp, 1990; Spearman e Zazanis, 1992). Limitando il WIP totale, il Conwip riduce la formazione di accumuli locali e l'utilizzo inefficiente dei buffer, ottenendo un rapporto WIP→TH più favorevole. Nelle linee bilanciate le prestazioni possono convergere, ma con l'aumento della variabilità, il Conwip tenderà a mantenere lo stesso TH ma con meno WIP rispetto al Kanban (Karaesmen e Dallery, 2000).

Il Kanban, al contrario, grazie al controllo locale, è in grado di mantenere un equilibrio più stabile tra le stazioni. L'applicazione di tempi più volatili porta a una propagazione delle instabilità comportando code lunghe a monte del collo e/o mancanza di prodotti a valle richiedendo modifiche sulla decisione dei cartellini K per stazione (Bonvik, Couch e Gershwin, 1997). Il Conwip, grazie alla regolazione del rilascio all'uscita della linea, consente di assorbire le oscillazioni locali attraverso il vincolo globale sul WIP, riducendo la probabilità di accumuli o mancanza di prodotti lungo la linea. Dal punto di vista statistico, a parità di TH/SL, questa configurazione produce una minore dispersione dei CT e una maggiore uniformità del WIP lungo i diversi stadi della linea (Spearman e Zazanis, 1992; Karaesmen e Dallery, 2000).

2.3.2 Base Stock/Extended Kanban vs WIP limitato

Le politiche Base Stock (BS) ed Extended Kanban (EXCS) mirano a garantire la prontezza di servizio spostando il buffer sul finito. Ciò è reso possibile dal mantenimento di uno stock S di prodotti pronti per essere immediatamente disponibili alla domanda, con un conseguente aumento del service level (SL), soprattutto quando il coefficiente di variazione degli arrivi è elevato o quando l'irregolarità del carico si avvicina al limite di capacità. Impostare un livello S alto porta ad avere più unità ferme

a valle e di conseguenza un maggiore costo di giacenza (Dwell); per Little però il magazzino disponibile è proporzionale a TH x Dwell; quindi, al crescere del SL aumenta anche il tempo medio di giacenza (Little, 1961). L'EXCS consente di spostare il buffer tra il prodotto finito e il processo produttivo poiché combina il controllo sullo stock finale con un limite locale di WIP tramite i cartellini kanban. La scelta delle variabili (K, S) è quindi fondamentale per raggiungere il livello di servizio desiderato con minori costi di giacenza rispetto al Base Stock (Liberopoulos e Dallery, 2000).

Le politiche Conwip e Kanban, limitando il WIP e mantenendo il CT contenuto, riescono a stabilizzare il flusso. In condizioni con basso carico e variabilità moderata si ottengono livelli di WIP minori e CT più breve. La situazione cambia se la domanda diventa irregolare o se la linea presenta colli di bottiglia, per ottenere lo stesso livello di servizio è necessario aumentare il numero di cartellini in modo uniforme nel Conwip e specifico per ogni stazione nel Kanban. In sintesi, Base Stock ed EXCS ottengono un maggiore livello di servizio perché collocano una quota maggiore di scorta nel magazzino dei prodotti finiti, Conwip e Kanban danno priorità alla riduzione del lead time limitando il WIP e di conseguenza il CT. (Spearman e Zazanis, 1992; Bonvik, Couch e Gershwin, 1997; Karaesmen e Dallery, 2000).

La letteratura mostra che, in condizioni caratterizzate da un'elevata variabilità della domanda o da alti tassi di utilizzo delle risorse produttive, la politica EXCS raggiunge il livello di servizio desiderato con costi di giacenza inferiori al Base Stock grazie alla flessibilità della combinazione dei parametri K e S, richiedendo minor incremento dei parametri rispetto alle politiche con WIP controllato. Al contrario, in scenari con bassa variabilità e carico moderato, le politiche Conwip e Kanban risultano più efficienti, in quanto permettono di contenere CT e WIP. (Liberopoulos e Dallery, 2000; Spearman e Zazanis, 1992; Xanthopoulos, 2021).

2.4 Variabilità di domanda, processo e carico

L'aumento della variabilità dei tempi di lavorazione, a parità di media e mantenendo la domanda al di sotto della capacità del collo di bottiglia, non fa variare il TH medio né l'utilizzo del collo, ma influisce sul CT, WIP, Dwell e sulla dispersione dei valori (Spearman e Zazanis, 1992; Bonvik, Couch e Gershwin, 1997). Se gli interarrivi o i tempi di lavorazione diventano più irregolari, per mantenere lo stesso SL, occorre più buffer oppure si verifica un aumento del backlog, con conseguente allungamento dei

tempi di evasione. Secondo Little (1961), a parità di TH, l'aumento di WIP comporta un CT più alto; quindi, se il buffer è sul finito crescerà pure il magazzino disponibile e quindi il Dwell.

L'effetto della variabilità si amplifica quando il carico si avvicina a 1 o quando è presente un collo di bottiglia marcato, in tali condizioni, piccoli aumenti del coefficiente di variazione o della domanda comportano significativi incrementi di WIP e CT. La presenza di queste condizioni mette in risalto le differenze tra politiche, per mantenere lo stesso SL, Conwip e Kanban tendono ad aumentare il parametro di controllo con il rischio di ottenere CT più elevati; le politiche Base Stock e EXCS preservano il livello di servizio a scapito di un maggiore Dwell (Liberopoulos e Dallery, 2000, Karaesmen e Dallery, 2000). EXCS consente di spostare il buffer tra produzione in corso e prodotto finito, permettendo un controllo più flessibile delle configurazioni caratterizzate da elevata variabilità o presenza di colli di bottiglia. (Xanthopoulos, 2021).

Con l'aumento del coefficiente di variazione della domanda o della variabilità di processo, la semiampiezza dell'intervallo di confidenza del CT tende ad aumentare, indicando una maggiore dispersione dei risultati e una riduzione della stabilità del sistema. EXCS offrirà lo stesso SL con minore Dwell rispetto a Base Stock; Conwip e Kanban risultano più competitivi in contesti caratterizzati da bassa variabilità, offrendo valori di CT e WIP più contenuti. (Spearman e Zazanis, 1992; Bonvik, Couch e Gershwin, 1997; Liberopoulos e Dallery, 2000).

2.5 Colli di bottiglia, bilanciamento e sensibilità

La presenza del collo di bottiglia determina la capacità complessiva della linea. Quando il carico del collo di bottiglia aumenta (tendendo a 1) si generano crescite non lineari di WIP e CT dovute a piccole variazioni della media o della variabilità (curva a hockey) (Spearman e Zazanis, 1992). Nelle linee sbilanciate si manifesta spesso un effetto di congestione nelle stazioni a monte del collo (blocking), mentre a valle prevale la mancanza di prodotti da lavorare (starving); il risultato è un flusso irregolare con tempi di attraversamento più lunghi (Bonvik, Couch e Gershwin, 1997). La propagazione di questi effetti viene attenuata dal bilanciamento delle medie, quando le asimmetrie e la variabilità sono ridotte, il rilascio e la produzione risultano più regolari.

Nel Kanban, il controllo locale richiede una decisione dei cartellini K per stazione, a monte del collo di bottiglia il numero di cartellini viene aumentato per evitare blocchi, mentre a valle si riduce per prevenire accumuli inutili (Bonvik, Couch e Gershwin, 1997). Il Conwip, basato su un rilascio globale, tende a mitigare gli effetti di blocking e starving e risulta meno sensibile a piccoli sbilanciamenti di linea. (Karaesmen e Dallery, 2000). Nelle politiche Base Stock ed EXCS, la presenza di un buffer di prodotto finito a valle contribuisce a mantenere stabile il livello di servizio anche in presenza di colli di bottiglia; nell' Extended Kanban i parametri K ed S permettono di spostare il buffer nei nodi più critici, ottenendo quindi SL più alto e Dwell più contenuto rispetto al Base Stock (Liberopoulos e Dallery, 2000).

In scenari caratterizzati da colli di bottiglia o da elevato tasso di utilizzo delle risorse, la politica Conwip si dimostra più robusta nel mantenimento del flusso, mentre l'EXCS offre maggiore flessibilità e il Kanban si distingue per l'efficacia della regolazione locale dei singoli stadi (Karaesmen e Dallery, 2000; Bonvik, Couch e Gershwin, 1997; Xanthopoulos, 2021).

2.6 Varianti ibride e sviluppi recenti delle politiche pull

L'esigenza di coordinare segnali locali con vincoli globali causa la nascita degli ibridi, nuove tipologie di politica di controllo. Tra questi vi sono Hybrid Kanban – Conwip e Base Stock – Kanban – Conwip, una quota di cartellini viene associata alle singole stazioni mentre la restante parte resta in circolo a livello globale, in questo modo si riesce a limitare la formazione di code a monte delle stazioni, senza tralasciare il controllo sul WIP globale (Onyeocha, 2015). Gli ibridi attenuano la propagazione della variabilità nel flusso rispetto ai controlli puramente locali e consentono di ottimizzare la combinazione tra buffer e colli di bottiglia effettivi.

Il Base Stock – Conwip ha l'obiettivo di mantenere una posizione d'inventario target S e in contemporanea limitare il WIP circolante con il parametro di tipo Conwip C. La scorta sul finito contribuisce a garantire il livello di servizio, mentre il limite al WIP previene tempi di ciclo eccessivi con sovraccarichi a monte e blocchi a valle (Al-Hawari, 2018).

In condizioni di alta variabilità della domanda o di linea multiprodotto, la politica che si basa sui parametri S e C presenta una migliore robustezza in confronto alle politiche che si basano esclusivamente su S o su C. Studi dimostrano inoltre che l'allocazione

del buffer in prossimità delle risorse critiche incrementa la stabilità del throughput e una riduzione della possibilità di mancanza di prodotti da lavorare a monte del collo di bottiglia. La politica Extended Kanban consente di ottenere livelli di servizio analoghi a quelli del Base Stock, con tempi medi di giacenza inferiori, grazie alla decisione mirata dei parametri locali e globali (Ang, 2010).

2.7 Modellazione e impatti sul livello di servizio nel Base Stock

Studi evidenziano come nel Base Stock la scelta del parametro S sia fortemente influenzata dalla tipologia di domanda e dal grado d'incertezza del lead time. In presenza di una domanda composta, incrementare S consente di ottenere miglioramenti significativi delle prestazioni fino al raggiungimento della saturazione della stazione vincolante. Oltre tale soglia, gli incrementi diventano marginali con costi di giacenza che crescono in modo pressoché lineare (Saidane, 2013). La decisione del parametro S, se fatta in maniera casuale, può produrre configurazioni sbilanciate con alti livelli di scorte di prodotto finito senza reali benefici sul lead time percepito.

Quando la domanda presenta intermittenze o arriva a lotti, l'uso di una politica che si basa solo sul parametro S (target di stock sul finito) tende a spostare l'intera scorta disponibile verso il prodotto finito. Ciò comporta un miglioramento del SL, ma di conseguenza, un aumento del Dwell. Introdurre un vincolo sul WIP a monte del collo di bottiglia porta ad una maggiore stabilità del flusso, si riduce la variabilità dei tempi di ciclo e si raggiunge lo stesso livello di servizio con scorte di prodotti finiti inferiori (Saidane, 2013; Thurer, 2024).

2.8 Confronti recenti tra Kanban, Conwip e sistemi ibridi

La letteratura mostra come il Conwip riesca a mantenere un vantaggio nel contenimento del WIP e, di conseguenza, del CT a parità di TH, specialmente quando vi è un'alta variabilità o linea multiprodotto. Il Kanban risulta invece più efficace quando è necessario un controllo puntuale sulle singole stazioni, grazie all'uso di segnali visivi che consentono di definire priorità operative locali. I sistemi ibridi si collocano in una posizione intermedia, riescono a mantenere un controllo globale sul WIP pur conservando un'adeguata capacità di regolazione locale. (Pettersen, 2009).

Recenti studi confermano che, aumentando l'incertezza, i sistemi ibridi riescono a spostare in modo favorevole la frontiera tra SL e Dwell rispetto ai controlli puri, ciò si

verifica in particolare quando il collo è stabile ma i tempi di processo a monte presentano maggiore variabilità (Tosanovic, 2021).

La scelta tra le diverse politiche di gestione Kanban, Conwip e ibridi dipende dal criterio di ottimo adottato. Se il principale obiettivo è il SL, è opportuno garantire un'adeguata disponibilità di prodotti finiti e mantenere livelli di WIP più elevati in prossimità del collo di bottiglia. Viceversa, quando la priorità è ridurre il CT o limitare il WIP, risulta più efficace un controllo globale come quello del Conwip che consente di alimentare in modo regolare il collo di bottiglia e stabilizzare il flusso produttivo (Pettersen, 2009; Tosanovic, 2021).

2.9 Posizionamento nella letteratura

Le politiche di controllo pull come Kanban, Conwip e Base Stock sono ampiamente trattate nella letteratura classica di Spearman, Zazanis, Liberopoulos e Dallery, che ne analizza la logica di funzionamento e le principali prestazioni in termini di TH, WIP e CT.

Nonostante l'ampia diffusione di questi studi, i confronti diretti tra le diverse politiche, soprattutto in sistemi complessi o multiprodotto, risultano ancora limitati. Le analisi più recenti fatte da Xanthopoulos, Saidane e Thurer approfondiscono scenari specifici, ad esempio l'effetto della variabilità o la gestione di linee sbilanciate considerando solo un sottoinsieme delle politiche pull.

3. Metodologia e piano sperimentale

3.1 Obiettivi specifici

Il lavoro della tesi mira a confrontare le quattro politiche pull: Conwip, Kanban, Extended Kanban (EXCS) e Base Stock. La valutazione è condotta tramite simulazione ad eventi discreti mantenendo costante la configurazione del sistema. Viene fatta variare in modo controllato la variabilità dei tempi di processo, il bilanciamento della linea e l'interarrivo di domanda.

L'analisi fa uso di indicatori operativi (throughput, cycle time, WIP, utilizzi), di servizio (service level) ed economici (Dwell).

Nello specifico, la tesi propone di:

- Confrontare le politiche su KPI comparabili, isolando l'effetto delle sole regole di controllo (rilasci, cartellini, stock level).
- Valutare la funzione dei parametri di ogni politica: numero totale di cartellini C per il Conwip, numero di cartellini K in ogni stazione per Kanban e EXCS, stock level S per Base Stock e EXCS.
- Analizzare la robustezza delle politiche in variazione della domanda, linea sbilanciata e aumento della variabilità (scenari di stress).

3.2 Sistema di riferimento e scenari

Nello studio si adotta una linea composta da cinque stazioni con la presenza di un buffer finale a contatto con la domanda. Tutte le politiche di controllo hanno in comune le condizioni operative di base: struttura della linea, tempi medi di lavorazione e distribuzione della domanda. Questo accorgimento consente di isolare l'effetto della regola di controllo. La valutazione è effettuata tramite il software Arena che tratta simulazione ad eventi discreti.

Consideriamo un caso base e tre scenari di stress:

- Caso base: Linea bilanciata con variabilità moderata
- Scenario A: Aumento della domanda a parità di variabili dal caso base
- Scenario B: Introduzione di uno sbilanciamento nei tempi delle macchine.
- Scenario C: Aumento della variabilità nelle stazioni.

In ogni scenario si procede con una variazione controllata dei parametri di ciascuna politica. Gli indicatori che vengono misurati in ogni combinazione di politica, scenario e parametri sono: TH, CT, WIP, utilizzi, SL, Dwell, backlog e semiampiezza dell'intervallo di confidenza del CT.

