POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale

Ingegneria della produzione industriale e dell'innovazione tecnologica

Tesi di Laurea Magistrale

Analisi e simulazione ad eventi discreti di un'isola robotica progettata in MTS

Relatori

Prof. Lombardi Franco

Prof.ssa Manuela De Maddis

Candidato

Benedetta Fasciolo

Ottobre 2021

INDICE

INTRODUZIONE 2
1. AZIENDA 3
1.1 Struttura e Layout 3
1.2 Carpenteria 3
1.3 Lavorazioni meccaniche 4
1.4 Flusso produttivo 5
2. COMPONENTI E CICLO DI PRODUZIONE DELL'ISOLA ROBOTICA 7
2.1 Il tornio a controllo numerico 7
2.2 Tornitura 7
2.3 Componenti dell'isola robotica 9
2.4 Ciclo di produzione 10
..... 11
..... 11
..... 11
3 ANALISI E SIMULAZIONE AD EVENTI DISCRETI DELL'ISOLA ROBOTICA 12
3.1 Performance di una linea di produzione 12
3.2 Set up e manutenzione dell'isola robotica 13
3.3 Tempi di produzione manutenzione e setup 14
3.4 Modelli Flexsim 15
3.5 Primo modello 16
3.6 Secondo modello 18
3.6.1 Distribuzione dei guasti 18
3.6.2 Analisi della simulazione 20
3.7 Utilizzo dell'experimenter 22
3.8 Terzo modello 23
3.9 Quarto modello 28
3.10 Quinto modello 33
CONCLUSIONI 36
BIBLIOGRAFIA 37
APPENDICI 38
1. Layout MTS area carpenteria 38
2. Layout MTS area lavorazioni meccaniche 39
3. Diagramma MTS del flusso produttivo 40
4. Report completo del terzo modello di simulazione 41
5. Report completo quarto modello di simulazione 46
6. Report completo quinto modello di simulazione 50

INTRODUZIONE

La tesi sperimentale consiste nella simulazione ad eventi discreti ed analisi di un'isola robotica che è stata progettata da MTS una PMI che lavora nel settore metalmeccanico. I modelli di simulazione sono stati creati con il software Flexsim. I primi due modelli rappresentano l'isola con i parametri standard decisi da MTS mentre gli ultimi tre presentano delle proposte di miglioramento per l'ottimizzazione della produzione. L'isola è ancora in fase di progettazione per questo motivo i dati non sono stati misurati ma sono stati ipotizzati secondo le stime fatte da MTS. Oltre all'analisi delle performance, è presente anche un'analisi delle tempistiche necessarie per la produzione dell'unico componente creato nell'isola robotica.

Nello specifico, la prima parte della tesi comprenderà la descrizione dell'azienda e del suo flusso produttivo. Successivamente verrà proposta una breve descrizione dell'isola robotica e del ciclo di produzione. Infine verranno analizzati i risultati delle simulazioni ad eventi discreti fatte per stimare le tempistiche di produzione e le performance dell'isola robotica.

1. AZIENDA

MTS è una PMI di conduzione familiare, nasce 40 anni fa come officina meccanica di precisione. Attualmente ha ampliato il suo business con lavorazioni di carpenteria pesante e leggera (laser, saldatura sabbiatura) e trattamenti termici.

I clienti di MTS lavorano in diversi settori come: movimentazione terra, agricoltura, off way (strade ponti), funiviario e automotive.

1.1 Struttura e Layout

MTS è caratterizzata da 2 complessi, nel primo si svolgono operazioni di carpenteria mentre nel secondo le lavorazioni meccaniche.

La movimentazione dei grezzi da una stazione all'altra può essere effettuata tramite carrelli, robot antropomorfi o carroponti a seconda della loro dimensione. Dalla zona di lavorazione al magazzino i pezzi vengono sempre trasportati con appositi carrelli.

Nella maggior parte dei casi, le lavorazioni vengono effettuate da macchine utensile a controllo numerico parzialmente automatizzate dove l'attrezzaggio delle macchine viene fatto manualmente.

1.2 Carpenteria[1]

Nell'area di carpenteria si effettuano le seguenti lavorazioni di taglio:

- taglio per ossi fiamma: si effettua su una lamiera con uno spessore maggiore di 15 cm;
- taglio laser: si effettua su una lamiera con spessore minore di 15 cm (taglio più preciso).

Nella zona di carpenteria si effettua anche l'assemblaggio dei componenti attraverso delle maschere. L'assemblaggio consiste nella messa insieme dei componenti attraverso la maschera e poi in una successiva operazione di puntatura e saldatura. Le maschere vengono prodotte da MTS su misura per ogni prodotto.

Infine, nella zona di carpenteria vengono effettuate anche sabbiature, verniciature e piegature su richiesta del cliente.

[1] Appendice 1: Layout MTS area carpenteria

Figura 1 Appendice 1: Layout MTS area carpenteria Fonte: MTS

1.3 Lavorazioni meccaniche[2]

Nella zona delle lavorazioni meccaniche, avvengono le lavorazioni di tornitura e fresatura ed eventualmente di montaggio dei componenti.

Figura 2 Appendice 2: Layout MTS area lavorazioni meccaniche Fonte: MTS

[2] Appendice 2: Layout MTS area lavorazioni meccaniche

1.4 Flusso produttivo [3]

Figura 3 Appendice 3: Diagramma flusso produttivo MTS Fonte: elaborazione propria

Il cliente via telefonica o via mail richiede un prodotto a MTS.

L'ufficio tecnico di MTS produce un preventivo che contiene già gli elementi della commessa che dopo la conferma d'ordine vengono rivisti e resi definitivi.

Il cliente revisiona il preventivo e accetta o rifiuta l'offerta.

L'ufficio pianificazione con il supporto dell'ufficio tecnico crea la commessa entro 5 giorni dalla conferma dell'ordine. Nella commessa vengono indicate le tempistiche della produzione, i cicli operativi, i materiali, le risorse necessarie, la distinta base e le quantità. Una volta che si inseriscono i cicli operativi e la distinta base (lotto master) la commessa da attiva diventa aperta.

Dopo l'elaborazione della commessa, l'ufficio acquisti ordina il materiale necessario per la produzione. In questo modo l'ufficio pianificazione può elaborare la schedulazione della produzione.

[3]Appendice 3: Diagramma flusso produttivo MTS

Si produce la scheda di produzione un documento che segue la commessa lungo tutto il suo percorso. Contiene il disegno, le informazioni della commessa (lavorazioni, quantità, materiale, prodotto padre) e il cliente. Durante la produzione, l'operatore dovrà compilare la scheda inserendo inizio-fine attività e quantità prodotta in modo che si possa verificare l'avanzamento produzione. Successivamente la scheda di produzione viene utilizzata per fare un'analisi dei costi per capire qual è il margine effettivo ottenuto dalla commessa in analisi.

Una volta terminata la produzione, a seconda del contratto il cliente può ritirare con mezzi propri il prodotto o può incaricare MTS della spedizione.

