



Università degli Studi di Salerno
Dipartimento di Scienze Economiche e Statistiche

Scuola Dottorale “Antonio Genovesi”

Dottorato di Ricerca in
Ingegneria ed Economia dell’Innovazione

X ciclo

Tesi di Dottorato

*Strumenti per la simulazione:
dal “Discrete Event Simulation” all’ “Agent Based Modeling” –
Lo stato dell’arte attraverso lo sviluppo di casi reali e la sperimentazione
delle nuove metodologie.*

Relatore:

Ch.mo Prof. Alfredo Lambiase

Candidato

Sammarco Mauro

8883100012

Coordinatore:

Ch.mo Prof. Alessandra Amendola

Anno accademico 2011/2012

INDICE

Capitolo 1 *La simulazione*

- 1.1 Introduzione
- 1.2 Campi di applicazione
- 1.3 La modellazione
- 1.4 Vantaggi
- 1.5 Svantaggi
- 1.6 I tre paradigmi del computer modeling
- 1.7 Ultimi sviluppi

Capitolo 2 *Discrete Event Simulation*

- 2.1 Introduzione
- 2.2 Il caso Confalone
 - 2.2.1 Acquisizione dati
 - 2.2.2 Modellazione del sistema con QUEST Delmia
 - 2.2.3 Validazione del modello
 - 2.2.4 Ottimizzazione del modello
 - 2.2.5 Conclusioni
 - 2.2.6 Articolo
- 2.3 Sviluppo di un' architettura software per l'ottimizzazione dello sviluppo di modelli di simulazione DES con QUEST Delmia
 - 2.3.1 Struttura del software
 - 2.3.2 Validazione del software
 - 2.3.3 Valutazione delle performance del software
 - 2.3.4 Articolo
- 2.4 Conclusioni – Discrete Event Simulation

Capitolo 3 *Agent Based Modeling*

- 3.1 Introduzione

-
- 3.2 Dual Resource Constraint System
 - 3.3 La costruzione del modello e le ipotesi
 - 3.4 Risultati
 - 3.5 Conclusioni – Agent Based Modeling

Capitolo 4 *Conclusioni*

Capitolo 1
La simulazione

1.1 Introduzione

Il termine simulazione è al giorno d'oggi un termine di uso comune. Nel fare una sintesi del significato possiamo dire che per simulazione si intende letteralmente “far apparire reale ciò che invece non lo è”. È chiaro quindi che possiamo riconoscere nella vita di tutti i giorni delle azioni o delle situazioni che nel loro svolgersi o presentarsi manifestano una simulazione. A molti è capitato di osservare una simulazione durante una partita di calcio, a molti meno è capitato di fare una simulazione di un'evacuazione di emergenza di un edificio. Tutti noi invece abbiamo simulato un colpo di tosse davanti ad un medico. Beh, in tutte queste “simulazioni” è facile identificare quale sia lo scopo dell'atto stesso: riprodurre una azione, una situazione, un sistema per valutarne gli effetti senza però assumersi le conseguenze che possono scaturire dal riprodurre il tutto realisticamente.

A questo punto, tralasciando gli aspetti quotidiani nei quali possiamo osservare tale fenomeno, è opportuno approfondire quale sia il suo ruolo in ambito scientifico. In tal campo, la simulazione rappresenta un concetto affermato da decenni e il cui termine è ormai utilizzato in molte discipline grazie anche allo sviluppo delle tecnologie IT che hanno favorito la crescente applicazione in svariati settori.

Dal punto di vista scientifico quindi, possiamo definire la simulazione come il processo di creare e sperimentare un modello matematico computerizzato che riproduce in parte o nella totalità un sistema fisico (Chung., 2003). Questa però non è la sola definizione poiché l'evolversi delle sue applicazioni sta espandendo il significato stesso del termine.

La simulazione è quindi intesa al giorno d'oggi come una modalità di analizzare un sistema per valutare le sue performance o caratteristiche al fine di intraprendere una decisione. Ed è proprio il termine “decisione” che permette di chiarire quale sia lo scopo fondamentale della simulazione e perché il suo campo di applicazione abbraccia

ormai settori scientifici molto distanti tra loro come lo sono il “manufacturing” e le scienze sociali.