Le statistiche vengono registrate in regime stazionario, dopo un periodo di warm-up e su un numero adeguato di repliche per garantire l'affidabilità dei risultati. Tale configurazione permette di stimare la variabilità delle misure, ottenendo medie e intervalli di confidenza.

3.3 Politiche implementate

Struttura comune:

- Dopo il completamento della stazione finale, il prodotto entra nello stock di finito.
- All'arrivo della domanda, se ci sono prodotti nel magazzino prodotti finiti, la domanda preleva direttamente il prodotto e il tempo medio che intercorre tra completamento della lavorazione e prelievo da parte della domanda è il Dwell time; in caso contrario, la non presenza di prodotti nel magazzino porta ad un aumento del backorder.
- Al completamento dell'ultima lavorazione del prodotto, se ci sono ordini arretrati, il prodotto viene consegnato immediatamente attribuendo Dwell = 0.

Conwip limita il WIP totale tramite il numero totale di cartellini C. Al termine dell'ultima lavorazione, il prodotto continua a trattenere il cartellino e solo all'arrivo della domanda, che preleva l'ultimo prodotto, avviene l'autorizzazione per il rilascio di un nuovo prodotto all'inizio della linea; quindi, il completamento della lavorazione del prodotto non abilita nessun nuovo rilascio. Il parametro C rappresenta il numero totale di prodotti presenti contemporaneamente nella linea.

Nel Kanban ogni stazione opera solo se è disponibile un cartellino K, si assume che ad ogni cartellino corrisponde un prodotto. L'arrivo della domanda preleva un prodotto e restituisce il cartellino all'ultima stazione per poter ricominciare la lavorazione. L'avvio della lavorazione della risorsa M libera automaticamente il cartellino della risorsa M-1. Il comportamento del sistema è determinato dai parametri K_i per ogni risorsa.

Base Stock ha l'obiettivo di mantenere la inventory position IP (On-hand + WIP – Backlog) allo stesso livello dello stock level target S preimpostato. Si rilascia un nuovo prodotto all'ingresso della linea quando il GAP tra IP e Stock Level è maggiore di 0. Il parametro S rappresenta il livello di scorta target.

Extended Kanban (EXCS) combina la logica del Base Stock e del Kanban sui singoli stadi. Ogni risorsa presenta uno stock level target che abilita la produzione solo se vi è almeno un cartellino libero. I parametri di controllo sono K_i e S_i per ogni risorsa.

3.4 Impostazione statistica

L'impostazione statistica definisce le modalità con cui vengono raccolti e analizzati i dati di simulazioni.

- Per ogni configurazione viene applicato un periodo di warm-up corrispondente a 10.000 minuti, necessario per raggiungere un regime stazionario delle variabili di interesse (scorte nel magazzino prodotti finiti e ordini arretrati) eliminando la fase transitoria iniziale.
- La durata di simulazione per ogni replica è pari a 100.000 minuti.
- Per ogni scenario vengono eseguite dieci repliche indipendenti, numero scelto per avere un buon equilibrio tra affidabilità statistica e tempi di calcolo, sufficiente a garantire intervalli di confidenza stabili per gli indicatori di prestazione.
- Le stime sono espresse come media \pm semiampiezza dell'intervallo di confidenza.
- Si assume l'assenza di guasti o fermi macchina, il sistema di funzionamento è continuo 24 h/giorno senza turni programmati.

4. Risultati simulazione

4.1 Scenario base

4.1.1 Obiettivi e perimetro

Lo scenario base rappresenta il riferimento della tesi ed è utilizzato come caso di studio principale e come base di confronto per gli scenari successivi. Il calcolo dell'effetto delle diverse politiche di controllo viene effettuato in condizioni controllate, ovvero, tramite linea bilanciata, variabilità moderata, prodotto unico e nessun guasto/setup. La decisione precedente mira a isolare le sole regole di rilascio e di posizionamento del buffer.

Il confronto viene fatto a parità di livello di servizio SL (circa del 95%). Questa decisione mira ad evitare che differenze di prestazioni siano dovute dai diversi livelli di servizio.

Consideriamo come KPI prioritari: cycle time (CT), work in process (WIP) e service level (SL). A supporto troviamo Dwell time (tempo medio di giacenza dei prodotti finiti nel magazzino disponibile), backlog e utilizzi; viene attenzionata la precisione statistica del CT tramite la semiampiezza dell'intervallo di confidenza.

Lo scenario base viene modellizzato con interarrivo di domanda EXPO (2min), tempi di processo delle risorse TRIANG (0,8; 1; 1,2)min, disciplina FIFO, funzionamento 24/7 e linea bilanciata.

La linea bilanciata prevede una distribuzione dei parametri uniformi per stazione nelle politiche di controllo locale, le configurazioni che portano ad un $SL \pm 95\%$ sono riportate nella tabella 1.

	Conwip (C)	Kanban (K)	EXCS (K; S)	Base Stock (S)
Parametri	7	3	4; 3	8

Tabella 1 – Scelta parametri per politica scenario base

Tramite questo perimetro, lo scenario base permette di:

1. Confrontare le politiche a parità di livello di servizio.
2. Analizzare i risultati evidenziando i trade-off tra CT, WIP, SL e Dwell.
3. Offrire termini di paragone per gli scenari successivi.

4.1.2 Throughput TH e Utilizzo

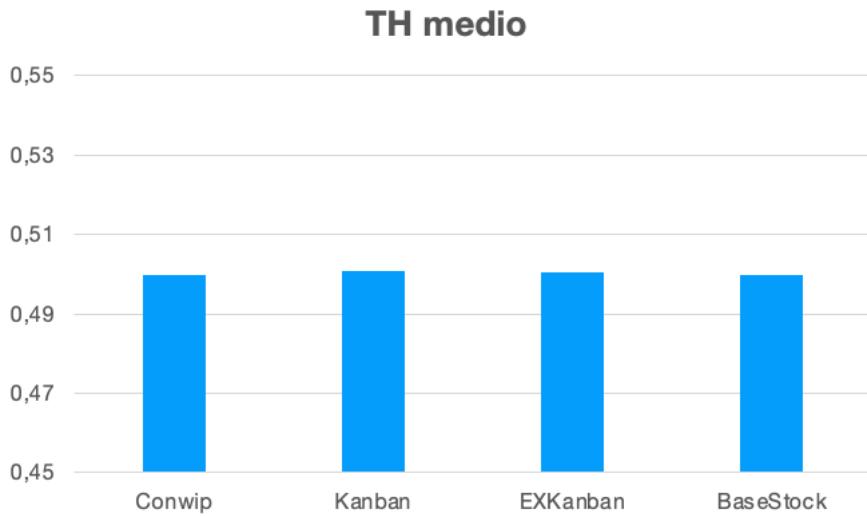


Figura 1 – Throughput medio per politica scenario base

Dalla figura 1 si evince che il throughput è allineato tra le politiche con valori intorno a 0,50 pz/min. Lo scarto tra massimo e minimo è trascurabile e ciò conferma che la linea sia bilanciata, non satura e che la capacità effettiva sia costante. Questo risultato è fondamentale per non attribuire i confronti successivi ad effetti legati alla capacità e ci consente di osservare le differenze su CT, WIP e alle regole di rilascio.

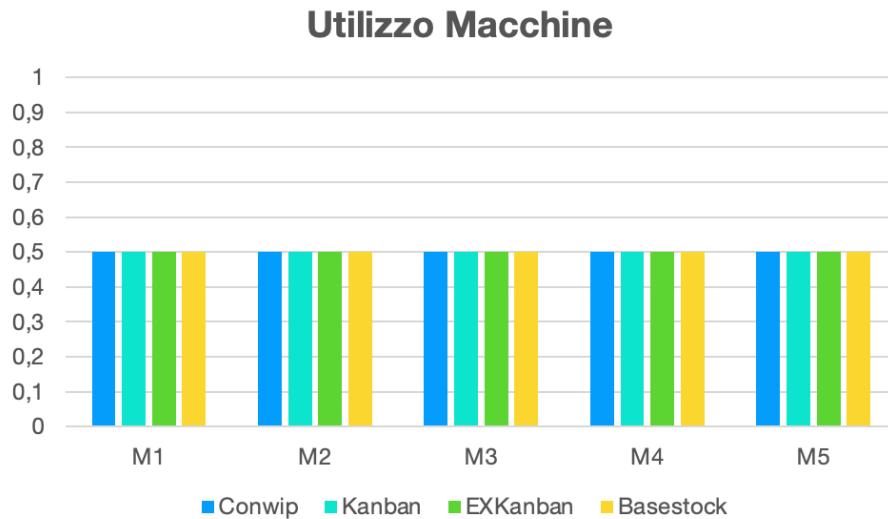


Figura 2 – Utilizzo medio delle stazioni scenario base

Gli utilizzi delle stazioni si stabilizzano intorno a 0,50. L'uniformità degli utilizzi è coerente con i tempi medi di processo ≈ 1 e con $TH \approx 0,50$. Nessuna evidenza di collo di bottiglia e assenza di saturazioni.

4.1.3 Cycle Time CT e Work in Process WIP

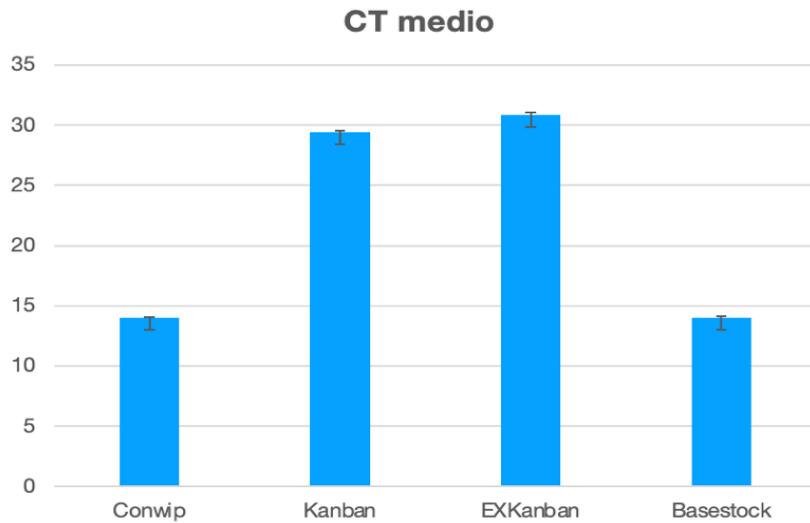


Figura 3 – Cycle time medio per politica (media ± semiampiezza intervallo di confidenza) scenario base

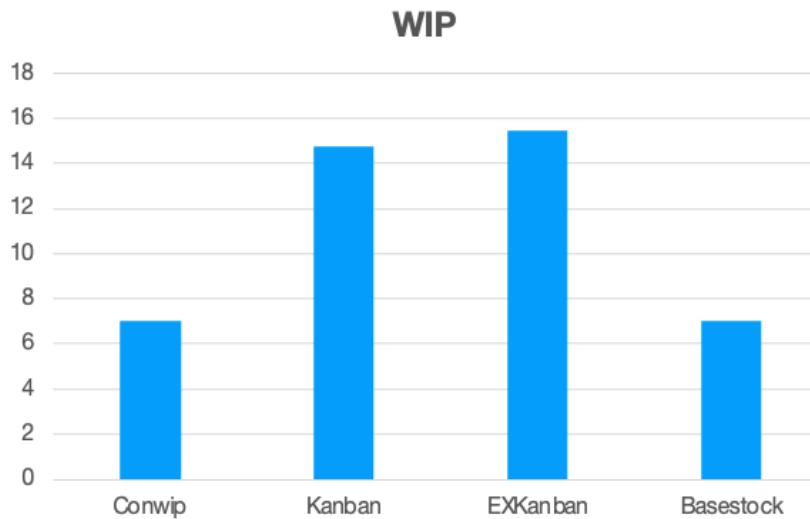


Figura 4 – Work in Process medio per politica scenario base

A parità di TH; si osserva come il CT aumenta al crescere del WIP, come atteso dalla relazione di Little.

I risultati mostrano:

- Conwip: $CT = 14,005 \pm 0,095$ min; WIP = 6,9997
- Base Stock: $CT = 14,041 \pm 0,091$ min; WIP = 7,0178
- Kanban: $CT = 29,399 \pm 0,116$ min; WIP = 14,7197
- EXCS: $CT = 30,84 \pm 0,208$ min; WIP = 15,4351

Le prestazioni nel Conwip e Base Stock sono molto simili, con CT e WIP bassi.

Le prestazioni nel Kanban e EXCS subiscono una variazione rispettivamente del 110% e 120%.

La semiampiezza dell'intervallo di confidenza sul CT è ridotta (inferiore all'1% in tutte le configurazioni), ciò indica una buona precisione statistica delle stime. Per quanto riguarda la differenza tra Kanban ed EXCS, il valore leggermente superiore del CT e del WIP nell'EXCS è coerente con la struttura della politica di gestione, che sposta parte della capacità verso il prodotto finito aumentando il materiale circolante complessivo.

4.1.4 Service Level e Dwell Time

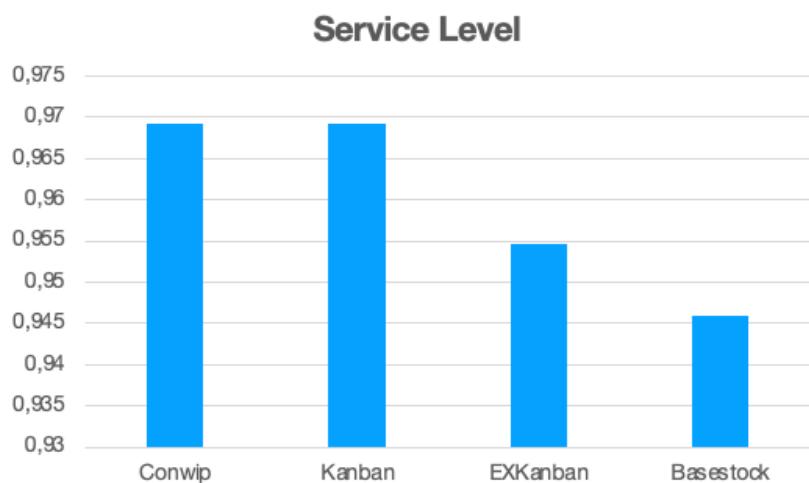


Figura 5 – Service level medio per politica scenario base

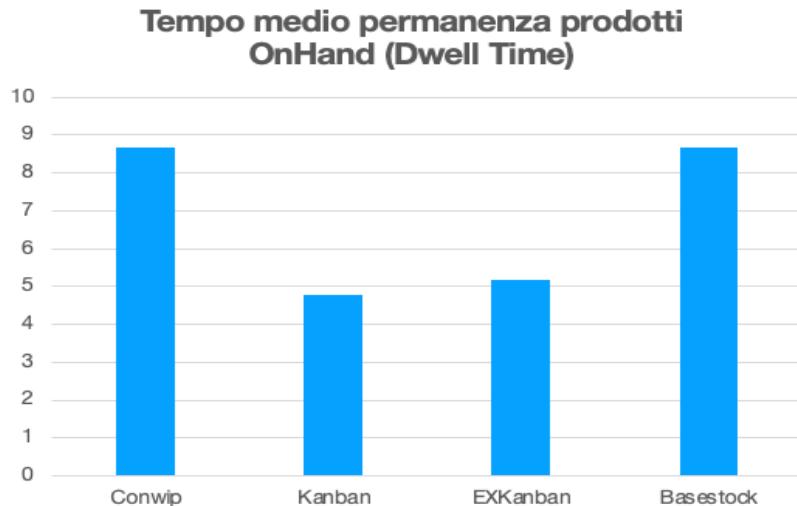


Figura 6 – Dwell Time medio per politica scenario base

La scelta dei parametri citati in tabella 1 porta, per ogni politica, ad avere valori di SL diversi.