2. COMPONENTI E CICLO DI PRODUZIONE DELL'ISOLA ROBOTICA

In questa sezione è presente una breve introduzione teorica sul tornio e la tornitura. Successivamente verranno descritti i componenti dell'isola robotica e il ciclo di produzione previsto per l'unico componente che verrà prodotto nell'isola.

2.1 Il tornio a controllo numerico

Il tornio a controllo numerico è una macchina utensile utilizzata per lavorare un pezzo in rotazione tramite l'asportazione di truciolo. L'operatore inserisce le misure e le caratteristiche del pezzo all'interno dell'unità di governo che attraverso l'utilizzo di sensori imposta i parametri e posizionamento del grezzo, dell'utensile e degli azionamenti. Il mandrino del tornio è cavo in modo da permettere il bloccaggio e la rotazione del pezzo in lavorazione.

Figura 4 mandrino del tornio Fonte: Fundamentals of modern manufacturing 4th edition

2.2 Tornitura

La tornitura è un processo di lavorazione in cui un utensile a punta singola rimuove materiale dalla superficie di un pezzo in rotazione. L'utensile viene alimentato linearmente in una direzione parallela all'asse di rotazione per generare una geometria cilindrica, come illustrato nella figura. La tornitura viene tradizionalmente eseguita su una macchina utensile chiamata tornio, che fornisce la potenza per tornire il pezzo a una data velocità di rotazione attraverso il mandrino e alimenta l'utensile a una velocità e profondità di taglio specifiche.

Figura 5 Processo di tornitura Fonte: Fundamentals of modern manufacturing 4th edition

La velocità di rotazione in tornitura è correlata alla velocità di taglio desiderata sulla superficie del pezzo cilindrico dall'equazione: $N = \frac{v}{\pi D_o}$

dove N corrisponde alla velocità di rotazione (giri/min), v corrisponde alla velocità di taglio (m/min) e D_0 corrisponde al diametro originale del pezzo (m).

L'operazione di tornitura riduce il diametro del pezzo dal suo diametro originale D_0 a un diametro finale D_f , determinato dalla profondità di taglio d: $D_f = D_o - 2d$

L'avanzamento nella tornitura è generalmente espresso in mm/giro. Questo avanzamento può essere convertito in una corsa lineare in mm/min con la formula: $f_r = Nf$

dove f_r corrisponde all'avanzamento (mm/min) e f corrisponde all'avanzamento (mm/giro). Il tempo di lavorazione da un'estremità all'altra di un pezzo cilindrico è dato da: $T_m = \frac{L}{f_r}$

dove T_m corrisponde al tempo di lavorazione (min) e L corrisponde alla lunghezza del pezzo cilindrico (mm).

2.3 Componenti dell'isola robotica

L'isola robotica implementata da MTS possiede i seguenti componenti:

- Zona di carico: I grezzi vengono trasportati manualmente da un operatore nella zona di carico che possiede un nastro trasportatore per movimentare i pezzi verso il tornio.
- Tornio bi-mandrino: in questa macchina avvengono due fasi di tornitura. Il bi-mandrino permette di effettuare le due fasi contemporaneamente e quindi lavorare due pezzi nello stesso momento. Nel tornio sono state inserite delle griffe progettate da MTS prima dell'avvio della produzione che bloccano il pezzo nelle fasi di tornitura.
- Macchina di prova a tenuta: macchina per il controllo della prova a tenuta che viene alimentata da un carrello di asservimento. I pezzi che non risultano conformi al controllo vengono posizionati in un cassone di raccolta apposito.
- Vasca per il lavaggio: capienza di 4 pezzi. Pulisce il componente con una soluzione composta da 95% acqua + 5% prodotto MASCO 445 NNF Macdermid. Il ricambio della soluzione avviene automaticamente ogni turno.
- Robot di manipolazione: ha una doppia presa che permette di manipolare contemporaneamente due pezzi. In particolare, quando il robot è nella zona di carico per ribaltare un pezzo e inserirlo nuovamente nel tornio per la seconda lavorazione, può afferrare contemporaneamente un secondo pezzo per inserirlo nel tornio bi-mandrino per la prima fase di tornitura.

Figura 6 Isola robotica Fonte: elaborazione propria

2.4 Ciclo di produzione

I grezzi vengono forniti direttamente dal cliente. All'arrivo, il materiale viene controllato per verificare che non sia danneggiato a causa del trasporto o per infiltrazioni dovute all' umidità.

Figura 7 Griffe per il bloccaggio del pezzo Fonte: MTS

Eseguito il controllo, i grezzi vengono trasportati da un operatore in prossimità dell'isola dove verranno caricati manualmente nella zona di carico una volta avviata la produzione. Da qui un robot di manipolazione afferra il grezzo esternamente e lo inserisce nelle griffe del primo mandrino dove avviene il bloccaggio e la prima lavorazione. Successivamente il robot estrae il pezzo e dopo averlo ribaltato e preso internamente nella zona di carico lo inserisce nelle griffe del secondo mandrino per il bloccaggio e la seconda fase di tornitura.

Il robot deve posizionare i particolari, che hanno completato le due fasi di tornitura, sul carrello di asservimento della macchina di prova a tenuta. Tramite il segnale di un sensore, la macchina di prova a tenuta ritirerà il componente del carrello e inizierà la prova. Se il pezzo risulta conforme, viene comunicato al robot che lo movimenterà all'interno della vasca per il lavaggio. Se il particolare risulta difettoso verrà posizionato all'interno di un cassone di raccolta per particolari non conformi presente all'interno dell'isola di lavoro.

Una volta concluso il lavaggio, il robot posiziona il pezzo all'interno di un buffer. L'operatore preleva 216 pezzi (dimensione dell'imballo) e controlla il primo e l'ultimo pezzo per individuare possibili difetti di stampo che emergono dalla lavorazione meccanica. Infine, i pezzi vengono imballati e spediti al cliente finale. Una volta al mese viene mandato un campione ad un'azienda di pulizia esterna per verificare che il lavaggio fatto nell'isola sia sufficiente per rispettare i parametri di pulizia concordati con il cliente.

Figura 8 layout isola robotica movimentazione robot Fonte: elaborazione propria

Figura 9 layout isola robotica movimentazione pezzo Fonte: elaborazione propria

3 ANALISI E SIMULAZIONE AD EVENTI DISCRETI DELL'ISOLA ROBOTICA

Durante il progetto, sono state fatte 5 simulazioni ad eventi discreti con il software Flexsim per misurare ed analizzare le performance dell'isola robotica. In particolare, i modelli di simulazione sono basati sulla parte automatizzata della linea quindi dal carico del grezzo da parte dell'operatore fino al lavaggio nella vasca.

Questa sezione comprende una breve introduzione teorica, una descrizione dei tempi di produzione, set up e manutenzione seguita da un'analisi delle performance dei 5 modelli di simulazione con una stima dei giorni necessari per la produzione di un lotto secondo le turnazioni di MTS.