Prendere una decisione è un’attività abitudinaria che nella maggior parte dei casi necessita di una grande quantità di informazioni. Chiaramente non tutte le informazioni sono disponibili né tantomeno sono conosciute. È per far fronte alla mancanza di informazioni che la simulazione viene utilizzata. Per esempio: se pensiamo ad una linea di produzione molto complessa è chiaro che non è possibile prevedere i risultati di produzione che si otterrebbero modificando il layout di produzione o le caratteristiche produttive di una macchina o il numero di risorse utilizzate. Sebbene alcune valutazioni si possono fare è sicuramente molto difficile poter tenere conto di tutte le variabili in gioco. In questo caso, la simulazione gioca un ruolo fondamentale perché permette di valutare gli effetti che l’insieme di molte variabili hanno su un sistema.

1.2 Campi di applicazione

Grazie allo sviluppo del settore information and technology nell’ultimo decennio e alla crescente “potenza” dei computer, la simulazione ha visto moltiplicare la sua presenza in decine di settori. In linea generale, possiamo raggruppare i campi di applicazione in tre diverse macro aree: manufacturing, servizi e scienze sociali ed economiche.

Il manufacturing è sicuramente il primo settore che ha visto nascere applicazioni specifiche. La crescente competitività dei mercati accentuata dalla globalizzazione degli stessi ha spinto il settore nell’accentuare il focus sulla produttività attraverso ottimizzazione dei sistemi produttivi e non solo. In quest’area, applicazioni comuni sono la simulazioni di linee produttive, sistemi di assemblaggio, lavorazioni meccaniche, handling e trasporti, sistemi di immagazzinaggio e progettazione in generale.

Il settore dei servizi ha visto crescere l’interesse nei confronti delle tecniche di simulazione dalla fine degli anni novanta con applicazioni nel settore trasporti e logistica, servizi ospedalieri, ristorazione, information technology e vendite di beni di largo consumo. Nella logistica per esempio, la simulazione viene utilizzata per ottimizzare la distribuzione dei prodotti in un’area mentre può essere impiegata nei servizi ospedalieri per verificare il livello di servizio in seguito a variazioni delle risorse (infermieri, camere, dottori) o a variazioni della domanda di servizio.

Infine negl’ultimi anni, con lo sviluppo di alcune tecniche di simulazione ad alto livello di astrazione, il settore delle scienze sociali ed economiche ha visto applicazioni

per lo studio degli sistemi economici, modelli di simulazione per lo studio dell'impatto di un nuovo prodotto, per le reti dei social network, ect...

1.3 La modellazione

Il modello è l'elemento fondamentale di una simulazione.

Il concetto di modellazione è ampio e racchiude in se diverse tipologie di modelli che vanno dal modello fisico a quello logico (nel senso di schemi di flusso, modelli mentali) , da quello matematico a quelli realizzati attraverso il "computer modeling". Questi ultimi rappresentano la tipologia di architettura di modellazione che viene utilizzata nella simulazione al computer. Nel resto della tesi faremo riferimento al termine simulazione considerando esclusivamente la sua applicazione attraverso il "computer modeling".

La figura 1 mostra come dato un problema reale, la fase di modellazione permette la creazione di un "modello del problema" caratterizzato da una complessità inferiore. Questo deriva dal fatto che il processo stesso di modellazione generalmente tende a semplificare il problema. Sarà poi compito del modellatore verificare attraverso la validazione se il modello rappresenta in maniera esaustiva, per il problema in essere, la realtà.

Dato un modello del problema, è possibile studiarne la soluzione prescindendo dai rischi che si affronterebbero se tale ricerca della soluzione avvenisse nella realtà. Infine, la soluzione nell'ambiente modellato viene poi proposta come soluzione del problema reale. È chiaro quindi che la fase maggiormente critica resta quella della modellazione poiché la semplificazione della realtà può portare ad assunzioni e ipotesi che di fatto possono compromettere la bontà della soluzione che è sia una soluzione del problema modellato ma potrebbe non esserlo, o non compiutamente, per un problema reale.