I risultati mostrano:

- Conwip: SL = 0,9692; Dwell = 8,66 min
- Base Stock: SL = 0,946; Dwell = 8,66 min
- Kanban: SL = 0,9692; Dwell = 4,79 min
- EXCS: SL = 0,9547; Dwell = 5,18 min

Si nota che nel Kanban e EXCS si hanno giacenze sul finito più contenute, mentre Conwip e Base Stock tendono ad avere permanenze più lunghe. I valori sono coerenti con la logica delle politiche, Kanban e EXCS concentrano la scorta lungo la linea, riducendo così il livello di prodotto finito; al contrario Conwip e Base Stock accumulano una maggiore quota di scorte disponibili per la domanda, con conseguente incremento del Dwell.

4.1.5 Trade-off

4.1.5.1 Trade-off SL-Dwell

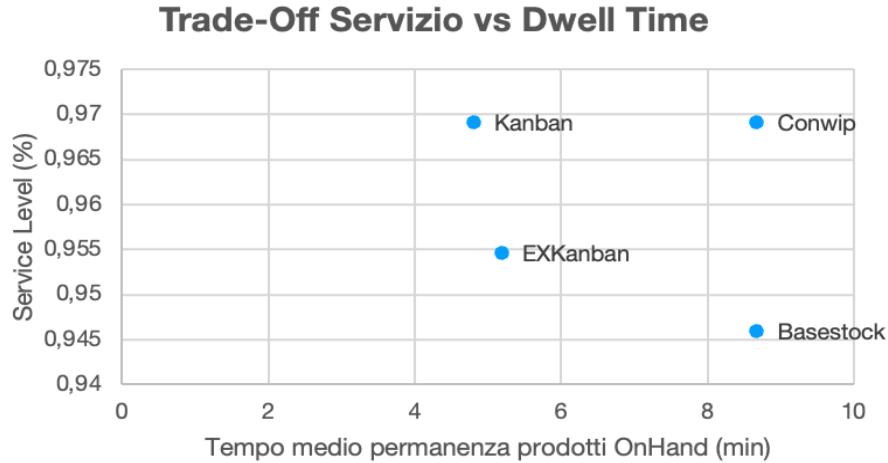


Figura 7 - Trade-off SL vs Dwell scenario base

Si nota come, a parità di SL, il Kanban domina sul fronte Dwell rispetto a Conwip. EXCS riesce a mantenere livelli di Dwell intermedi collocandosi più in basso sul SL. Base Stock evidenzia la combinazione più sfavorevole avendo il SL più basso insieme al Dwell più alto.

4.1.5.2 Trade-off WIP-CT

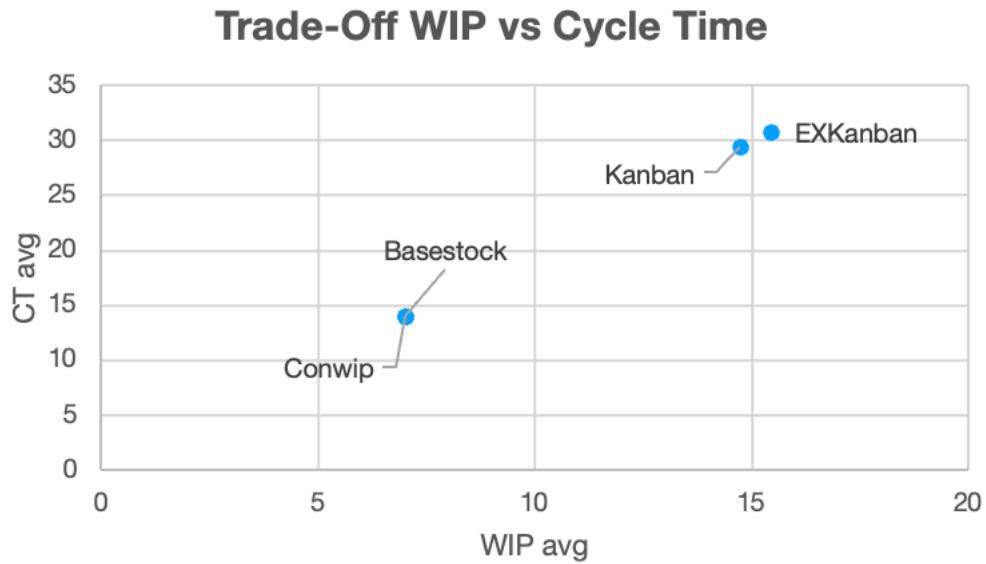


Figura 8 – Trade-off WIP vs CT scenario base

La figura 8 evidenzia la divisione dei punti in due raggruppamenti, Conwip e Base Stock si trovano nella regione di basso WIP e basso CT, Kanban e EXCS nella regione

alto WIP e alto CT. L'EXCS è leggermente peggiore del Kanban dovuto alla scelta dei parametri K, S che portano ad avere un WIP leggermente più alto.

4.1.6 Sensibilità del servizio ai parametri

4.1.6.1 Conwip – effetto del numero di cartellini C su SL e Dwell

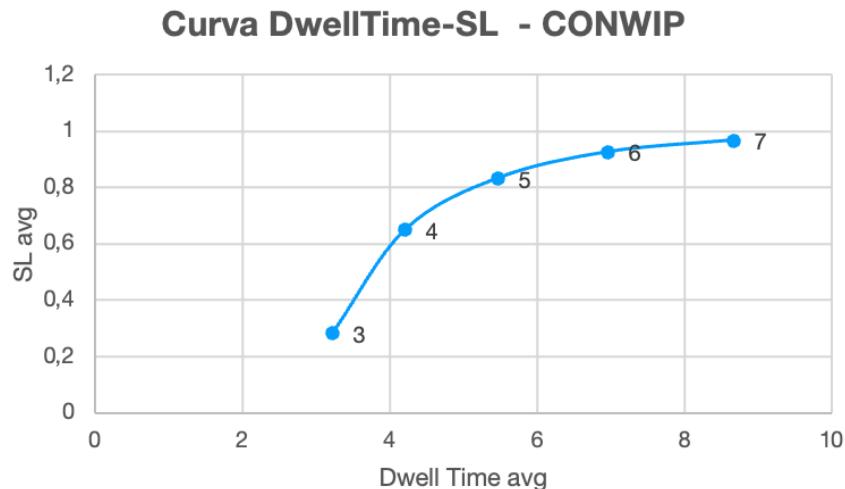


Figura 9 – Conwip: Curva SL-Dwell al variare di C scenario base

C	Dwell (min)	SL	ΔSL	$\Delta Dwell (min)$
3	3,22	0,28	-	-
4	4,2	0,65	+0,37	+0,95
5	5,46	0,83	+0,18	+1,25
6	6,96	0,93	+0,1	+1,5
7	8,66	0,97	+0,04	+1,71

Tabella 2 – Conwip: SL e Dwell al variare di C scenario base

La risposta di SL al crescere di C è monotona e con rendimenti decrescenti, all'inizio è più marcata e poi tende a saturare. Il salto principale avviene tra C = 3 e C = 5, andando oltre C = 5 si nota come i miglioramenti si appiattiscono. La curva è coerente con la meccanica del Conwip, agendo sul contenuto complessivo in circolazione, avremo maggiore magazzino prodotti finiti disponibile e quindi maggiore Dwell.

4.1.6.2 Kanban – effetto del numero di cartellini K su SL e Dwell

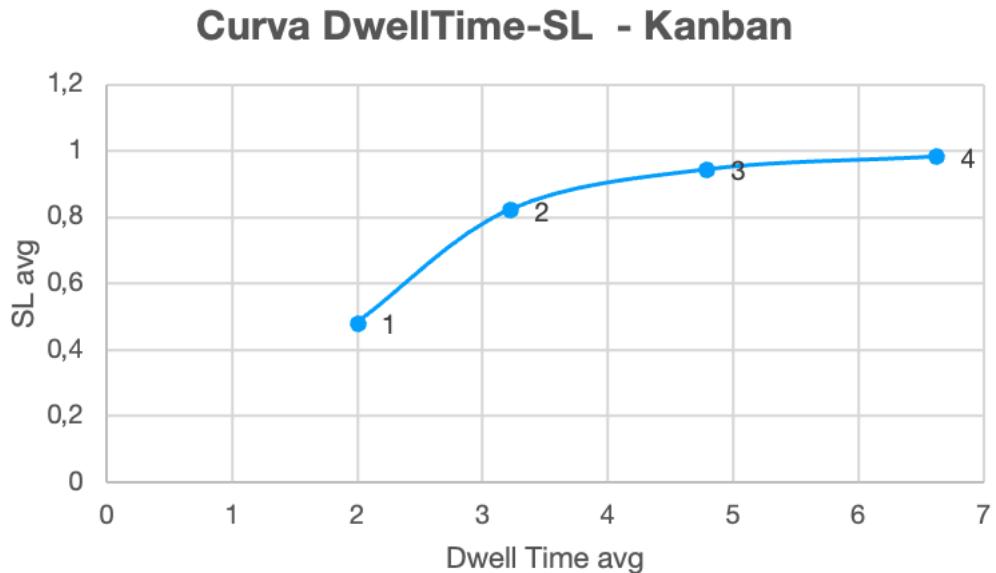


Figura 10 – Kanban: Curva SL-Dwell al variare di K scenario base

K	Dwell (min)	SL	ΔSL	$\Delta Dwell$ (min)
1	2	0,48	-	-
2	3,22	0,82	+0,34	+1,22
3	4,79	0,95	+0,12	+1,57
4	6,62	0,98	+0,04	+1,83

Tabella 3 – Kanban: SL e Dwell al variare di K scenario base

L'aumento di K (uniforme sulle cinque stazioni) comporta la crescita del SL in modo monotono con rendimenti decrescenti, il salto principale avviene da valori bassi a medi; dopo una certa soglia si nota una diminuzione significante della variazione di SL a differenza del Dwell che continua ad aumentare. La curva è coerente con la meccanica del Kanban, aumentando il numero di cartellini K cresce il WIP, si ottiene una maggiore prontezza nel soddisfare la domanda, ma si allunga il tempo medio di permanenza del prodotto nel magazzino.

4.1.6.3 EXCS – effetto del numero di cartellini K e target di stock S su SL e Dwell

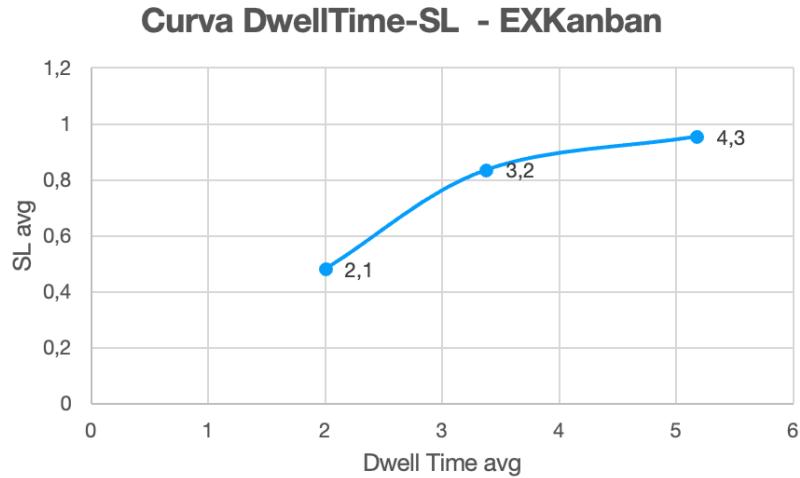


Figura 11 – EXCS: Curva SL-Dwell al variare di K, S scenario base

K	S	Dwell(min)	SL	ΔSL	$\Delta Dwell(min)$
2	1	2	0,48	-	-
3	2	3,38	0,84	+0,35	+1,38
4	3	5,18	0,95	+0,12	+1,8

Tabella 4 – EXCS: SL e Dwell al variare di K, S scenario base

I parametri K, S sono uniformi su tutte le stazioni. Extended Kanban segue una crescita monotona del SL al crescere dei parametri, con rendimenti decrescenti. Il passaggio da K=2 a K=3 e da S=1 a S=2, porta ad avere miglioramenti più marcati in termini di SL maggiore e minore incremento del Dwell. Oltre tale intervallo, la crescita del livello di servizio tende a ridursi, mentre il Dwell continua ad aumentare progressivamente.

4.1.6.4 Base Stock – effetto del target di stock S su SL e $Dwell$

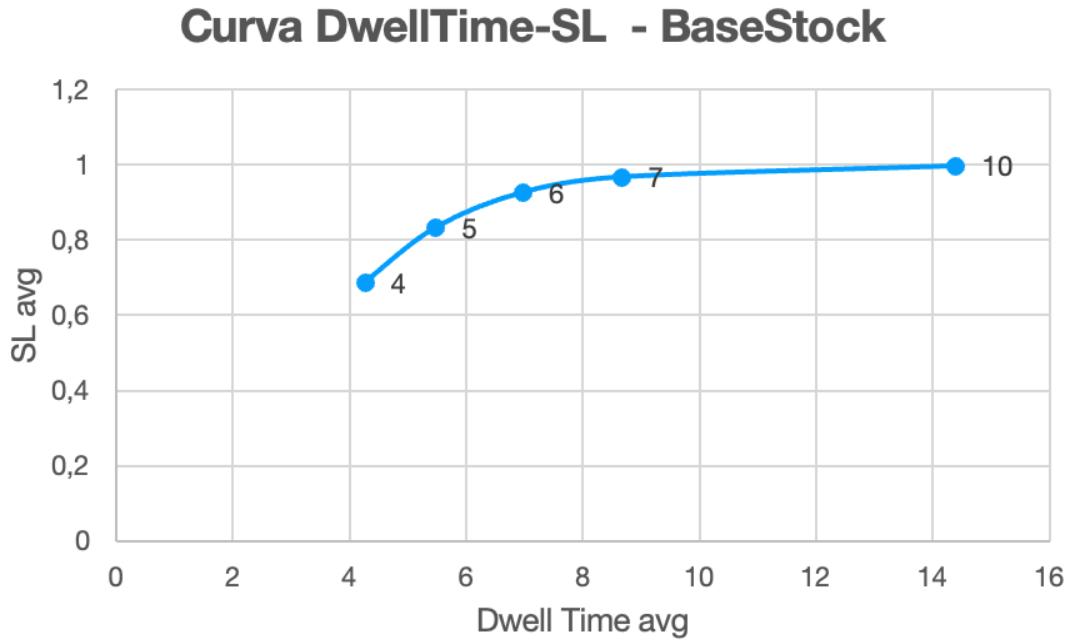


Figura 12 – Base Stock: Curva SL - $Dwell$ al variare di S scenario base

S	Dwell(min)	SL	ΔSL	$\Delta Dwell(min)$
4	4,26	0,69	-	-
5	5,47	0,83	+0,15	+1,22
6	6,97	0,93	+0,09	+1,49
7	8,66	0,97	+0,041	+1,7
10	14,38	0,99	+0,03	+5,72

Tabella 5 – Base Stock: SL e $Dwell$ al variare di S scenario base

La curva del Base Stock correlata al SL e Dwell è monotona crescente con rendimenti decrescenti. Gli aumenti di SL sono più marcati tra $S = 4$ e $S = 6$, poi la curva tende ad appiattirsi. Oltre la soglia $S = 7$ l'incremento di servizio diventa trascurabile, differente è il Dwell che cresce sensibilmente facendo aumentare i costi di giacenza dei prodotti finiti.