3.1 Performance di una linea di produzione

I tre parametri fondamentali utilizzati per analizzare le performance della linea sono Throughput, Tempo Ciclo e Work in Progress (WIP).

Il tempo ciclo (TC) è il tempo medio di attraversamento del pezzo. Quindi può essere definito come la somma di tutti i tempi medi di attesa in coda e di tutti i tempi medi di processamento. Il WIP corrisponde al numero di pezzi presenti nel sistema. Quindi può essere definito come la somma di tutti i pezzi presenti in coda e tutti i pezzi in lavorazione. Il Throughput (TH) è il numero medio di pezzi prodotti nell'unità di tempo da un processo (tasso di uscita). Questi tre parametri sono legati dalla legge di little per cui WIP = TH x CT.

Per avere una visione più accurata delle performance di un processo è necessario considerare la variabilità. La variabilità può essere presente all'ingresso del processo o all'interno del processo stesso. Le principali fonti di variabilità sono: variabilità dovuta al lavoratore, setup, manutenzioni, rilavorazioni e guasti. Non essendo deterministiche, le variabili vengono descritte con una distribuzione che possiede i seguenti parametri: la media e la varianza σ^2 (distribuzione dei valori rispetto alla media). Quando la variabile ha una deviazione standard σ che corrisponde alla media, segue una distribuzione esponenziale. Oltre alla variabilità di processo nella linea si presenta anche la variabilità di flusso nel caso in cui la variabilità di un singolo processo influenza la variabilità del processo successivo.

Figura 10 Distribuzione Fonte: Factory physics third edition

Nelle simulazioni dell'isola robotica le principali fonti di variabilità sono le manutenzioni i set up e i guasti. La manutenzione è la combinazione di azioni volte a mantenere o a riparare un'entità in modo che possa continuare ad eseguire la funzione richiesta. La manutenzione preventiva si effettua una volta esaminati dei parametri che indicano un tempo residuo prima del guasto. La manutenzione correttiva o guasto invece si effettua una volta che si presenta un'avaria. I parametri fondamentali della manutenzione sono il Mean time

to repair (MTTR) e il Mean time between failure (MTBF). MTTR corrisponde al tempo necessario per condurre la manutenzione. Il MTBF è il tempo che intercorre tra una manutenzione e l'altra. Infine, il set up corrisponde ad un periodo di tempo necessario per preparare i macchinari alla produzione.

3.2 Set up e manutenzione dell'isola robotica

L'obiettivo di MTS è quello di produrre lotti da 12000 pezzi al mese.

Al primo avvio della produzione, l'attrezzaggio delle macchine dura 10 ore perché si fa un controllo sul funzionamento di ogni macchinario e vengono prodotte le griffe necessarie per il bloccaggio del pezzo nelle fasi di tornitura. Successivamente, ad ogni avvio di produzione quindi per ogni lotto, si fa un controllo e attrezzaggio delle macchine di 3 ore. Per il tornio bi-mandrino il cambio dell'utensile avviene senza bloccare la produzione in maniera automatica ogni volta che si finisce di produrre un lotto.

Nella macchina a prova a tenuta ogni 180 pezzi si fa un controllo di circa 2 minuti per verificare le condizioni dei componenti della macchina. Attraverso un test fatto su un pezzo campione si valuta se è necessario sostituire o pulire un determinato componente della macchina a prova tenuta.

Se la macchina a prova a tenuta scarta 5 pezzi consecutivi non conformi, l'isola si blocca mettendosi in stato d'allarme dando la possibilità all'operatore di entrare per fare un controllo di circa 1 ora. Le principali cause degli scarti consecutivi sono la guarnizione rotta a causa della presenza di bave sui componenti oppure il pezzo che ha ancora temperature troppo elevate per essere inserito nella macchina.

Il ricambio della soluzione nella vasca nella fase di lavaggio è automatizzato, ha una durata di 30 minuti ed avviene alla fine di ogni turno.

Dopo il lavaggio si fa un controllo dimensionale sul primo e ultimo pezzo inserito in una scatola di imballaggio che dura circa 10 minuti. Se il pezzo viene rilevato non conforme, si effettua un fermo lavorazione dell'isola di lavoro di circa 1 ora per un controllo di tutti i pezzi presenti nell'isola, un controllo sugli utensili e sull'attrezzaggio della macchina.

3.3 Tempi di produzione manutenzione e setup

Lavorazione	Tempo	Commenti	Variabilità
Tornitura 1	0000:01:30		tempo deterministico
Tornitura 2	0000:00:40		tempo deterministico
Prova tenuta	0000:01:00	buffer capienza massima 40 pz	tempo deterministico
Lavaggio	0000:02:00	capienza vasca 4 pz buffer lavaggio capienza massima 1000pz	tempo deterministico
Montaggio OR	0000:01:30		tempo deterministico

Movimenti robot	Tempo	Commenti	Variabilità
ribaltamento pezzo	0000:00:05	2 pezzi per presa: presa interna e presa esterna	tempo deterministico

Carico pezzo	Tempo	Commenti	Variabilità
Carico pezzo da parte dell'operatore	0000:00:05	Buffer carico operatore capienza 40 pz	distribuzione esponenziale

Manutenzione e collaudi	Tempo	Commenti	Variabilità
set up inizio produzione	0003:00:00		distribuzione esponenziale
Controllo prova a tenuta	0000:02:00	ogni 180 pezzi	distribuzione esponenziale
Cambio soluzione lavaggio	0000:30:00	ogni turno	distribuzione esponenziale
Fermo macchina per non conformità	0001:00:00	dopo controllo dimensionale	distribuzione esponenziale

Guasti tornitura e prova a tenuta	Tempo	Commenti	Variabilità
nel 60% dei casi	dalle 4 alle 8 ore	1 volta ogni 6 lotti	distribuzione esponenziale
nel 30% dei casi	dalle 8 alle 24 ore	1 volta ogni 6 lotti	
nel 10% dei casi	da 1 a 4 giorni	1 volta ogni 6 lotti	

Per fare una simulazione ad eventi discreti bisogna tenere in considerazione i tempi di lavorazione e la loro variabilità. In questo caso, essendo un'isola robotica i tempi di produzione sono deterministici e quindi la variabilità può essere trascurata. Per tutti gli interventi di manutenzione, set up e guasti essendo processi parzialmente automatizzati è stata considerata una variabilità attraverso una distribuzione esponenziale.

Nella sezione dei guasti sono presenti diversi tipi di guasto per la macchina di tornitura e la prova a tenuta. I guasti che durano mediamente dalle 4 alle 24 ore sono guasti che vengono risolti con le risorse interne di MTS e hanno una probabilità maggiore di avvenimento. L'altro tipo di guasto viene invece gestito con le risorse dei fornitori dei macchinari e per questo richiede più tempo per essere risolto. I dati e le tempistiche sui guasti sono stati raccolti da MTS su produzioni simili a quella dell'isola robotica. Analizzando i dati, si può dedurre che essi seguono una distribuzione esponenziale.