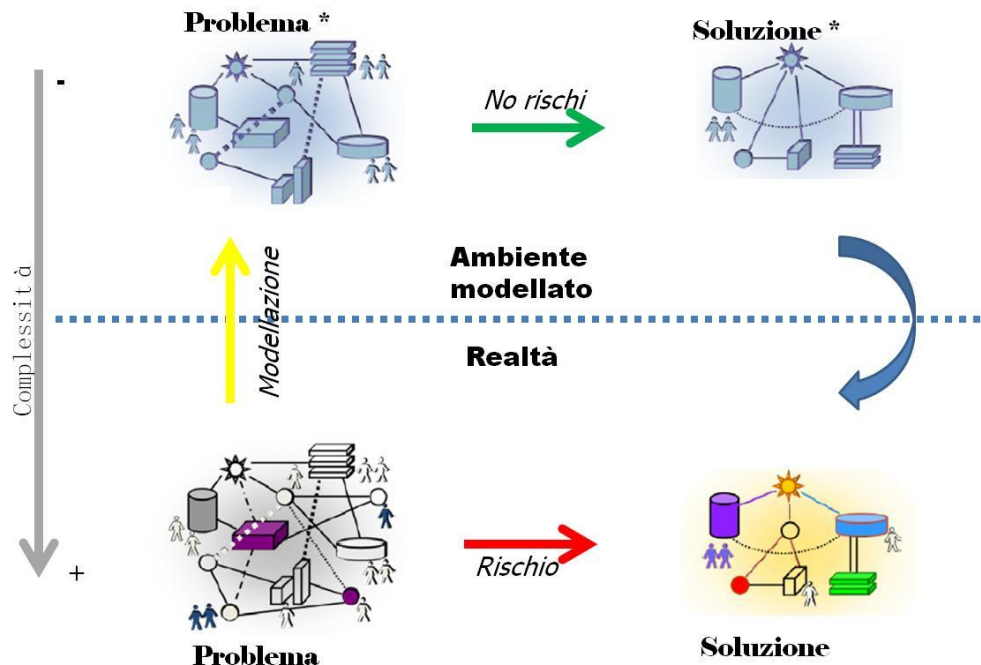


Figura 1: La modellazione

1.4 Vantaggi

Un elenco generale e non esaustivo dei vantaggi della simulazione è il seguente:

- 1) La simulazione permette di analizzare sistemi complessi e trovare soluzioni laddove altre metodologie di analisi non possono essere usate.
- 2) Basso livello di complessità analitica: rispetto ai metodi che utilizzano modelli matematici, la costruzione del modello così come la fase di simulazione non richiedono “sforzi” analitici comparabili con gli altri.
- 3) Validazione visiva e numerica: i software di simulazione in commercio rendono disponibili qualsiasi informazione su ogni “oggetto” che compone il modello e permettono di poter realizzare la simulazione in ambiente 2D/3D. Quest’ultima caratteristica, come vedremo successivamente, rappresenta un vero punto di forza della simulazione.
- 4) Tempi di simulazione ridotti: è possibile realizzare numerosi run di simulazione di un modello in una dimensione temporale accelerata. Questo oltre ad essere un vantaggio considerevole rispetto ad altri metodi che debbano essere applicati nello studio di processi che abbracciano un lasso di tempo

molto lungo, è una caratteristica fondamentale per incrementare la cosiddetta “statistical reliability” delle analisi effettuate.

1.5 Svantaggi

Sebbene la simulazione sembrerebbe essere un metodo facile da usare e pieno di caratteristiche positive, non è difficile affermare che essa presenta alcuni svantaggi che occorre prendere in considerazione nel momento in cui si decide di utilizzarla:

- 1) Complessità nella costruzione del modello di simulazione: sebbene si pensi alla simulazione come tool per la risoluzione di problemi complessi, è chiaro che la costruzione del modello di un problema complesso può rappresentare un ostacolo concreto. Difatti, se da un parte si rischia di impiegare molto tempo per la costruzione di un modello molto dettagliato (e quindi con costi elevati di applicazione del tool) dall'altra, un approccio semplificato nel model building può ignorare aspetti critici del problema e invalidare il tutto.
- 2) Qualità dei dati di input: nell'analisi di un problema attraverso la simulazione è sempre necessario inserire dati di input al modello. Ad esempio, la distribuzione dei tempi di lavorazione di una macchina, il suo valor medio, i suoi parametri statistici, ect... Quando i dati di input non sono accurati o fanno riferimento a valori storici particolari (per esempio sotto condizioni differenti rispetto a quelle modellate) si ottengono dei risultati inaspettati. In sintesi possiamo dire “garbage in, garbage out” (Chung., 2003).
- 3) Competenze specialistiche: nonostante lo sviluppo di molti pacchetti software “user-friendly” e la grafica di supporto dei recenti tools, l'applicazione della simulazione richiede competenze specialistiche che limitano l'applicazione in campo industriale (Davis & William, 1994).
- 4) Costi elevati: un altro fattore limitante è quello dei costi di investimento che possiamo distinguere in costi di licenze, costi di training e costi di applicazione. Se i primi due possono essere ritenuti esborsi una tantum, l'ultimo rappresenta il costo sostenuto in termini di risorse per l'analisi del problema da affrontare, la raccolta dati, la costruzione dei modelli, la validazione degli stessi, l'individuazione delle soluzioni, la validazione delle stesse attraverso campagne di simulazione e infine l'analisi dei risultati. Spesso questo costo può non essere giustificabile.