4.1.7 Sintesi scenario base

Lo scenario base è caratterizzato da una linea bilanciata, variabilità moderata e prodotto unico, il confronto tra politiche viene effettuato a parità di servizio e con throughput costante con il fine di osservare le differenze dovute esclusivamente alla logica di controllo. In accordo con la legge di Little, si nota che, Conwip e Base Stock operano con contenuto medio più basso e quindi tempi di attraversamento più contenuti, Kanban e EXCS operano con più WIP e di conseguenza presentano valori più elevati di CT. La politica di gestione Kanban ottiene il servizio desiderato con tempi di giacenza nel finito ridotti, EXCS si colloca nel mezzo, Conwip e Base Stock accumulano una quota

maggiori di prodotto finito. Le curve SL-Dwell di ogni politica sono monotone crescenti e concave, nelle prime variazioni si notano netti miglioramenti poi la curva tende ad appiattirsi riducendo il beneficio della variazione del SL a causa della crescita del Dwell. Le stime del CT presentano una semiampiezza dell'intervallo di confidenza molto contenuta, indicando stabilità dei risultati. Di conseguenza, le differenze osservate tra le politiche sono robuste e riconducibili unicamente al diverso ruolo dei parametri di controllo.

4.2 Scenario A

4.2.1 Obiettivi e perimetro

In questo scenario si analizza come variano le prestazioni delle politiche quando la linea opera con un carico più elevato, mantenendo lo stesso livello di servizio. La domanda subisce progressivamente un incremento dell'intensità, passando dall'interarrivo EXPO (2min) del caso base a EXPO (1,6min) e EXPO (1,3min).

La scelta dei parametri per ciascuna politica e configurazione di domanda viene presa in modo tale da avere il livello di servizio SL intorno al 95%. Su queste decisioni ricavo i KPI che verranno mostrati nei successivi paragrafi.

Dal momento che la linea continua ad essere bilanciata, nel Kanban e EXCS i parametri sono uguali per ogni stazione.

Domanda (Interarrivo)	Conwip (C)	Kanban (K)	EXCS (K,S)	Base Stock (S)
EXPO 1,6min	8	4	5, 4	8
EXPO 1,3min	11	6	7, 6	11

Tabella 6 – Scelta parametri per ogni politica scenario A

4.2.2 Throughput TH e Utilizzo

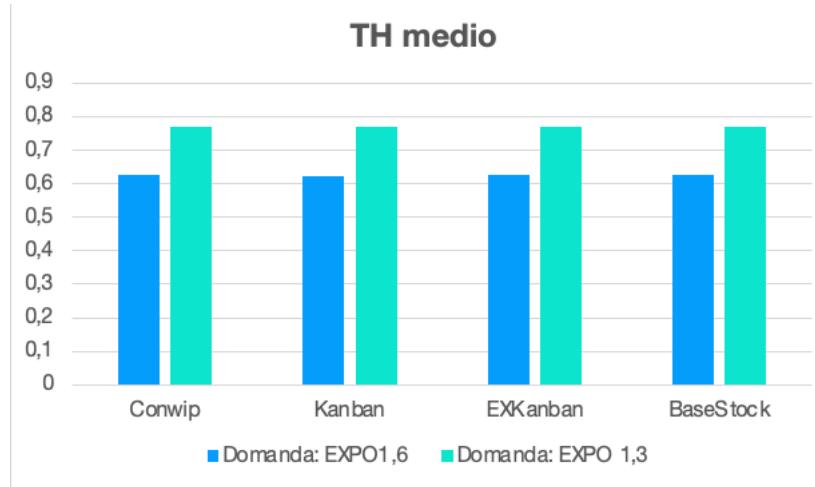


Figura 13 – Throughput medio per politica Scenario A

Al crescere dell'intensità della domanda, il throughput aumenta in modo coerente con l'incremento di carico, rimanendo allineato tra le diverse politiche. L'aumento del throughput si traduce in un maggiore livello di utilizzo della linea. Essendo il sistema bilanciato, l'utilizzo resta uniforme su tutte le stazioni, passando dal 50% nel caso base al 62% quando la domanda è EXPO (1,6min) e al 77% con domanda EXPO (1,3min). In nessuno dei casi si osservano segnali di collo di bottiglia.

L'aumento in modo proporzionale tra politiche indica che anche con carichi più alti, la capacità relativa non cambia, quindi, le variazioni del CT e WIP sono dovute alla modellizzazione delle politiche e non alla differenza di capacità o sbilanciamenti di linea.

4.2.3 Cycle Time CT e Work in Process WIP

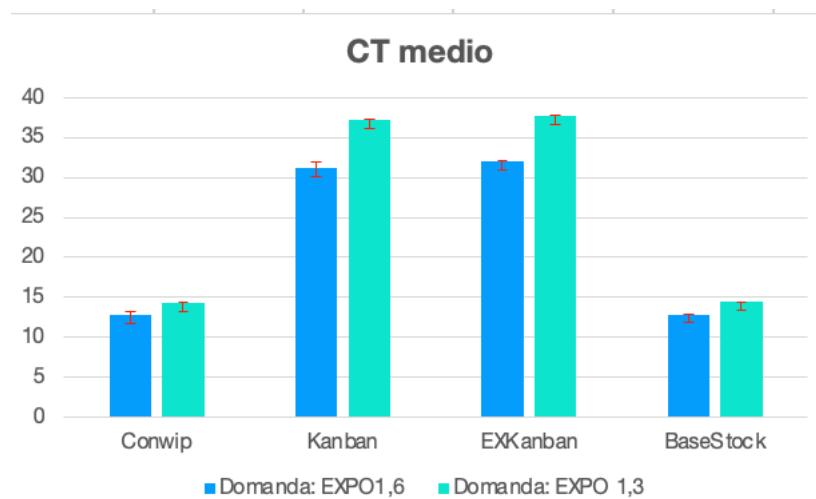


Figura 14 – Cycle Time medio per politica Scenario A

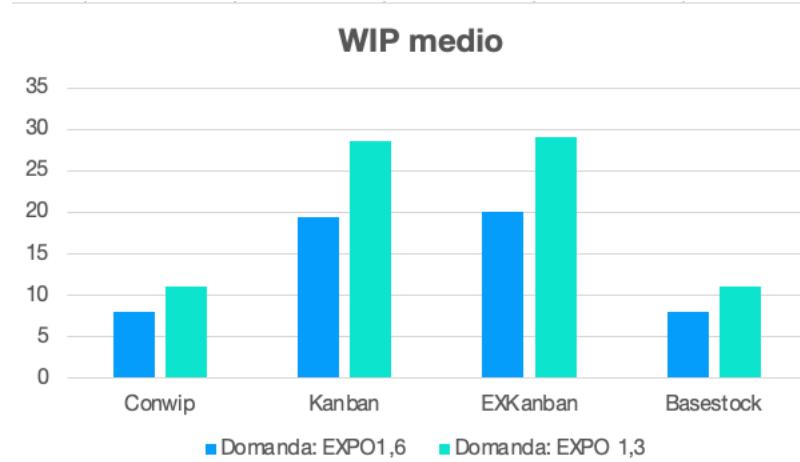


Figura 15 – Work in Process medio per politica Scenario A

La variazione della domanda conferma la relazione tra WIP e CT, quando il TH aumenta, le politiche che mantengono una maggiore scorta in corso di lavorazione tendono ad avere tempi di attraversamento più lunghi. La separazione tra le politiche

rimane evidente, Conwip e Base Stock si collocano nell'area a basso WIP e CT contenuto, mentre Kanban ed EXCS presentano WIP più elevato e CT più lungo.

Nello specifico di ogni politica, Conwip e Base Stock mantengono CT sostanzialmente stabili al variare della domanda, con EXPO (1,6min) vi è una lieve riduzione del CT rispetto al caso base, mentre, con EXPO (1,3min) i valori ritornano pressoché simili al livello iniziale. Il WIP cresce moderatamente con EXPO (1,6min) e più rapidamente con EXPO (1,3min), mantenendo linearità con l'aumento del carico. Per Kanban ed EXCS, l'incremento richiede un aumento sostanziale dei parametri per mantenere il SL, ciò comporta un'alta variazione di WIP e di conseguenza del CT. In generale, le politiche che fanno leva soprattutto sul buffer in corso di processo mostrano tempi medi più elevati quando l'utilizzo delle risorse è elevato. Dal punto di vista statistico, la dispersione delle stime del CT risulta contenuta, indicando stime stabili e affidabili.

4.2.4 Service Level SL e Dwell time

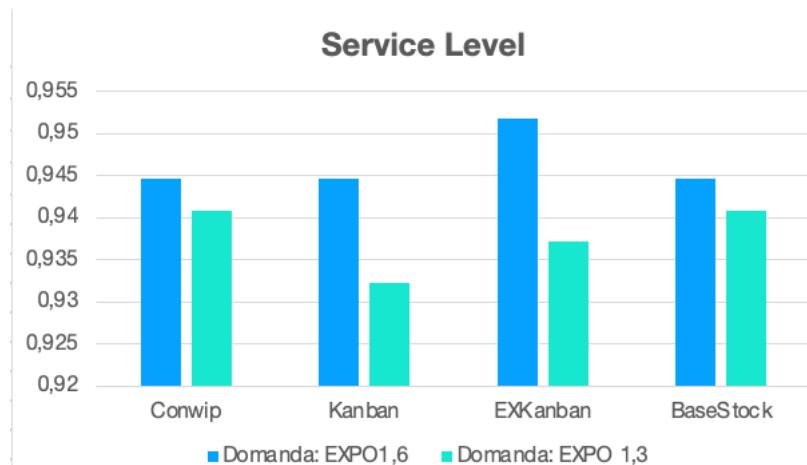


Figura 16 – Service Level per politica Scenario A

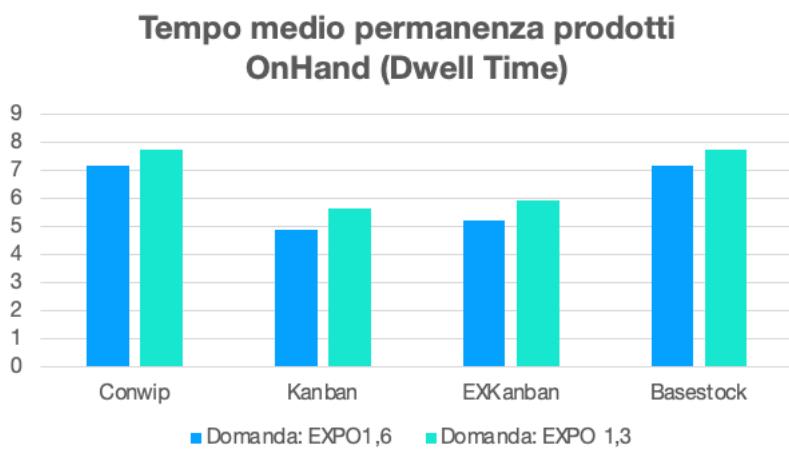


Figura 17 – Dwell per politica Scenario A

Con l'aumentare dell'intensità della domanda diventa più difficile mantenere il livello di servizio anche se i parametri sono scelti per restare il più possibile vicini al 95%. In

questi casi, il livello di servizio tende a ridursi leggermente all'aumentare del carico. Le variazioni restano coerenti con il caso base, Kanban garantisce il servizio con una giacenza sul finito più contenuta, EXCS trova posizione in livelli intermedi, Conwip e Base Stock risultano avere Dwell più elevato. All'aumento della domanda, il tempo medio di permanenza nel finito può diminuire in una prima fase perché la rotazione dei prodotti finiti è più rapida; con carichi più elevati, per mantenere il livello di servizio $\approx 95\%$, serve alzare i parametri per ogni politica aumentando di conseguenza la giacenza.

4.2.5 Trade-off

4.2.5.1 Trade-off WIP vs CT (EXPO 1,3min)

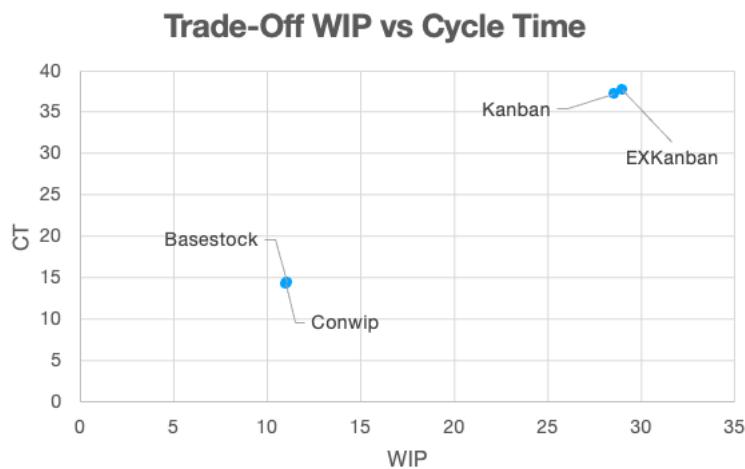


Figura 18 Trade-off CT vs WIP Scenario A

Il trade-off tra CT e WIP conferma che, anche con l'aumento del carico, le politiche si dispongono su due fasce ben distinte. Avviene uno spostamento verso destra rispetto al caso base dovuto all'incremento del WIP. Per mantenere lo stesso livello di servizio occorre accettare un aumento della giacenza dei prodotti finiti.

4.2.5.2 Trade-off SL vs Dwell (EXPO 1,3min)

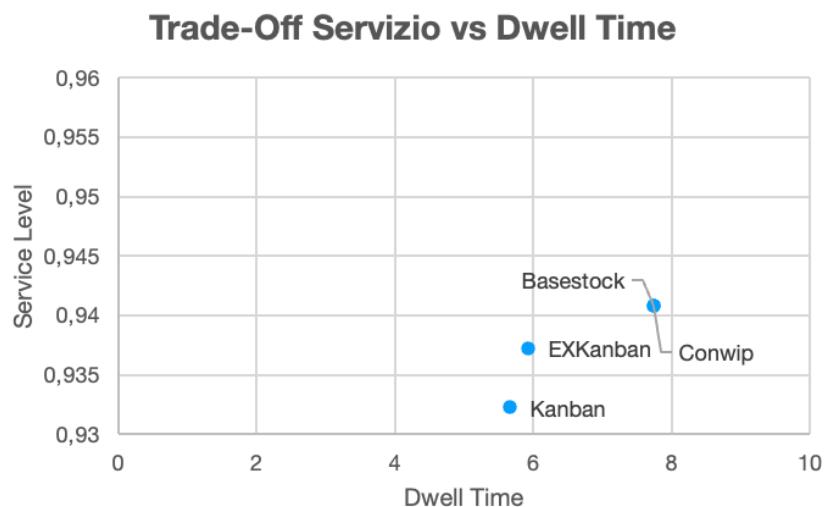


Figura 19 Trade-off SL vs Dwell Scenario A

Il trade-off tra SL e Dwell evidenzia che, in questo scenario, aumentare la giacenza porta solo a incrementi marginali del livello di servizio, oltre una certa soglia, l'investimento in stock sul finito produce benefici sempre più contenuti. Tra le politiche considerate, EXCS è il miglior compromesso perché riesce a contenere il Dwell senza perdere troppo SL; se invece si volesse privilegiare esclusivamente il livello di servizio, Base Stock e Conwip a discapito del Dwell riuscirebbero a soddisfare un maggiore SL.