I tempi di movimentazione del pezzo attraverso il robot sono trascurabili a parte quando il pezzo viene ribaltato nella zona di carico e scarico per poi essere inserito nel tornio bi-mandrino per la seconda fase di tornitura dove vengono considerati 5 secondi di movimentazione robot.

3.4 Modelli Flexsim

Per ottenere un'analisi dettagliata delle performance dell'isola per quanto riguarda WIP, cycle time e throughput, sono stati fatti dei modelli di simulazione ad eventi discreti facendo variare diversi parametri.

In generale tutti i modelli a livello di scarti rappresentano il "worst case scenario". Quindi è stato impostato come percentuale di pezzi scartati lo 0.01% dei pezzi prodotti. Questa percentuale rappresenta il numero massimo di scarti che l'isola può produrre secondo gli accordi fatti tra MTS e il cliente.

Il primo modello rappresenta il funzionamento dell'isola con i parametri precedentemente descritti. Tutti i tempi di lavorazione, set up e manutenzione vengono considerati deterministici. In particolare, è stato impostato un tempo di carico del grezzo da parte dell'operatore di 5 secondi. La zona di carico dove staziona il grezzo prima di essere manipolato dal robot ha una capienza massima 40 pezzi. Ogni 180 pezzi è stato inserito un controllo della macchina di prova a tenuta di 2 minuti. Per quanto riguarda i fermi macchina, dovuti ai 5 pezzi consecutivi non conformi nella macchina a prova a tenuta o per i pezzi non conformi dopo l'ispezione a fine produzione, è stato inserito un guasto unico che si presenta ogni 10000 pezzi e ha una durata di un'ora. Il fermo macchina ogni 10000 pezzi rappresenta la frequenza con cui si presenta uno scarto considerando il "worst case scenario" ossia 0.01% dei pezzi prodotti. I 5 secondi della movimentazione del robot vengono considerati nella prima fase di tornitura. In questo modo, quando il primo pezzo viene ribaltato per la seconda fase di tornitura, il simulatore non inserisce già nella prima fase di tornitura il pezzo successivo. Infine i guasti del tornio e della macchina a prova a tenuta si presentano una volta ogni 6 lotti e hanno un MTTR deterministico che corrisponde alla media pesata dei tempi dei guasti forniti da MTS.

Il secondo modello tiene in considerazione tutti gli elementi del primo. Ai tempi di manutenzione, set up, guasti e carico dell'operatore viene però attribuita una distribuzione esponenziale per tenere conto della variabilità.

Il terzo modello fa riferimento al secondo e impone come variabile la capienza della vasca. Facendola variare, sarà possibile capire fino a quale livello questa variabile impatta le performance della linea.

Il quarto modello ribilancia le due fasi di tornitura mantenendo come tempo totale di lavoro di tornitura 2 minuti e 10 secondi.

Per la simulazione del terzo e quarto modello è stato utilizzato l'experimenter di Flexsim.

3.5 Primo modello

Figura 11 Modello di simulazione Flexsim Fonte: elaborazione propria

Come è stato descritto nel capitolo precedente, nel primo modello è stata analizzata l'isola con i tempi deterministici forniti da MTS.

- Tempi di lavorazione e movimentazione robot;
- Set up di inizio lavorazione lotto;
- Set up per cambio soluzione del lavaggio;
- Manutenzione della macchina a prova a tenuta;
- Manutenzione in caso di scarti della macchina a prova a tenuta o del lavaggio;
- Guasti della macchina a prova a tenuta e del tornio.

I risultati ottenuti per la produzione di 12 lotti (un anno intero) sono i seguenti:

Average Content

Object	AverageWIP
Queue1	40.00
buffer	0.01
Queue2	0.00
T1	1.00
T2	0.42
Prova a tenuta	0.63
lavaggio	1.31
Carico operatore	0.00

Output / Hour

Object	Throughput
lavaggio	37.26

Staytime

Object	Avg Staytime	Min Staytime	Max Staytime
Carico operatore	91.58	0	51931
Queue1	3863.72	0	55641
T1	96.61	95	51936
T2	40.56	40	51881
buffer	0.83	0	85
Prova a tenuta	60.84	60	3660
lavaggio	126.26	120	3720
Queue2	0.00	0	0

Per quanto riguarda il Throughput l'isola produce 37.26 pezzi l'ora.

Il WIP medio corrisponde a 43.37 pezzi di cui il 92% è presente nel primo buffer dell'isola. Questo è dovuto al fatto che l'operatore carica i pezzi con una frequenza di circa 5 secondi mentre la prima fase della tornitura, che rappresenta il collo di bottiglia, è di un minuto e mezzo.

La somma dei tempi di produzione corrisponde a circa 5 minuti e 24 secondi. Il tempo di carico dell'operatore risulta di circa un minuto e mezzo mentre la permanenza nel primo buffer è di un'ora e 4 minuti. Questo comporta un tempo ciclo medio complessivo di un'ora e undici minuti. È importante notare come il tempo di produzione ossia il tempo di valore aggiunto corrisponde solo al 7.5% del tempo ciclo totale. Questo significa che la struttura e il ciclo di produzione dell'isola non è ottimizzato.

Anche per quanto riguarda l'utilizzo dei vari componenti dell'isola si possono notare criticità. Infatti, l'operatore risulta bloccato per il 94,82% del tempo a causa del collo di bottiglia (T1) che influenza anche i processi successivi creando dell'idle. In particolare, il tempo di inattività della seconda fase di tornitura è del 57.86% mentre della prova a tenuta 36.47%.

PRIMO MODELLO		
tempo di processamento [h]	322.06	322.06
turno [h]	8	8
turni al giorno	2	3
giorni necessari per la produzione	**21**	**14**

L'obiettivo di MTS è quello di produrre un lotto da 12000 pezzi al mese. Dalla simulazione per la produzione di un lotto sono necessarie 322.06 ore. Con un turno di 8 ore e utilizzando 2 turni al giorno sono sufficienti 21 giorni lavorativi per la produzione di un lotto. Se invece si preferisce lavorare 3 turni saranno necessari 14 giorni lavorativi. Considerando che MTS lavora 6 giorni su 7, rimangono 3 giorni di margine nella prima

opzione e 10 giorni di margine considerando la seconda per gestire qualunque tipo di imprevisto e rispettando comunque gli obiettivi di produzione.

Sono state considerate 8 ore effettive di produzione perché l'isola è totalmente automatizzata a parte nel carico del grezzo. Siccome l'operatore carica un pezzo ogni 5 secondi e il buffer prima del tornio bi-mandrino ha una capacità di 40 pezzi, l'operatore in circa 5 minuti avrà riempito il buffer dell'isola. Quest'ultima durante la pausa consumerà circa 18.63 pezzi avendo un throughput di 37.26 pz/h. Di conseguenza il buffer avrà ancora un margine di 21.37 pezzi che copre l'autonomia dell'isola per almeno altri 30 minuti.