1.6 I tre paradigmi del computer modeling

I tre principali paradigmi in uso sono: System Dynamics, Discrete Event Modeling e Agent Based Modeling.

La scelta della tipologia di tool da utilizzare nella modellazione di un sistema dovrebbe basarsi sulla conoscenza delle caratteristiche dei tre paradigmi. In realtà, essendosi sviluppati separatamente e in ambienti di ricerca diversi, il modellatore realizza la sua scelta secondo le conoscenze proprie in uno dei tool. In fig. 2, vengono schematizzate tre possibili problemi di modellazione: un sistema caratterizzato da una sequenza ben definite di attività con chiara distinzione di entità, risorse e processi è un sistema che meglio si adatta ad essere “modellato” con il Discrete Event Simulation. In questo caso il livello di astrazione è molto basso poiché si riesce a riprodurre il sistema con un con un livello di dettaglio elevato.

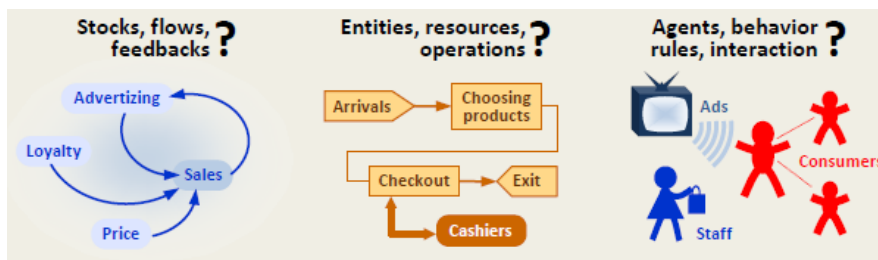


Figura 2

Quando il sistema da modellare è caratterizzato dall'interazione delle diverse entità attraverso protocolli di comunicazione differenti e non è possibile identificare uno schema logico sequenziale, l'Agent Based Modeling è sicuramente la scelta migliore. Il livello di astrazione è più elevato rispetto al DES ma è ancora possibile introdurre un livello di dettaglio medio.

Quando invece il livello di astrazione è molto alto e non è richiesto un livello di dettaglio sulle singole entità, System Dynamics è il tool più adatto poiché utilizza la rappresentazione delle entità in termini di stock e flussi.

1.7 Ultimi sviluppi

Il crescente interesse e attenzione che la ricerca pone nei confronti dell'Agent Based Modeling né fa il tool più promettente per i prossimi anni. I ricercatori sono convinti

che nei sistemi caratterizzati da entità “attive” come persone, veicoli, prodotti, ect... ABM può superare i limiti del DES in termini di una migliore capacità di riprodurre comportamenti complessi non schematizzabili a parità di complessità di modellazione. Tuttavia, poiché DES e SD restano più efficienti nei loro specifici campi di applicazione, la ricerca sta puntando sulla integrazione di due o più paradigmi in una piattaforma unica così da poter integrare i vari approcci e sfruttare le singole caratteristiche laddove meglio si adattano.

Capitolo 2
Discrete Event Simulation
La simulazione in ambiente Digital Factory

2.1 Introduzione

Il Discrete Event Simulation è un metodo di simulazione nel quale il sistema considerato viene rappresentato semplicemente attraverso una sequenza di operazioni che l'entità attraversa, per esempio durante un processo. Se modelliamo un processo produttivo, l'entità da considerarsi è il prodotto e il modello si struttura attraverso la realizzazione di una rappresentazione logica a blocchi dove ciascun blocco logico ha la funzione di riprodurre una parte del processo produttivo: una stazione di lavoro, un punto di stoccaggio, una coda.