4.2.6 Confronto con il caso base

La variazione della domanda rispetto al caso base comporta la crescita del WIP. Con un interarrivo di domanda EXPO (1,6min) l'effetto sul CT rimane contenuto per le politiche Conwip e Base Stock mostrando valori leggermente inferiori rispetto al caso base. Quando la domanda è EXPO (1,3min), per ottenere lo stesso target di servizio, è necessario incrementare i buffer. In questo caso le politiche Kanban ed EXCS richiedono un aumento più marcato di WIP e CT, mentre Conwip e Base Stock necessitano incrementi di WIP più moderati. L'effetto rotazione prevale quando si ha un carico moderato, Conwip e Base Stock che riescono a mantenere un Dwell minore perché lo stock sul finito viene prelevato più rapidamente. In sintesi, all'aumentare del carico di domanda cresce di conseguenza il WIP per poter soddisfare il livello di servizio richiesto, l'aumento porta il Conwip e Base Stock ad essere più robusti sul CT; Kanban e EXCS sul Dwell.

La tabella 7 mostra le variazioni rispetto al caso base tenendo in considerazione la modifica dei parametri per raggiungere il SL.

Politica	$\Delta CT\%$ (EXPO 1,6)	$\Delta CT\%$ (EXPO 1,3)	$\Delta WIP\%$ (EXPO 1,6)	$\Delta WIP\%$ (EXPO 1,3)	$\Delta Dwell\%$ (EXPO 1,6)	$\Delta Dwell\%$ (EXPO 1,3)
CONWIP	-8,7	+2,0	+14,3	+57,1	-17,1	-10,7
Kanban	+5,9	+26,4	+31,9	+94,0	+2,5	+18,2
EXKanban	+3,7	+22,3	+29,7	+87,8	+0,5	+14,5
Base Stock	-8,4	+2,7	+14,6	+58,1	-17,1	-10,7

Tabella 7 Variazione KPI scenario A con scenario base

4.2.7 Sintesi scenario A

L'incremento della domanda porta la linea a lavorare con livelli di utilizzo più elevati ma le differenze strutturali tra le politiche rimangono evidenti. La variazione moderata della domanda non comporta un peggioramento dei tempi per Conwip e Base Stock, quando invece l'interarrivo di domanda si riduce in modo marcato, per mantenere lo stesso livello di servizio è necessario aumentare il WIP in tutte le politiche. L'incremento dei parametri di gestione di politica risulta più contenuto per Conwip e Base Stock, mentre Kanban ed EXCS richiedono aumenti maggiori. La disponibilità di prodotti finiti tende a ridursi soprattutto per Kanban ed EXCS poiché l'aumento dei parametri si traduce in un maggiore accumulo all'interno del processo. Conwip e Base

Stock mostrano una variazione più graduale grazie alla diversa logica di gestione dello stock.

L'effetto complessivo si traduce in un aumento simultaneo di WIP e CT. Il guadagno marginale ottenibile da SL per minuto di Dwell si riduce.

4.3 Scenario B

4.3.1 Obiettivi e perimetro

In questo scenario si introduce uno sbilanciamento all'interno del processo rendendo la M3 più lenta rispetto a tutte le altre stazioni. M1, M2, M4, M5 mantengono gli stessi tempi di processo del caso base, M3 utilizza TRIANG (1.2, 1.4, 1.6)min in modo tale da creare un collo di bottiglia. L'interarrivo di domanda rimane EXPO (2min), la struttura del sistema non viene modificata, la procedura di raccolta dati utilizzata è la stessa dello scenario base.

L'obiettivo è valutare i cambiamenti dei KPI a parità di capacità quando il collo di bottiglia si trova in una stazione specifica, capire come ogni politica gestisce l'accumulo di prodotto attorno a M3 e i parametri che servono per rimanere vicini al target di livello di servizio del 95%. Per le politiche Kanban ed EXCS viene inoltre considerata sia la scelta di valori uniformi dei cartellini sulle stazioni, sia la possibilità di assegnare un numero diverso di cartellini in prossimità del collo di bottiglia per verificarne l'effetto.

Parametri	Conwip (C)	Kanban (K)	EXCS (K; S)	Base Stock (S)
Uniformi	8	3	4; 3	8
Locali	-	3,3,2,3,3	4,4,3,4,4; 3,3,2,3,3	-

Tabella 8 Scelta parametri per politica scenario B

4.3.2 Throughput TH e Utilizzo

La presenza del collo di bottiglia non modifica l'output complessivo della linea, il throughput rimane pari a quello del caso base (circa 0,5 pezzi/min) perché è il ritmo di arrivo della domanda a determinare la capacità effettivamente erogata. La differenza si nota negli utilizzi, M3 avendo un tempo di lavorazione più lungo avrà anche un utilizzo maggiore: 0,7 in confronto alle altre stazioni che restano attorno a 0,5, questa maggiore saturazione può generare accumulo a monte della stazione e periodi di inattività a valle. Le variazioni su CT, WIP, Dwell non dipendono da capacità diverse, ma dalle differenze strutturali di ogni politica ovvero come si colloca il buffer attorno al collo di bottiglia. Avere maggiore buffer a monte per alimentare maggiormente M3 riduce la possibilità che la stazione critica resti senza materiale da lavorare facendo crescere WIP e CT, spostare il buffer sul finito riesce a garantire maggiore SL a discapito di Dwell più alto.

4.3.3 Cycle Time CT e Work in Process WIP

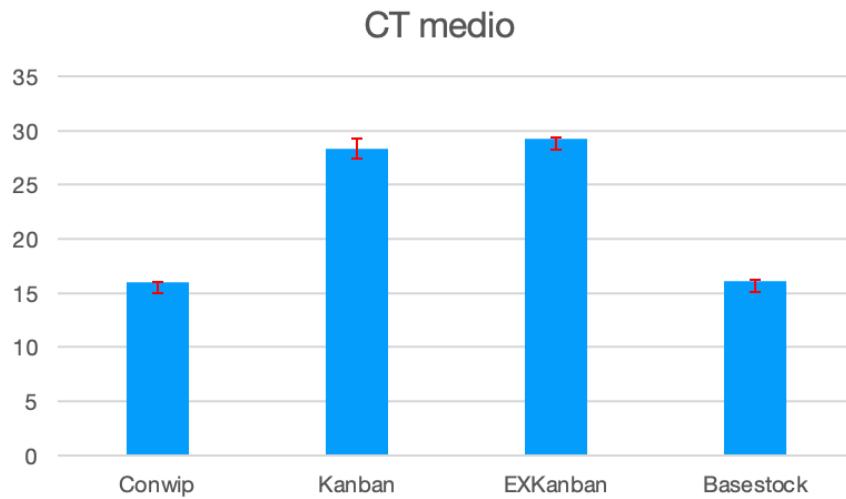


Figura 20 – Cycle Time medio per politica scenario B

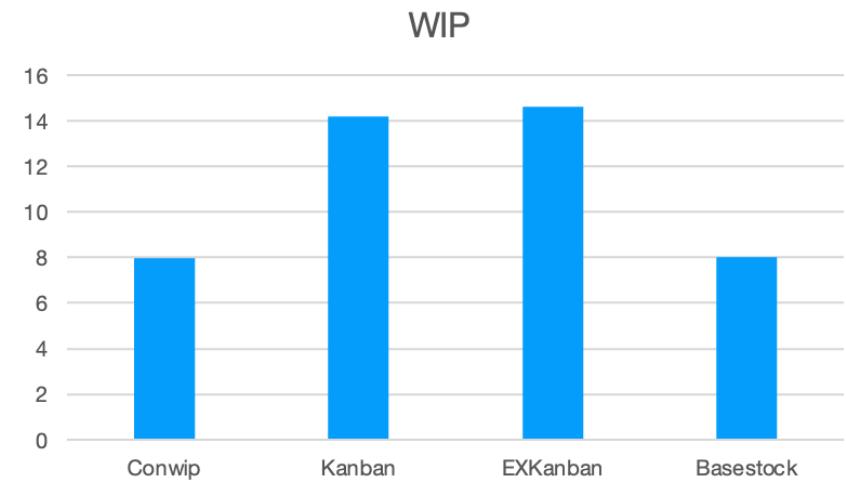


Figura 21 – Work In Process medio per politica scenario B

Con il TH che non varia dopo lo sbilanciamento della linea, l'attenzione si sposta su dove e quanto si aspetta nella linea.

Nel Conwip e Base Stock è stato necessario decidere nuovamente i parametri per raggiungere il livello di servizio target, l'aumento di C e di S portano necessariamente una crescita nel contenuto medio e di conseguenza anche nel CT. L'aumento del buffer complessivo è l'unico metodo per raggiungere il SL portando tempi di Dwell maggiori perché una parte dei prodotti viene spostata sul finito.

Nel Kanban e EXCS i parametri rimangono invariati rispetto al caso base. Tra i fenomeni che si possono verificare vi è lo starving a valle dovuto dalle stazioni dopo M3 che restano in attesa perché il collo di bottiglia rilascia pezzi con ritmo più basso. Il WIP totale si mantiene leggermente più basso e di conseguenza anche il CT diminuisce di poco. Nel Kanban il livello di servizio è più basso portando ad avere CT

e Dwell leggermente inferiori rispetto all'EXCS che grazie allo stock level locale mantiene un SL maggiore.

La semiampiezza dell'intervallo di confidenza del CT è ridotta in tutti i casi, a indicazione che le differenze osservate tra le politiche sono robuste e statisticamente affidabili.

4.3.4 Service Level SL e Dwell time

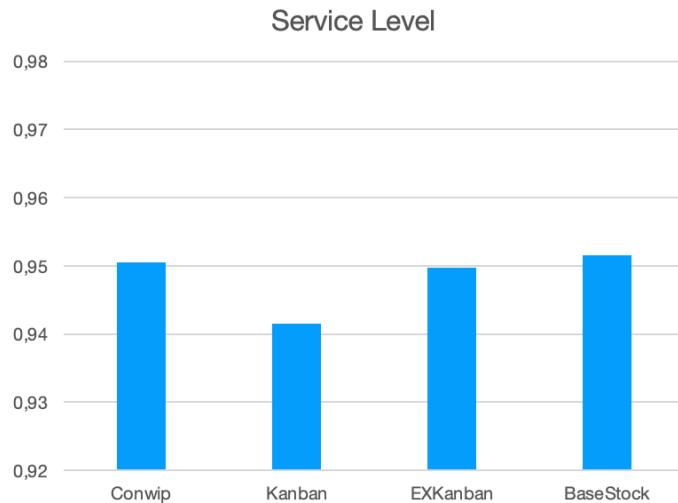


Figura 22 – Service Level per politica scenario B

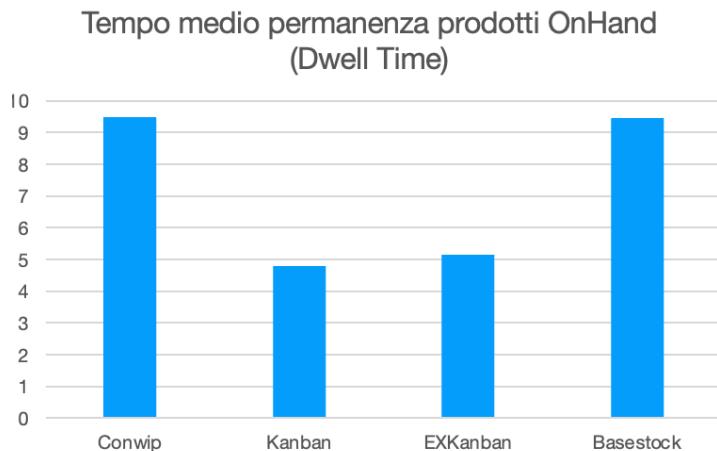


Figura 23 – Dwell per politica scenario B

Le differenze sul SL e Dwell che si osservano dopo lo sbilanciamento della linea raffigurano come le politiche riescano a gestire il buffer in presenza del collo di bottiglia su M3. I parametri delle politiche Conwip e Base Stock sono stati modificati per poter raggiungere nuovamente il target di SL, portando ad avere un aumento del contenuto, nel Conwip attraverso C (buffer nel complesso), in Base Stock attraverso S

(scorta nel finito). Tramite la formula $\text{on hand} \approx \text{TH} \times \text{Dwell}$, considerando che il TH è costante, una maggiore scorta porta ad un aumento del Dwell.

Lo sbilanciamento della linea non richiede una modifica dei parametri nelle politiche Kanban ed EXCS, tramite gli stessi parametri del caso base si riesce a raggiungere il livello di servizio target, il Dwell resta contenuto ma il livello di servizio scende leggermente. Il numero di cartellini K rimanendo invariato porta il Kanban ad una leggera diminuzione del SL dovuta dall'irregolarità del ritmo di uscita introdotta dalla stazione più lenta; EXCS grazie alla presenza di un livello di scorta di riferimento su ciascuna stazione, conserva invece una regolazione più stabile del flusso e riesce a mantenere il 95% del livello di servizio.

4.3.5 Trade-off

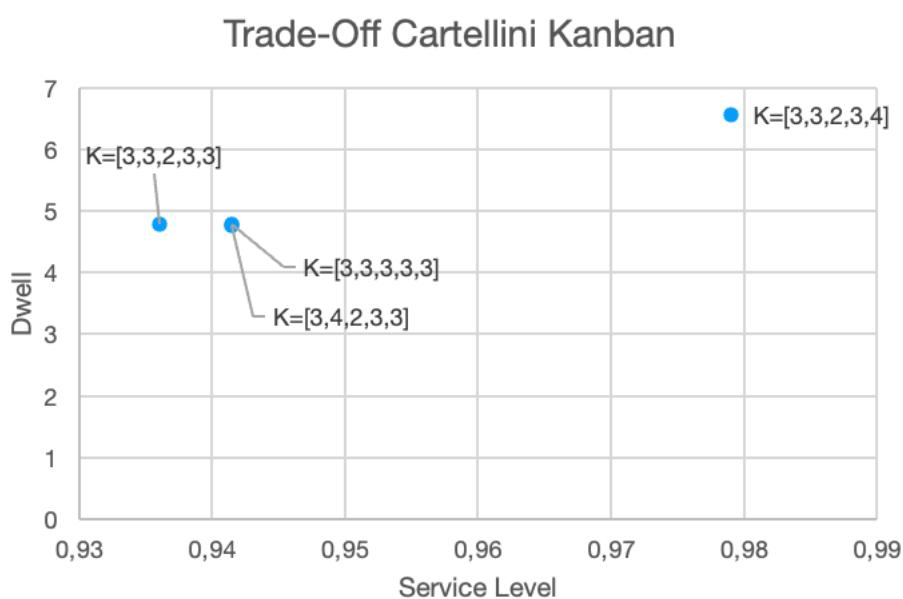


Figura 23 – Trade-off variabili Kanban scenario B

La scelta dei parametri K specifici per stazione può portare migliorie in termini di KPI quando vi è uno scenario di sbilanciamento della linea. La somma totale dei cartellini resta invariata tranne che per la combinazione [3,3,2,3,3] che ha un WIP leggermente inferiore rispetto alle altre. Rimuovere un cartellino nella stazione collo di bottiglia, senza compensare a monte, è segnale di starving della stazione M3 e fa scendere il SL senza far variare il Dwell. Spostare invece il cartellino nella stazione precedente al collo di bottiglia non produce cambiamenti rilevanti rispetto a una configurazione dei cartellini uniforme su ogni stazione. La variante con un cartellino in più nell'ultima stazione fa salire il SL significativamente ma a costo di un incremento del Dwell. Questo accade perché si facilità l'avanzamento verso il prodotto finito, riducendo le attese a valle, ma aumentando la permanenza media complessiva dei pezzi nel sistema. In sintesi, se l'obiettivo è di avere maggior SL conviene evitare riduzioni di cartellini nelle stazioni a valle del collo di bottiglia.