3.6 Secondo modello

3.6.1 Distribuzione dei guasti

Come è già stato specificato nelle sezioni precedenti, i dati sui guasti forniti da MTS sono stati raccolti da produzioni simili. I risultati ottenuti si possono riassumere nella seguente tabella:

Guasti tornitura e prova a tenuta	MTTR	MTBF
nel 60% dei casi	dalle 4 alle 8 ore	1 volta ogni 6 lotti
nel 30% dei casi	dalle 8 alle 24 ore	1 volta ogni 6 lotti
nel 10% dei casi	da 1 a 4 giorni	1 volta ogni 6 lotti

Per ottenere la distribuzione dei guasti, sono stati analizzati i dati attraverso un box plot e un istogramma.

I dati che sono stati considerati per la creazione del box plot sono i seguenti:

Box plot	[s]
media	51481
min	14445
max	314014
primo quartile	20173
secondo quartile	71425
mediana	26157

Questi dati hanno portato alla creazione del seguente box plot:

Figura 12 Box plot dei guasti Fonte: elaborazione propria

Questi dati hanno portato alla creazione del seguente istogramma:

Figura 13 Istogramma dei guasti Fonte: elaborazione propria

Per escludere la possibilità che i dati seguissero una distribuzione normale, sono stati trasformati i dati con il logaritmo naturale e analizzati attraverso il box plot.

Il Box Plot dei dati trasformati in logaritmo naturale conferma che i dati non hanno una distribuzione normale. Di conseguenza la distribuzione dei guasti risulta essere esponenziale con una media del MTTR di circa 14 ore.

Figura 14 Box plot dati in ln Fonte: elaborazione propria

3.6.2 Analisi della simulazione

Nel secondo modello viene introdotta la variabilità dei guasti, manutenzioni e set up attraverso una distribuzione esponenziale.

Per vedere l'impatto della variabilità sulle performance della linea, la simulazione è stata fatta girare per l'intera produzione di un anno (144000 pezzi). I risultati della simulazione sono riportati in seguito:

Average Content

Object	AverageWIP
Queue1	40.00
buffer	0.13
Queue2	0.17
T1	1.00
T2	0.42
Prova a tenuta	0.62
lavaggio	1.29
Carico operatore	0.00

Output / Hour

Object	Throughput
lavaggio	36.86

Staytime

Object	Avg Staytime	Min Staytime	Max Staytime
Carico operatore	92.61	0.00	95588.31
Queue1	3904.91	0.00	99301.66
T1	97.64	95.00	95596.66
T2	40.88	40.00	95596.66
buffer	12.33	0.00	15917.26
Prova a tenuta	60.90	60.00	5088.63
lavaggio	126.43	120.00	15798.02
Queue2	16.82	0.00	9749.85

Il Throughput dell'isola è passato da 37.26 pezzi l'ora a 36.86 pezzi l'ora riducendo mediamente la produzione di 0.4 pezzi l'ora.

Il WIP medio aumenta leggermente con una media di 43.67 pezzi nell'isola.

Anche il tempo ciclo subisce un leggero aumento a causa della variabilità. Infatti, da un tempo ciclo di un'ora e undici minuti si passa ad un tempo ciclo di un'ora e dodici minuti.

Infine, anche gli utilizzi vengono influenzati negativamente dalla variabilità che vengono abbassati in ogni processo di uno/ due punti percentuali.

GUASTI		
tempo di processamento [h]	325.56	325.56
turno [h]	8	8
turni al giorno	2	3
giorni necessari per la produzione	**21**	**14**

Con la presenza della variabilità, il tempo di processamento per la produzione di un lotto aumenta di circa 5 ore che non influenza i giorni effettivi necessari per la produzione. Infatti, se MTS decidesse di dedicare 2 turni su impiegherebbe 21 giorni mentre se decidesse di sfruttare l'intera turnazione, sarebbero necessari 14 giorni di produzione. E' importante comunque notare come la variabilità di flusso e di processo impatta negativamente le performance di una linea ed è per questo motivo che deve sempre essere minimizzata.

3.7 Utilizzo dell'experimenter

Per fare la simulazione del terzo e quarto modello è stata utilizzata la versione di Flexsim con l'experimenter. Questa modalità permette di individuare una o più variabili e farle variare in più scenari in modo tale da analizzare come cambiano i parametri critici.

Per il terzo modello è stata considerata come variabile la dimensione (max content) della vasca presentando 4 scenari diversi:

Figura 15 Flexsim experimenter scenarios Fonte: elaborazione propria

Nel primo scenario la dimensione della vasca è di 4 unità, nel secondo di 3 mentre nel quarto la dimensione della vasca nella fase del lavaggio è di una unità.

Figura 16 Flexsim experimenter Fonte: elaborazione propria

Una volta fissata la variabile e i suoi scenari si sceglie il numero di volte in cui viene ripetuta la simulazione e si sceglie anche la durata di ogni replica. Per i modelli analizzati sono state impostate 5 repliche e la durata corrisponde a 4000 ore che sono approssimativamente le ore necessarie per la produzione di 12 lotti (un anno di produzione).

Una volta che l'experimenter conclude la simulazione con i vari scenari e repliche è possibile visualizzare i risultati dei parametri critici che vengono precedentemente selezionati della sezione perfomance measures.

Per il quanto riguarda invece il quarto modello, vengono considerate come variabili i tempi di processamento delle due fasi di tornitura. Nel primo scenario i tempi delle torniture sono quelli impostati da MTS mentre nel secondo scenario il tempo viene bilanciato tra le due fasi di tornitura.

3.8 Terzo modello[4]

Nel terzo modello la variabile è la capienza della vasca. È stata fatta una simulazione con 4 scenari diversi variando la capienza della vasca da 4 (scenario 1) a 1 posto (scenario 4). È stato simulato un anno di produzione misurando il tempo ciclo, il WIP e throughput medio. Per ogni scenario sono state fatte 5 repliche. I risultati della simulazione sono riportati di seguito.

Throughput

	Summary							
		Mean (90% Confidence)					Sample Std Dev	Min	Max
4pz	Scenario 1	36.605	<	36.826	<	37.047	0.232	36.417	36.977
3pz	Scenario 2	36.605	<	36.826	<	37.047	0.232	36.417	36.977
2pz	Scenario 3	36.605	<	36.826	<	37.047	0.232	36.416	36.977
1pz	Scenario 4	28.447	<	28.491	<	28.534	0.046	28.426	28.554

[4] Appendice 4: Report completo del terzo modello

Tempo ciclo

Summary								
	Mean (90% Confidence)					Sample Std Dev	Min	Max
Scenario 1	4240	<	4265	<	4290	26	4245	4311
Scenario 2	4243	<	4267	<	4292	26	4249	4312
Scenario 3	4283	<	4308	<	4332	26	4285	4350
Scenario 4	124406	<	125610	<	126814	1263	123637	127038

Replications Plot

Staytime

Object	Avg Staytime	Min Staytime	Max Staytime
Carico operatore	92.61	0.00	95588.31
Queue1	3904.91	0.00	99301.66
T1	97.64	95.00	95596.66
T2	40.88	40.00	95596.66
buffer	12.33	0.00	15917.26
Prova a tenuta	60.90	60.00	5088.63
lavaggio	126.43	120.00	15798.02
Queue2	16.82	0.00	9749.85

Staytime

Object	Avg Staytime	Min Staytime	Max Staytime
Carico operatore	92.37	0.00	95588.31
Queue1	3895.09	0.00	99301.66
T1	97.39	95.00	95596.66
T2	40.76	40.00	95596.66
buffer	14.31	0.00	15917.26
Prova a tenuta	60.94	60.00	15889.89
lavaggio	126.42	120.00	11095.89
Queue2	122682.19	0.00	146986.78

WIP

	Summary							
		Mean (90% Confidence)				Sample Std Dev	Min	Max
4pz	Scenario 1	43.08	<	43.60	<	44.12	0.55	43.00	44.00
3pz	Scenario 2	43.08	<	43.60	<	44.12	0.55	43.00	44.00
2pz	Scenario 3	43.00	<	43.80	<	44.60	0.84	43.00	45.00
1pz	Scenario 4	785.85	<	954.00	<	1122.15	176.36	640.00	1043.00

Replications Plot

Utilizzo

	Summary							
		Mean (90% Confidence)				Sample Std Dev	Min	Max
4pz	Scenario 1	0.6023	<	0.6055	<	0.6088	0.0034	0.5995	0.6081
3pz	Scenario 2	0.6023	<	0.6055	<	0.6088	0.0034	0.5995	0.6081
2pz	Scenario 3	0.6023	<	0.6056	<	0.6088	0.0034	0.5996	0.6081
1pz	Scenario 4	0.6097	<	0.6121	<	0.6145	0.0025	0.6076	0.6140

Replications Plot

Come si può notare dai risultati, le performance dell'isola non cambiano per i primi tre scenari. Questo significa che la capienza della vasca può essere ridotta fino a due componenti e mantenere sempre un throughput di 36.83 pz/h, un WIP medio di 44 pezzi, un tempo ciclo di 1 ora e 11 minuti circa e l'utilizzo medio dell'isola è intorno al 60.5%.

Nel quarto scenario, che corrisponde alla capienza di un pezzo, le performance dell'isola si riducono notevolmente. Infatti, il throughput è di 28.42 pz/h da cui consegue una riduzione della produttività di 8.34 pezzi l'ora. Il WIP aumenta di 875 pezzi saturando il buffer presente prima del lavaggio. Il tempo ciclo è di un giorno e dieci ore perché il tempo di attesa in coda prima del lavaggio passa a essere di un giorno e 9 ore. L'utilizzo aumenta di 0.71 punti percentuali arrivando ad un utilizzo medio dell'isola di 61.21% che aumenta principalmente grazie all'utilizzo del lavaggio che arriva al 99.59%.

CAPIENZA VASCA 4-2 PZ		
tempo di processamento [h]	325.82	325.82
turno [h]	8	8
turni al giorno	2	3
giorni necessari per la produzione	**21**	**14**

CAPIENZA VASCA 1 PZ		
tempo di processamento [h]	421.20	421.20
turno [h]	8	8
turni al giorno	2	3
giorni necessari per la produzione	**27**	**18**

Come è già stato anticipato, con una capienza dai 4 ai 2 pezzi le performance dell'isola rimangono le stesse del primo modello e quindi per la produzione di un lotto da 12000 pezzi sono necessari 21 giorni lavorativi con due turni da 8 ore.

Per quanto riguarda il modello con la capienza della vasca di un solo pezzo, le performance peggiorano e sono necessari 27 giorni con due turni da 8 ore per la produzione di un lotto da 12000 pezzi. Tenendo in considerazione che l'obiettivo di MTS è quello di produrre 12000 pezzi in un mese, questa casistica risulta percorribile solo se si usufruisce di 3 turni di 8 ore al giorno utilizzando 18 giorni di produzione.

Il layout dell'isola è stato sviluppato tenendo in considerazione una vasca con una capacità di 4 pezzi, per questo motivo la soluzione migliore sarebbe ridurre la capacità fino a 2 pezzi mantenendo le stesse performance ma guadagnando spazio nell'isola grazie alle dimensioni minori della vasca.

3.9 Quarto modello [5]

Nel quarto modello le variabili sono il tempo di processamento delle fasi di tornitura. È stata fatta una simulazione con un due scenari. Nel primo scenario i tempi di tornitura sono quelli effettivi dell'isola robotica (95 secondi per la prima fase e 40 secondi per la seconda). I tempi di processamento di T1 e T2 vengono bilanciati invece nel secondo scenario mantenendo però come tempo totale di lavoro di tornitura 2 minuti e 10 secondi (65 secondi per ogni fase di tornitura + 5 secondi di movimentazione del robot nella prima fase). Sono state fatte 5 repliche della simulazione e sono stati ottenuti il tempo ciclo, il WIP, throughput medio e l'utilizzo. I risultati sono riportati di seguito.

Throughput

Standard
Bilanciato

Summary								
	Mean (90% Confidence)					Sample Std Dev	Min	Max
Scenario 1	36.60	<	36.83	<	37.05	0.23	36.42	36.98
Scenario 2	49.52	<	49.78	<	50.04	0.27	49.30	49.91

[5]Appendice 5: Report completo del quarto modello

Tempo ciclo

Standard
Bilanciato

Summary								
	Mean (90% Confidence)					Sample Std Dev	Min	Max
Scenario 1	4240	<	4265	<	4290	26	4245	4311
Scenario 2	3246	<	3263	<	3281	18	3248	3290

Staytime

Object	Avg Staytime	Min Staytime	Max Staytime
Carico operatore	92.61	0.00	95588.31
Queue1	3904.91	0.00	99301.66
T1	97.64	95.00	95596.66
T2	40.88	40.00	95596.66
buffer	12.33	0.00	15917.26
Prova a tenuta	60.90	60.00	5088.63
lavaggio	126.43	120.00	15798.02
Queue2	16.82	0.00	9749.85

Staytime

Object	Avg Staytime	Min Staytime	Max Staytime
Carico operatore	67.13	0.00	95620.57
Queue1	2885.53	0.00	98351.66
T1	72.15	70.00	95621.66
T2	65.92	65.00	95621.66
buffer	16.83	0.00	5015.83
Prova a tenuta	60.88	60.00	5079.29
lavaggio	126.39	120.00	15798.02
Queue2	15.75	0.00	9718.92

WIP

Standard Bilanciato

Summary								
	Mean (90% Confidence)					Sample Std Dev	Min	Max
Scenario 1	43.08	<	43.60	<	44.12	0.55	43.00	44.00
Scenario 2	44.37	<	44.80	<	45.23	0.45	44.00	45.00