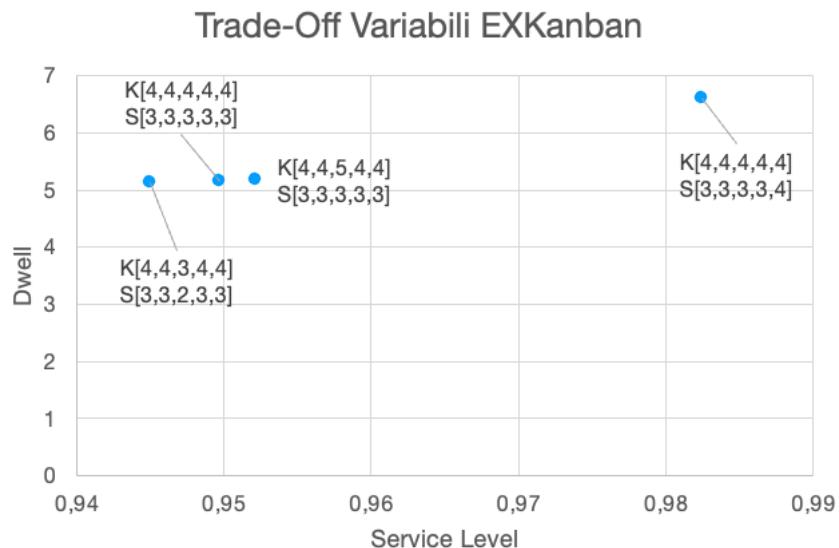


Figura 24 – Trade-off variabili EXCS scenario B

La politica Extended Kanban dispone di due parametri, K e S, che in presenza di un collo di bottiglia sulla stazione M3 operano in modo complementare.

Aumentare il numero dei cartellini nelle stazioni che precedono il collo di bottiglia, mantenendo S invariato, crea una maggiore protezione riducendo la probabilità che la stazione critica rimanga senza pezzi e ne regolarizza il flusso in uscita, ciò si traduce in SL in rialzo e Dwell che resta invariato perché si riesce a incrementare leggermente il contenuto medio della linea senza trasferire eccessiva scorta sul finito. In modo contrario, ridurre K su attorno al collo di bottiglia rimuove questa forma di protezione, producendo un’uscita più irregolare e un calo del livello di servizio, senza vantaggi sul Dwell.

L’aumento di S a valle mantenendo K invariato favorisce invece l’accumulo sul finito, e rende più immediata la risposta alla domanda, il livello di servizio subisce un miglioramento ma il Dwell aumenta in modo più marcato. Ridurre S in prossimità del collo di bottiglia produce l’effetto opposto, accentuando il disaccoppiamento tra M3 e le stazioni successive e facendo arrivare flussi irregolari nelle stazioni seguenti, il Dwell cambia lievemente.

In sintesi, con una linea sbilanciata conviene costruire protezione con K attorno al collo di bottiglia, se si vuole ottenere livelli di servizio più alti bisogna fare leva sullo stock level a valle, accettando però un aumento della permanenza media dei pezzi nel finito.

4.3.6 Confronto con il caso base

Rispetto al caso base, lo sbilanciamento della linea non modifica l’output, il throughput rimane 0,50 pz/min per tutte le politiche perché il sistema è limitato dalla domanda e quindi la capacità relativa non varia. La differenza si nota sugli utilizzi delle singole stazioni, la stazione collo di bottiglia lavora di più mantenendo un tasso $\approx 0,7$

a differenza delle altre stazioni che restano attorno a 0,5; ciò segnala l'effetto di accumulo a monte e un flusso irregolare a valle. Il confronto con il caso base, a parità di livello di servizio target, si basa su come ogni politica posizioni diversamente la protezione attorno al collo di bottiglia e conseguentemente gli effetti che ne derivano sui KPI. Nelle politiche Conwip e Base Stock è stato necessario incrementare i parametri per riavvicinarsi al livello di servizio desiderato, l'aumento di C e di S comporta valori di WIP più alti e CT più lungo, con un aumento del Dwell dovuto allo spostamento di parte della protezione sul finito. Kanban ed EXCS riescono a mantenere il livello di servizio obiettivo senza variare i parametri di base, il sistema opera con una protezione più concentrata in prossimità del collo di bottiglia, il che consente di contenere la crescita del WIP complessivo e quindi del CT, pur mostrando una dinamica di flusso leggermente più sensibile alle variazioni locali.

La tabella 9 mostra le variazioni rispetto al caso base tenendo in considerazione la modifica dei parametri per raggiungere il livello di servizio prefissato.

Politica	$\Delta CT \%$	$\Delta WIP \%$	$\Delta Dwell \%$
Conwip	+14,0%	+14,1%	+9,4%
Kanban	-3,5%	-3,6%	-0,2%
Extended Kanban	-5,2%	-5,3%	-0,5%
Base Stock	+14,5%	+14,5%	+9,3%

Tabella 9 - Variazione KPI rispetto al caso base scenario b

4.3.7 Sintesi scenario B

Lo scenario con un collo di bottiglia definito nella terza stazione permette di evidenziare che la prestazione non dipende soltanto dalla politica scelta ma da come e dove viene allocato il buffer in relazione al collo di bottiglia. Variando C in Conwip o aumentando i K localmente nel Kanban si riesce ad alimentare maggiormente la stazione critica, mantenendo un flusso più regolare; CT e WIP crescono in proporzione al contenuto medio di linea. Nel Base Stock ed EXCS, con la presenza del parametro S, si ha maggiore scorta sul finito, che consente di avere un livello di servizio più elevato a TH costante, il Dwell subisce un aumento per definizione: on hand \approx TH x Dwell. Lasciando invariati i parametri del Kanban ed EXCS rispetto al caso base, il sistema riesce comunque a mantenere WIP e CT su valori contenuti. L'irregolarità in uscita dal collo di bottiglia tende a comprimere leggermente il livello di servizio. L'assegnazione mirata dei cartellini K e dello stock S per stazione consente alle politiche di adattarsi meglio allo sbilanciamento della linea. Le politiche che controllano il WIP localmente contengono meglio il CT, l'uso dello stock level sul finito consente di recuperare livello di servizio a scapito del Dwell. Poiché il TH rimane invariato rispetto al caso base, le differenze osservate sono dovute alla struttura delle politiche; le semiampiezze dell'intervallo di confidenza del CT sono contenute confermando la robustezza statistica.

4.4 Scenario C

4.4.1 Obiettivi e perimetro

Questo scenario ha l'obiettivo di valutare l'effetto della variabilità dei tempi di processo sulle prestazioni delle quattro politiche di controllo. A differenza degli scenari precedenti, non vengono modificati né i valori medi né i parametri di controllo. La linea di riferimento è la stessa dello Scenario B, quindi, sbilanciata con la presenza di un collo di bottiglia su M3, la domanda resta invariata con interarrivo EXPO (2min). La scelta di non far variare i parametri di controllo permette di osservare come ciascuna politica sia in grado di assorbire l'aumento dell'irregolarità del flusso.

La variabilità dei tempi di processo di ogni stazione viene incrementata su tre livelli mantenendo invariate le capacità e l'architettura della linea. L'aumento della variabilità viene effettuato aumentando l'ampiezza della distribuzione triangolare dei tempi di processo, ciò può generare irregolarità più marcate nel rilascio dal collo di bottiglia.

La tabella 10 mostra i diversi livelli di variabilità presi in considerazione per analizzare lo scenario.

Macchine	Bassa variabilità	Media variabilità	Alta variabilità
M1,M2,M4,M5	TRIANG (0,8; 1; 1,2)min	TRIANG (0,6; 1; 1,4)min	TRIANG (0,2; 1; 1,8)min
M3	TRIANG (1,2; 1,4; 1,6)min	TRIANG (0,6; 1,4; 2,2)min	TRIANG (0,4; 1,4; 2,4)min

Tabella 10 - Decisione delle variabilità scenario C

Poiché il throughput non varia rispetto al caso precedente e la capacità produttiva resta invariata, l'attenzione si concentra sugli indicatori di prestazioni maggiormente sensibili alle differenze tra politiche, in particolare, SL e Dwell risultano essere le misure più significative.

Non vengono riportati altri indicatori come TH, CT o WIP perché, a parità di parametri, le differenze riscontrate risultano trascurabili e non danno informazioni aggiuntive utili all'interpretazione.

4.4.2 Service Level SL e Dwell time

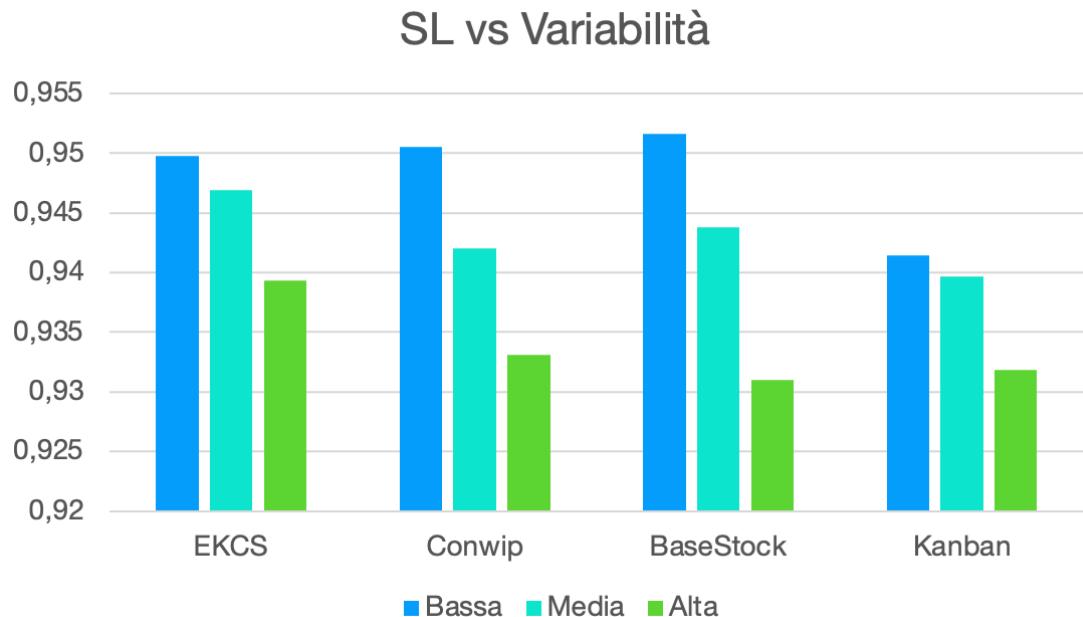


Figura 25 – Service Level per politica con aggiunta di variabilità scenario C

La figura 25 consente di valutare come le politiche reagiscono all'aumento della variabilità dei tempi di lavorazione, il livello di servizio tende a ridursi per tutte le politiche ma con intensità diverse.

Nel Kanban la perdita di SL è più contenuta, rispetto al caso base vi è una perdita del -0,19% in condizione di variabilità media passando a -1,03% quando la variabilità è alta; ciò indica che fino a quando la variabilità non diventa estrema, il WIP locale che riesce ad alimentare M3 limita episodi di mancanza di scorte nel finito.

Nell' Extended Kanban vi è un comportamento simile al Kanban, in situazioni di variabilità media la perdita è di -0,30% e -1,10% in alta. La combinazione dei parametri K e S riesce a distribuire il buffer tra linea ed uscita smorzando gli effetti dei picchi senza eliminarli.

Il Conwip diminuisce di -0,90% in condizioni di media variabilità e -1,84% in condizioni di alta. Dal momento che il WIP totale è fissato dal numero dei cartellini, la capacità di alimentare la stazione M3 si riduce perché i tempi delle stazioni variano maggiormente, ciò comporta maggiore frequenza di periodi in cui non è disponibile materiale da lavorare con conseguente effetto negativo sul servizio.

Il Base Stock subisce un decremento nel SL del -0,82% con media variabilità e del -2,16% con alta variabilità. La politica prevede una scorta nel finito fissata che, con l'aumento della variabilità, si azzera più spesso. In assenza di buffer locali che forniscano protezione alla stazione vincolante, la linea non riesce a compensare le irregolarità e il livello di servizio si riduce maggiormente.

In base ai risultati ottenuti si nota che, con l'aumentare della variabilità, le politiche mantengono in modo differente la regolarità nel flusso: Kanban ed EXCS mostrano una migliore tenuta del livello di servizio, seguiti da Conwip e infine Base Stock. Il risultato delle analisi è in linea con le caratteristiche di ogni politica. Quando è presente un collo di bottiglia, trattenere parte del buffer a monte tramite i cartellini K consente di alimentare la stazione anche in presenza di arrivi irregolari; se invece la protezione è solo nel finito (come nel Base Stock) o solo nel globale (come nel Conwip), aumentano le possibilità che la stazione critica rimanga senza pezzi da lavorare, con conseguente riduzione del livello di servizio. Questi risultati dimostrano come l'emergere di differenze tra politiche non dipenda solo da TH, CT e WIP che rimangono quasi invariati, ma dalla continuità con cui la produzione riesce a fornire pezzi alla fase finale del processo.

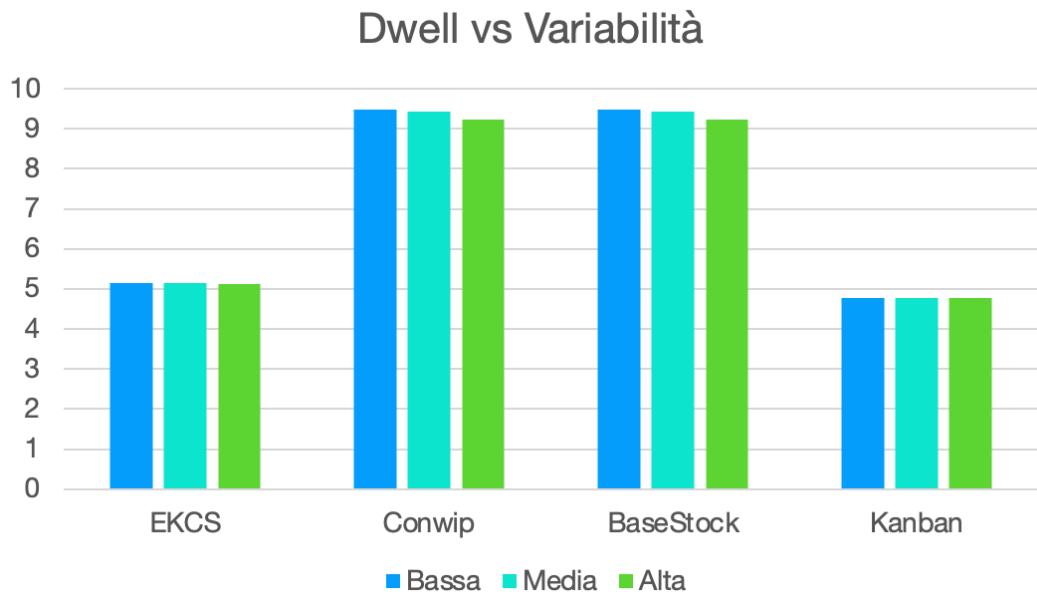


Figura 26 – Dwell per politica con aggiunta di variabilità scenario C

Il Dwell rimane sostanzialmente invariato passando da variabilità bassa a media e alta. Si nota una leggera riduzione per Conwip e Base Stock, differenti sono EXCS e Kanban che mantengono valori costanti. Il risultato di questa analisi è ciò che ci si aspetta mantenendo i parametri di ogni politica invariati e la media dei tempi costante, la relazione on hand \approx TH x Dwell vincola il Dwell a restare stabile con il TH che non varia. In condizioni di alta variabilità aumentano invece gli episodi in cui la scorta sul finito si azzera, cioè vengono spediti i pezzi non appena disponibili, riducendo leggermente il Dwell in Conwip e Base Stock. Un eventuale aumento del Dwell potrebbe verificarsi solo se si attribuisse una priorità quasi assoluta al livello di servizio, incrementando la scorta a valle tramite parametri più alti; in questo caso la permanenza nel finito aumenterebbe coerentemente.