Utilizzo

Standard bilanciato

Summary								
	Mean (90% Confidence)					Sample Std Dev	Min	Max
Scenario 1	0.6023	<	0.6055	<	0.6088	0.0034	0.5995	0.6081
Scenario 2	0.7462	<	0.7499	<	0.7536	0.0038	0.7430	0.7520

Dai risultati si può dedurre che bilanciare i tempi delle fasi di tornitura porterebbe ad un netto miglioramento delle performance della linea. Infatti, il throughput diventa 49.78 pz/h aumentando la produttività di 12.95 pezzi l'ora. Il tempo ciclo è di 54 minuti riducendosi quindi di 18 minuti dovuto principalmente alla riduzione del tempo di attesa in coda per la prima fase di tornitura. Considerando che il tempo di produzione quindi di valore aggiunto è di 5 minuti e 25 secondi il tempo di attesa che non fornisce valore aggiunto si riduce di 3 punti percentuali andando al 90% del tempo totale. Anche l'utilizzo viene ottimizzato ottenendo un utilizzo medio della linea del 75% contro l'utilizzo della linea in condizioni standard del 60%. In particolare, aumentano di 50 punti percentuali la seconda fase di tornitura e di 20 punti percentuali la prova a tenuta. Questo perché bilanciando i tempi di tornitura si elimina il collo di bottiglia creatosi nelle condizioni standard nella prima fase di tornitura.

TORNITURA BILANCIATA		
tempo di processamento [h]	241.06	241.06
turno [h]	8	8
turni al giorno	2	3
giorni necessari per la produzione	**16**	**11**

Attraverso il bilanciamento dei tempi delle fasi di tornitura, si risparmiano 5 giorni di lavorazione per la produzione di un lotto da 12000 pezzi rispetto al modello con le fasi di tornitura rispettivamente di 95 e 40 secondi. In questo modo, si ottiene un margine maggiore per la gestione di eventuali imprevisti tecnici o logistici.

3.10 Quinto modello[6]

Utilizzando l'experimenter di Flexsim sono stati uniti il terzo e quarto modello per analizzare le performance della linea con i miglioramenti proposti.

I risultati sono i seguenti:

Throughput

Summary							
	Mean (90% Confidence)					Sample Std Dev	Min	Max
Scenario 1	49.52	<	49.78	<	50.03	0.27	49.30	49.91

Tempo ciclo

Summary							
	Mean (90% Confidence)					Sample Std Dev	Min	Max
Scenario 1	3511	<	3557	<	3603	48	3490	3603

[6] Appendice 6: Report completo del quinto modello

WIP

Summary							
	Mean (90% Confidence)					Sample Std Dev	Min	Max
Scenario 1	44.3	<	48.8	<	53.3	4.8	44.0	56.0

Utilizzo

Summary							
	Mean (90% Confidence)					Sample Std Dev	Min	Max
Scenario 1	0.7466	<	0.7503	<	0.7539	0.0038	0.7435	0.7524

Di conseguenza con un throughput, tempo ciclo, WIP e utilizzo medio rispettivamente di 49.78 pz/h, 1h, 48.8 pezzi e 75% le performance dell'isola sono in netto miglioramento ottimizzando la produzione e il layout. Infatti, con questi parametri MTS produrrebbe un lotto di 12000 pezzi in circa 241 ore come è mostrato nel seguente confronto:

ISOLA STANDARD		
tempo di processamento [h]	325.56	325.56
turno [h]	8	8
turni al giorno	2	3
giorni necessari per la produzione	**21**	**14**

OTTIMIZZAZIONE PRODUZIONE		
tempo di processamento [h]	240.96	240.96
turno [h]	8	8
turni al giorno	2	3
giorni necessari per la produzione	**16**	**11**

Quindi se MTS decidesse di implementare le due proposte di miglioramento, andrebbe a risparmiare nei costi di investimento dell'isola e ridurrebbe di 5 giorni la produzione di un lotto risparmiando un totale di circa 85 ore.

CONCLUSIONI

MTS ha deciso di investire nella produzione di una nuova isola robotica parzialmente automatizzata. Attraverso più simulazioni ad eventi discreti, sono state analizzate le performance e tempistiche dell'isola per la produzione di un singolo componente con lotti da 12000 pezzi al mese.

Nel primo modello di simulazione sono state analizzate le performance dell'isola robotica con i tempi deterministici forniti da MTS. Nel secondo modello è stata considerata la variabilità attraverso la distribuzione esponenziale applicata nei tempi di set up, guasti e manutenzione. I primi due modelli sono stati poi messi a confronto per capire quanto la variabilità impatta sulle performance di una linea. Inoltre, dai risultati ottenuti del secondo modello di simulazione, è visibile che la produzione non è ottimizzata perché il pezzo passa circa il 93% del tempo ciclo in attesa di lavorazione e i vari macchinari sono utilizzati mediamente per il 60%. Nel terzo modello, quindi, viene presentata l'ottimizzazione del layout riducendo le dimensioni della vasca. Questa proposta, non porta ad un miglioramento delle performance dell'isola ma ad una riduzione dei costi di investimento sull'isola robotica e ad una ottimizzazione dello spazio disponibile. Infine, nel quarto modello viene proposto il bilanciamento dei tempi di tornitura del tornio bi-mandrino. Questa modifica porta ad un netto miglioramento delle performance dell'isola riducendo il tempo di attesa in coda di 18 minuti e aumentando l'utilizzo medio dei macchinari di 15 punti percentuali. Infine, nell'ultimo modello, sono state unite le due proposte di miglioramento ottenendo un throughput di 49.78 pz/h, un tempo ciclo di un'ora, un WIP di 48.8 pezzi e un utilizzo medio dell'isola del 75%. Questi risultati porterebbero ad un risparmio di 5 giorni per ogni lotto di produzione.

BIBLIOGRAFIA

- Factory physics third edition Wallance J. Hopp Mark L.Spearman;
- Gestione delle operation e processi Slack, Brandon-Jones, Johnston, Betts, Vinelli, Romano, Danese
- Fondumentals of modern manufacturing (materials, processes and systems) 4th edition Mikell P. Groover;
- S. Kalpakjian, S.R. Schmid. “Manufacturing processes for Engineering Materials”, Fifth Edition, Prentice Hal;

APPENDICI

1. Layout MTS area carpenteria

2. Layout MTS area lavorazioni meccaniche

3. Diagramma MTS del flusso produttivo

4. Report completo del terzo modello di simulazione

Experimentation Report

Number of Scenarios: 4
Number of Replications Per Scenario: 5
Warmup Time: 0

Throughput Per Hour _Prod_ - Throughput Sum

Summary

	Mean (90% Confidence)	Sample Std Dev	Min	Max
Scenario 1	36.605 < 36.826 < 37.047	0.232	36.417	36.977
Scenario 2	36.605 < 36.826 < 37.047	0.232	36.417	36.977
Scenario 3	36.605 < 36.826 < 37.047	0.232	36.416	36.977
Scenario 4	28.447 < 28.491 < 28.534	0.046	28.426	28.554

Raw Data

	1	2	3	4	5
Scenario 1	36.8825	36.41675	36.949	36.904	36.9765
Scenario 2	36.8825	36.41675	36.949	36.904	36.9765
Scenario 3	36.8825	36.4165	36.949	36.904	36.9765
Scenario 4	28.48425	28.4875	28.426	28.5015	28.55375

TempoCiclo - AvgStaytime Sum

Summary

	Mean (90% Confidence)			Sample Std Dev	Min	Max
Scenario 1	4240	< 4265	< 4290	26	4245	4311
Scenario 2	4243	< 4267	< 4292	26	4249	4312
Scenario 3	4283	< 4308	< 4332	26	4285	4350
Scenario 4	124406	< 125610	< 126814	1263	123637	127038

Raw Data

1	2	3	4	5

Scenario 1	4257.117334	4310.60625	4253.342962	4256.699067	4245.120553
Scenario 2	4260.069261	4312.476903	4254.103511	4259.839691	4249.254881
Scenario 3	4307.51264	4349.906996	4285.353599	4307.912255	4288.928396
Scenario 4	126081.706907	123636.630214	127037.940351	125978.486789	125313.650859

State - Utilization Average

Summary

	Mean (90% Confidence)	Sample Std Dev	Min	Max
Scenario 1	0.6023 < 0.6055 < 0.6088	0.0034	0.5995	0.6081
Scenario 2	0.6023 < 0.6055 < 0.6088	0.0034	0.5995	0.6081
Scenario 3	0.6023 < 0.6056 < 0.6088	0.0034	0.5996	0.6081
Scenario 4	0.6097 < 0.6121 < 0.6145	0.0025	0.6076	0.6140

Raw Data

	1	2	3	4	5
Scenario 1	0.606147	0.599543	0.607422	0.606502	0.60807

Scenario 2	0.60615	0.599544	0.607426	0.606502	0.608071
Scenario 3	0.606214	0.599588	0.607455	0.606525	0.608104
Scenario 4	0.612594	0.607636	0.613413	0.612763	0.614004

Composite WIP - WIP Average

Summary

	Mean (90% Confidence)			Sample Std Dev	Min	Max
Scenario 1	43.08	< 43.60	< 44.12	0.55	43.00	44.00
Scenario 2	43.08	< 43.60	< 44.12	0.55	43.00	44.00
Scenario 3	43.00	< 43.80	< 44.60	0.84	43.00	45.00
Scenario 4	785.85	< 954.00	< 1122.15	176.36	640.00	1043.00

Raw Data

	1	2	3	4	5
Scenario 1	43	44	43	44	44
Scenario 2	43	44	43	44	44

Scenario 3	43	45	43	44	44
Scenario 4	1042	640	1042	1043	1003

Performance Measures

Throughput Per Hour _Prod_ - Throughput Sum
TempoCiclo - AvgStaytime Sum
State - Utilization Average
Composite WIP - WIP Average

5. Report completo quarto modello di simulazione

Experimentation Report

Number of Scenarios: 2
Number of Replications Per Scenario: 5
Warmup Time: 0

Throughput Per Hour _Prod_ - Throughput Sum

Summary

	Mean (90% Confidence)	Sample Std Dev	Min	Max
Scenario 1	36.60 < 36.83 < 37.05	0.23	36.42	36.98
Scenario 2	49.52 < 49.78 < 50.04	0.27	49.30	49.91

Replications Plot

Frequency Histogram

Raw Data

	1	2	3	4	5
Scenario 1	36.8825	36.41675	36.949	36.904	36.9765

Scenario 2	49.9035	49.2955	49.91325	49.91475	49.8635

TempoCiclo - AvgStaytime Sum

Summary

	Mean (90% Confidence)			Sample Std Dev	Min	Max
Scenario 1	4240 <	4265 <	4290	26	4245	4311
Scenario 2	3246 <	3263 <	3281	18	3248	3290

Raw Data

	1	2	3	4	5
Scenario 1	4257.117334	4310.60625	4253.342962	4256.699067	4245.120553
Scenario 2	3247.615768	3290.494982	3248.07242	3259.190287	3271.38596

State - Utilization Average

Summary

	Mean (90% Confidence)	Sample Std Dev	Min	Max
Scenario 1	0.6023 < 0.6055 < 0.6088	0.0034	0.5995	0.6081
Scenario 2	0.7462 < 0.7499 < 0.7536	0.0038	0.7430	0.7520

Raw Data

	1	2	3	4	5
Scenario 1	0.606147	0.599543	0.607422	0.606502	0.60807
Scenario 2	0.751361	0.743022	0.751979	0.751573	0.751542

Composite WIP - WIP Average

Summary

	Mean (90% Confidence)	Sample Std Dev	Min	Max
Scenario 1	43.08 < 43.60 < 44.12	0.55	43.00	44.00
Scenario 2	44.37 < 44.80 < 45.23	0.45	44.00	45.00

Raw Data

	1	2	3	4	5
Scenario 1	43	44	43	44	44
Scenario 2	45	44	45	45	45

Performance Measures

Throughput Per Hour_Prod_ - Throughput Sum
TempoCiclo - AvgStaytime Sum
State - Utilization Average
Composite WIP - WIP Average

6. Report completo quinto modello di simulazione

Experimentation Report

Number of Scenarios: 1
Number of Replications Per Scenario: 5
Warmup Time: 0

Throughput Per Hour _Prod_ - Throughput Sum

Summary

	Mean (90% Confidence)	Sample Std Dev	Min	Max
Scenario 1	49.52 < 49.78 < 50.03	0.27	49.30	49.91

Replications Plot

Frequency Histogram

Raw Data

	1	2	3	4	5
Scenario 1	49.9025	49.2955	49.9105	49.91325	49.8635

TempoCiclo - AvgStaytime Sum

Summary

	Mean (90% Confidence)	Sample Std Dev	Min	Max
Scenario 1	3511 < 3557 < 3603	48	3490	3603

State - Utilization Average

Summary

	Mean (90% Confidence)	Sample Std Dev	Min	Max
Scenario 1	0.7466 < 0.7503 < 0.7539	0.0038	0.7435	0.7524

Raw Data

	1	2	3	4	5
Scenario 1	0.751708	0.743468	0.752359	0.751912	0.751859

Composite WIP - WIP Average

Summary

	Mean (90% Confidence)					Sample Std Dev	Min	Max
Scenario 1	44.3	<	48.8	<	53.3	4.8	44.0	56.0

Raw Data

	1	2	3	4	5
Scenario 1	49	44	56	50	45

Performance Measures

Throughput Per Hour _Prod_ - Throughput Sum
TempoCiclo - AvgStaytime Sum
State - Utilization Average
Composite WIP - WIP Average