5. Sintesi dei risultati

Questo capitolo ha l'obiettivo di proporre una lettura trasversale dei risultati sperimentali, trasformando le evidenze numeriche in considerazioni operative.

5.1 Riepilogo comparato per politica

La politica Kanban risulta efficace quando la linea è bilanciata con una variabilità dei tempi contenuta, la limitazione del WIP locale permette un buon controllo dei tempi di attraversamento. L'aumento del numero di cartellini porta benefici al SL, ma oltre una certa soglia l'effetto marginale si riduce e cresce invece la giacenza dei prodotti sul finito.

La politica EXCS mantiene la logica dei cartellini del Kanban ma il livello di stock target in ogni risorsa permette di avere una maggiore elasticità nella gestione del buffer. Ciò consente di non subire variazioni sul livello di servizio nelle fasi di assestamento a seguito di variazioni di domanda o capacità. I livelli di Dwell sono superiori al Kanban ma più contenuti rispetto a Base Stock.

La politica Conwip controlla il WIP a livello globale, questo permette una riduzione del rischio di congestione in presenza di un collo di bottiglia. Il CT rimane regolare e il WIP complessivo cresce in funzione al numero totale dei cartellini. Tuttavia, l'assenza di protezione locale rende il sistema più sensibile agli accumuli che si possono verificare con la presenza di una stazione critica con tempi di lavorazione elevati. L'incremento del parametro C migliora il livello di servizio ma comporta un aumento progressivo del Dwell.

La politica Base Stock concentra la protezione nella scorta sul finito. La disponibilità immediata dei prodotti finiti consente di raggiungere alti livelli di SL anche in condizioni di instabilità della linea. Tale risultato comporta alti livelli di Dwell e quindi con un costo di giacenza dei prodotti finiti più elevato. Questa politica è vantaggiosa quando il costo di stock out è maggiore rispetto al costo di mantenimento delle scorte o quando la domanda è poco prevedibile.

5.2 Relazioni di compromesso tra le prestazioni

Dall'analisi dei risultati emergono due trade-off ricorrenti che guidano il comportamento delle politiche. Il primo riguarda il rapporto tra SL e Dwell, a parità di livello di servizio, le politiche si distinguono principalmente per la diversa quantità di scorta che mantengono nel finito. Le politiche con WIP vincolato e parametri contenuti (Kanban e Conwip con K e C bassi) riescono a raggiungere lo stesso SL di Base Stock, ma richiedono incrementi graduali dei parametri per evitare che il Dwell cresca eccessivamente. Il secondo, CT/TH vs WIP, se riduciamo stabilmente il CT mantenendo il TH invariato, avremo una riduzione proporzionale del WIP. Poiché ci troviamo in un sistema limitato dalla domanda, il throughput è fissato; per mantenerlo stabile, è necessario alimentare adeguatamente la stazione più lenta, evitando che

rimanga senza pezzi e senza saturare eccessivamente le stazioni a valle, dove l'accumulo potrebbe causare blocchi.

5.3 Effetti e lettura della variabilità e sbilanciamento

Le politiche che regolano il WIP in modo locale mostrano maggiori difficoltà quando cresce la variabilità nei tempi di processo. Se il numero di cartellini nel Kanban non viene adattato, un aumento della variabilità porta a oscillazioni più marcate nel livello di servizio. La politica EXCS, a differenza del Kanban, introduce un livello di controllo aggiuntivo, quando il livello di scorte locali scende sotto una soglia definita S, la politica abilita l'ingresso di nuovo materiale, stabilizzando il livello di servizio. Conwip, tramite il vincolo globale sul WIP, riesce a distribuire la variabilità lungo l'intera linea, mantenendo più stabile il tempo di attraversamento; tuttavia, questa caratteristica può portare a fenomeni di accumulo in prossimità della stazione critica. Base Stock riesce ad assorbire una buona parte della variabilità grazie alla presenza di una scorta di finito prestabilita, garantisce alti livelli di servizio ma con Dwell crescenti. Se fosse presente uno sbilanciamento strutturale che porta allo spostamento del collo di bottiglia, le differenze nelle politiche con parametri locali si accentuano portando al rischio di congestione, mentre nel Conwip grazie al vincolo del WIP complessivo diminuisce la possibilità di svuotare completamente tratti della linea. Senza la variazione del parametro S del Base Stock si riesce a mantenere il SL mascherando inefficienze a monte.

5.4 Dinamiche di funzionamento delle politiche

I risultati degli esperimenti si comprendono osservando come ciascuna politica gestisce i fenomeni di accumulo e carenza di materiale lungo la linea. Grazie ai buffer locali delle politiche a cartellino, si riduce la propagazione delle irregolarità tra le stazioni e si attenuano le oscillazioni dovute alla variabilità. Conwip, imponendo un limite massimo alle entità in circolo riduce il rischio che si creino fasi di attesa prolungate lungo la linea, ma tende a far concentrare l'accumulo in prossimità della stazione più lenta. La politica Base Stock, grazie alla disponibilità immediata sul finito, smorza le variazioni del flusso e mantiene una buona continuità di servizio, ma al costo di una maggiore permanenza dei prodotti in magazzino finito.

Nessuna politica risulta ‘migliore’ in modo assoluto, la scelta dipende da vari fattori, tra cui l’ampiezza delle variabilità, la posizione del collo di bottiglia e il rapporto tra il costo della giacenza dei prodotti finiti e il costo dell’ordine non evaso in tempo. Conwip mostra robustezza quando la linea presenta variabilità moderate e il collo di bottiglia può spostarsi; EXCS offre un buon equilibrio, mantenendo il controllo del WIP e consentendo un rilascio più reattivo; Kanban è particolarmente efficace su linee

bilanciate standardizzando il flusso e controllando il WIP; Base Stock consente livelli di servizio elevati a discapito di una maggiore giacenza dei prodotti nel finito.

5.5 Sintesi decisionale in funzione del contesto

La tabella 11 mostra la scelta della politica in funzione della priorità assegnata e della tipologia di linea.

	Linea bilanciata	Linea con risorsa critica	Domanda crescente
Livello di servizio	Base Stock massimizza prontezza; EXCS maggiore flessibilità.	EXCS o Kanban con i parametri mirati.	EXCS combinando assorbimento in-process e prontezza.
CT e WIP contenuti	Conwip con aumenti graduali di C fino ai rendimenti decrescenti	Kanban con K efficienti vicino al collo di bottiglia per evitare code.	Conwip e Kanban con decisione dei parametri per mantenere il WIP controllato
Robustezza e variabilità	Kanban e EXCS con controllo locale	Kanban o EXCS se SL è un vincolo stringente.	Politiche con leve locali K e S.

Tabella 11 - Politiche in funzione di vincoli e contesto

6. Confronto delle politiche

6.1 Confronto a SL target nei quattro scenari

Il caso base è caratterizzato da linea bilanciata e la dispersione dei tempi è contenuta. La politica Kanban fornisce tempi di attraversamento lunghi rispetto alle altre politiche, tramite il controllo locale del WIP, si raggiunge il livello di servizio richiesto senza incrementare eccessivamente la scorta dei prodotti finiti in magazzino. Conwip presenta un vincolo del WIP complessivo che tende a distribuire in modo ordinato le code lungo la linea; rispetto a Kanban, a parità di SL, vi sono delle differenze che si colgono nella regolarità del CT, il Conwip riduce la frequenza dei vuoti a monte della stazione critica, mentre il Kanban può mostrare code a valle quando la domanda presenta irregolarità. La politica EXCS tramite la soglia S definita mantiene il modello del cartellino ma consente un rilascio più reattivo con effetti positivi sul SL. Base Stock, infine, garantisce alto livello di servizio a discapito della giacenza media, nel caso baso risulta essere la soluzione più costosa in termini di giacenza.

Al crescere del livello di domanda, finché rimane al di sotto della capacità della linea, l'uscita resta vincolata dalla domanda e il throughput rimane allineato tra le politiche.

Il confronto quindi si basa sui livelli di SL, CT e Dwell. Conwip mantiene una tenuta regolare del ciclo quando gli interarrivi della domanda diminuiscono, perché la quantità fissa che circola all'interno del sistema previene svuotamenti a monte delle stazioni; EXCS, grazie alla soglia S, riduce il calo di servizio dopo la variazione della domanda; Kanban risulta efficace perché è in grado di mantenere un alto livello di servizio con incrementi inferiori di Dwell rispetto alle altre politiche. Base Stock riesce a preservare il servizio più facilmente, ma l'aumento della domanda comporta una crescita della giacenza finita e quindi del Dwell.

Quando il collo di bottiglia diventa più marcato, emergono con maggiore chiarezza le differenze tra le politiche. Nella linea produttiva, con la presenza di una stazione critica, si possono generare oscillazioni dei buffer, le stazioni a valle possono saturarsi e poi svuotarsi causando una propagazione di questa dinamica lungo la linea; il risultato è che le stazioni a monte tenderanno ad essere senza coda (starving). Nel Conwip, con il controllo del WIP complessivo, si stabilizza la coda a ridosso del collo di bottiglia e a monte si lavora di più. EXCS necessita di una corretta regolazione della soglia S, deve essere calibrata sulla stazione critica riuscendo così ad attenuare la perdita di servizio senza avere alti aumenti del WIP. Il Kanban riesce ad alimentare maggiormente il collo di bottiglia per mantenere un flusso più regolare mediante la regolazione locale dei cartellini. In condizioni di sbilanciamento strutturale più accentuato, Base Stock riesce a raggiungere il livello di servizio target più facilmente, ma la differenza del Dwell con le politiche a controllo locale resta evidente.

Nello scenario con l'aumento della variabilità di processo bisogna spostare l'attenzione sulla robustezza delle politiche. Conwip, beneficiando del vincolo globale, limita gli estremi di fermo a monte e saturazione a valle dovuti dalla variabilità dei tempi. EXCS attenua i cali di SL smorzando gli effetti dei picchi grazie alla soglia locale S. Kanban resta efficiente solo se i cartellini K vengono riconfigurati dopo la variabilità, altrimenti avremo un aumento delle attese a monte del collo di bottiglia e del Dwell a parità di SL. Base Stock prevede uno stock level target che, con l'aumento della variabilità, si azzera più spesso.

6.2 Robustezza e implicazioni di scelta

Nel complesso degli scenari analizzati, Conwip risulta preferibile quando si vuole garantire regolarità del flusso e stabilità del ciclo anche in presenza di bassa variabilità o di lievi sbilanciamenti. EXCS risulta essere efficiente se si vuole mantenere la logica dei cartellini insieme ad un rilascio dei prodotti più reattivo. Kanban è vantaggioso in condizioni di linea bilanciata e stabile, purché la decisione sul numero dei cartellini sia aggiornata se vi sono modifiche nella linea. Base Stock favorisce un maggiore livello di SL accettando Dwell maggiore. Poiché il throughput medio è fissato dalla domanda, la scelta tra le quattro politiche riguarda le diverse combinazioni tra contenuto medio (WIP) e tempo di giacenza di prodotto finito (Dwell) per ottenere lo stesso livello di servizio.

7. Conclusioni

7.1 Scelte efficienti e punto operativo

I risultati sperimentali mostrano che, a seconda del valore dei parametri di controllo, ogni politica genera differenti valori di SL e Dwell. Ponendo in relazione il livello di servizio con il tempo medio di giacenza dei prodotti finiti, si ottiene per ciascuna politica una curva che rappresenta le combinazioni operative possibili.

Non tutte le configurazioni dei parametri sono equivalenti, alcune soluzioni permettono di ottenere lo stesso livello di servizio con un tempo di giacenza dei prodotti finiti inferiore. Tali soluzioni sono efficienti perché non esiste tra le configurazioni osservate un'alternativa che migliori uno dei due indicatori senza peggiorare l'altro. La curva che raccoglie queste combinazioni di parametri rappresenta la frontiera delle scelte efficienti.

Nelle politiche Conwip e Base Stock la decisione viene presa sul singolo parametro (C o S), un aumento di tali parametri porterà valori sicuramente maggiori del SL con un aumento del Dwell rendendo la frontiera superflua.

Nelle politiche Kanban e EXCS, possono esserci molte combinazioni di parametri che portano a raggiungere lo stesso livello di SL ma Dwell maggiori, da qui nasce l'esigenza di costruire la frontiera delle scelte efficienti per escludere a priori i parametri che si trovano al di fuori della curva.

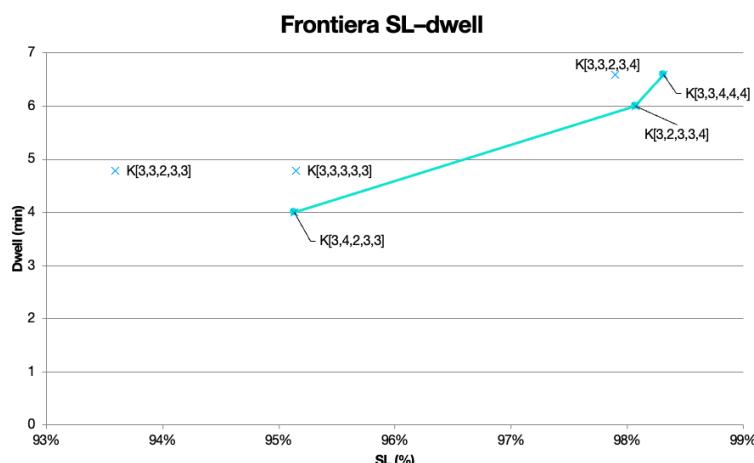


Figura 27 - Frontiera delle scelte efficienti - Kanban

La figura 27 mostra la curva dei cartellini ottimali Kanban nello scenario di linea con collo di bottiglia. Ogni punto corrisponde a una diversa distribuzione dei cartellini nelle stazioni. Configurazioni che producono lo stesso SL ma con Dwell più elevati vengono escluse perché comportano un costo di giacenza maggiore senza benefici aggiuntivi sul servizio.

Lungo la frontiera si osserva che, per ottenere livelli di servizio più elevati, è necessario accettare incrementi crescenti del Dwell.

7.2 Contributi emersi dalle simulazioni comparative

Le simulazioni condotte forniscono chiarimenti su quando ciascuna politica risulta preferibile in base al contesto. Al variare della domanda, della presenza di un collo di bottiglia e della variabilità, i risultati rimangono coerenti nella relazione tra CT, WIP, SL e Dwell. Ciò evidenzia che è la regola di controllo del rilascio e il posizionamento del buffer a determinare la struttura delle prestazioni osservate.

Dai risultati si osserva che, per livelli di servizio non estremi, Conwip e Base Stock controllano la linea con CT e WIP contenuti ma richiedono una maggiore quantità di giacenza dei prodotti finiti, ciò si traduce in livelli di Dwell elevati. Al contrario, Kanban ed EXCS mantengono una quota maggiore di buffer lungo la linea, ottenendo lo stesso livello di servizio ma con valori di Dwell più bassi, a fronte però di tempi di attraversamento più lunghi e WIP più elevato.

In presenza di collo di bottiglia o elevata variabilità emergono differenze più marcate. Le politiche con controllo locale si adattano meglio alla situazione critica, poiché permettono di regolare la quantità di materiale nei punti in cui si generano accumuli e mostrano maggiore elasticità. Incrementi mirati dei parametri sulle sole stazioni critiche sono più efficaci rispetto a incrementi uniformi dei parametri globali come nel Conwip.

Base Stock e Conwip presentano equivalenze di flusso quando il livello di servizio non è spinto verso valori molto elevati, entrambi mantengono CT e WIP simili e si differenziano unicamente per la posizione del buffer (WIP lungo la linea nel Conwip, stock sul prodotto finito nel Base Stock).

7.3 Condizioni di preferibilità delle politiche

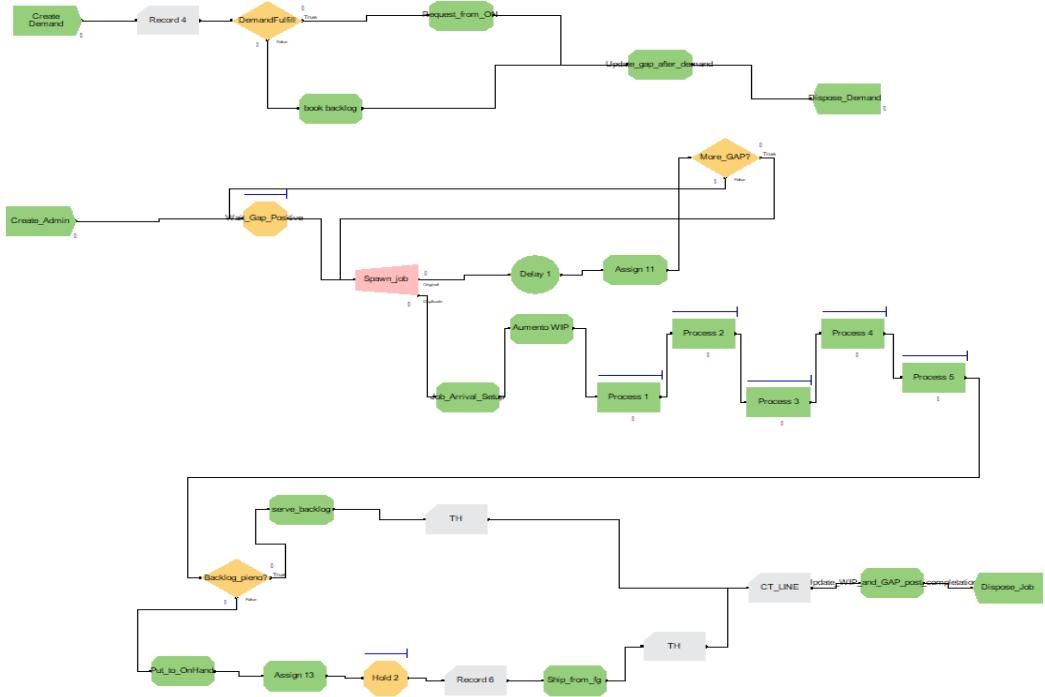
Le differenze tra le politiche prese in esame non derivano soltanto dalla differenza dei KPI o dal valore dei parametri di controllo, ma soprattutto da come e dove viene allocato il buffer. In ciascuna politica la regola di rilascio e la posizione della scorta assumono forme distinte: nel Conwip il limite è globale, nel Kanban è locale per stazione, il Base Stock sposta il buffer sul prodotto finito, mentre l'EXCS combina i due meccanismi.

Queste caratteristiche spiegano perché il comportamento della politica rimane uguale quando la linea produttiva subisce variazioni sulla domanda, sulla presenza del collo di bottiglia e sulla variabilità. Non emerge una politica migliore in senso assoluto, ma configurazioni che risultano più adatte a determinati contesti operativi.

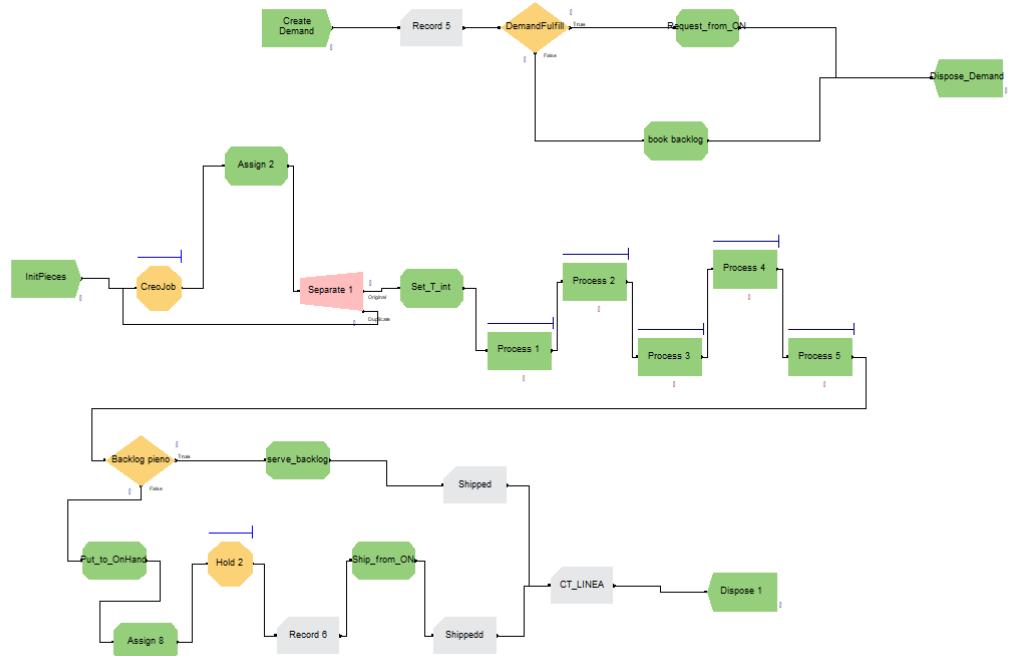
Bibliografia

- Spearman, M.L., Woodruff, D.L., Hopp, W.J. (1990). CONWIP: A pull alternative to kanban. *International Journal of Production Research*.
- Spearman, M.L., Zazanis, M.A. (1992). Push and Pull Production Systems: Issues and Comparisons. *Operations Research*, 40(3), 521–532.
- Little, J.D.C. (1961). A Proof for the Queuing Formula $L = \lambda W$. *Operations Research*, 9(3), 383–387.
- Liberopoulos, G., Dallery, Y. (2000). A unified framework for pull control mechanisms in multi-stage manufacturing systems. *Annals of Operations Research*, 93, 325–355.
- Karaesmen, F., Dallery, Y. (2000). A performance comparison of pull-type control mechanisms for multi-stage manufacturing. *International Journal of Production Economics*.
- Bonvik, A.M., Couch, C.E., Gershwin, S.B. (1997). A comparison of production-line control mechanisms. *International Journal of Production Research*, 35(3), 789–804.
- Xanthopoulos, A.S., et al. (2021). A comparative study of different pull control strategies in multi-product manufacturing systems using discrete event simulation. *APEM*, 16(4), 473–484.
- Onyeocha, C. E., Khader, S. M., & Geraghty, J. (2015). A comparison of HK-CONWIP and BK-CONWIP control strategies. *Operations Research Perspectives*.
- Al-Hawari, T., Khrais, S., & Mumani, A. (2018). Development and evaluation of a Base Stock-CONWIP pull production control strategy. *Computers & Industrial Engineering*.
- Ang, A. (2010). A Performance Comparison between the Extended Kanban Control System (EKCS) and the Traditional Kanban Control System (TKCS). *IEEM* 2010.
- Saidane, S., Babai, M. Z., Aguir, M. S., & Korbaa, O. (2013). On the performance of the base-stock inventory system under a compound Erlang demand distribution. *Computers & Industrial Engineering*.
- Thürer, M., Fernandes, N., Stevenson, M., et al. (2024). Material flow control in make-to-stock production systems: a review. *Review of Managerial Science*.
- Pettersen, J. A. (2009). Restricted work-in-process: A study of differences between Kanban and CONWIP. *Production Economics*.
- Tošanović, N., Tešić, D., & Tričković, G. (2021). Evaluation of Pull Production Control Mechanisms by Simulation. *Processes*.

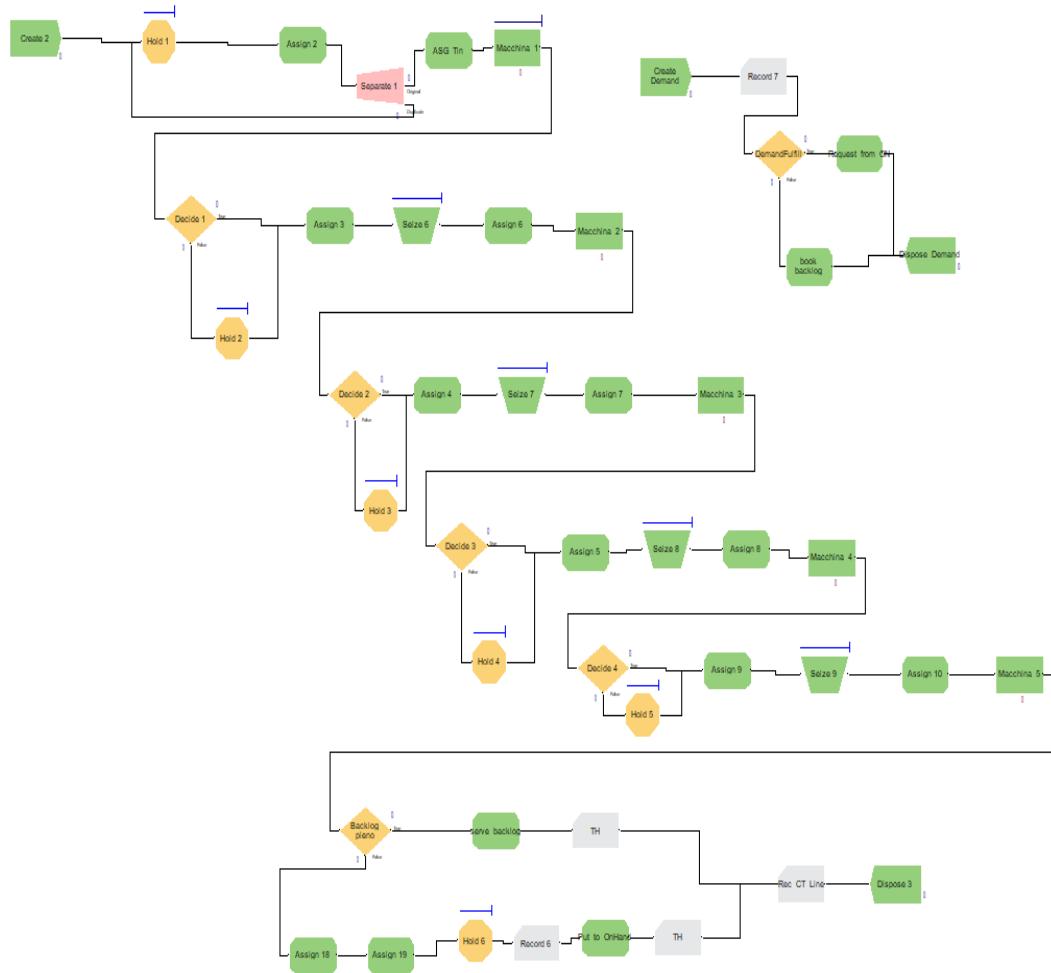
Appendice



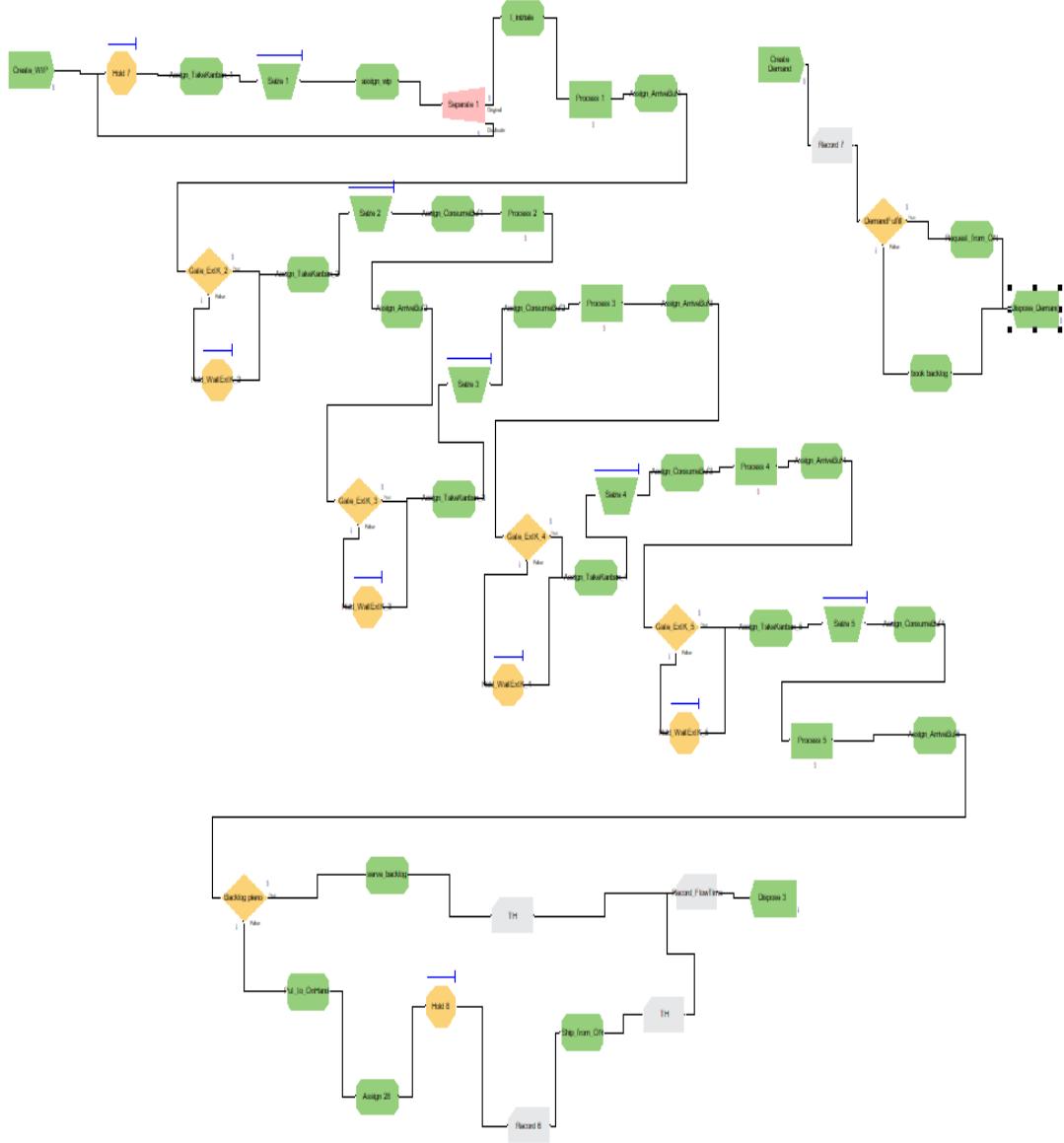
Modello Conwip su Arena



Modello Base Stock su Arena



Modello Kanban su Arena



Modello Extended Kanban su Arena