Alcuni software di simulazione DES presenti sul mercato, oltre a fornire tutte le funzioni logiche per la modellazione di un processo produttivo, offrono un'interfaccia grafica 3D per lo sviluppo del modello in ambiente Digital Factory.

Nel corso del capitolo vengono descritte le attività svolte per la realizzazione due articoli:

- A Digital Factory approach to identify losses of efficiency of flow shop production lines

Autori: A. Lambiase, M. Sammarco, M. Treves

CIRP ICME '10 – 7th CIRP International conference on Intelligent Computation in Manufacturing engineering – Innovative and Cognitive Production Technology and System 23-25 June 2010 – Capri – Italy

- A Novel Approach for Development of Discrete Event Simulation Models –
Autori: A. Lambiase, F. Palumbo, M. Sammarco,

CIRP ICME '10 – 7th CIRP International conference on Intelligent Computation in Manufacturing engineering – Innovative and Cognitive Production Technology and System 23-25 June 2010 – Capri – Italy

Nel primo, viene descritta l'applicazione della simulazione DES attraverso la DF per lo studio e l'ottimizzazione in termini di layout e risorse di una cartotecnica industriale del territorio salernitano. Nel secondo articolo, vengono analizzate i punti deboli della modellazione DES attraverso la DF e viene proposta un'architettura software che interagisce con il software di simulazione attraverso linguaggio BLC e SCL sia per facilitare l'interazione tra un utente non esperto e il software sia per velocizzare la costruzione dei modelli.

2.2 Il caso Confalone

Il primo articolo tratta lo studio di una cartotecnica come sistema di produzione composta da 2 linee di produzione di tovaglioli e una linea di produzione rotoli. Ogni volta che si realizza uno studio di simulazione di un sistema reale (qualsiasi approccio venga utilizzato) ci sono delle step che devono essere seguiti:

- 1) Acquisizione dati
- 2) Modellazione del sistema
- 3) Validazione del sistema
- 4) Modellazione di soluzioni migliorative
- 5) Analisi dei risultati

Sia l'acquisizione dei dati che le fasi di modellazione possono poi essere interessate da maggiore o minor complessità a seconda dell'approccio utilizzato.

Nel caso specifico dello studio di ottimizzazione della cartotecnica, il modello di simulazione DES in ambiente Digital Factory sottintende una fase di acquisizione dati che riguarda sia il processo (tempi ciclo delle macchine, tempi di cambio formato, tipologia di prodotti e schedulazione, tassi di guasto e più in generale dati storici di produzione) sia una raccolta dati delle caratteristiche dimensionali di tutte le macchine per poter poi realizzare un modello 3D con caratteristiche pressoché uguali al layout reale del sito di produzione.

2.2.1 Acquisizione dati

L'acquisizione dei dati ha riguardato tutte le informazioni necessarie allo sviluppo di un modello per l'ottimizzazione del layout e delle risorse del sito produttivo tralasciando l'area di stoccaggio. Questa fase si distingue in

- informazioni di base
- informazioni sui prodotti processi e risorse
- dati di produzione
- misure e rilievi dei macchinari e dei prodotti

Informazioni di base

I primi dati raccolti riguardano le informazioni di carattere generale sul sito produttivo: tipologia di prodotto e aree di produzione, struttura organizzativa in termini di orari di produzione e manodopera.

In particolare, nel sito vengono realizzate due famiglie di prodotti: rotoli e tovaglioli. L'area produttiva è divisa in due locali separati. In uno di questi viene realizzata la produzione dei rotoli grazie ad una linea di packaging, nell'altro sono presenti due linee per la produzione di tovaglioli.

La produzione viene svolta su tre turni dal lunedì a venerdì.

Informazioni sui prodotti, processi e risorse

Le informazioni riguardanti i prodotti hanno l'utilità di caratterizzare le differenze produttive degli stessi; relativamente ai rotoli si individuano due famiglie di prodotti: i rotoli di carta igienica e i rotoli di asciugatutto.

Di seguito si riporta una tabella che individua le differenze di dimensioni e peso dei rotoli:

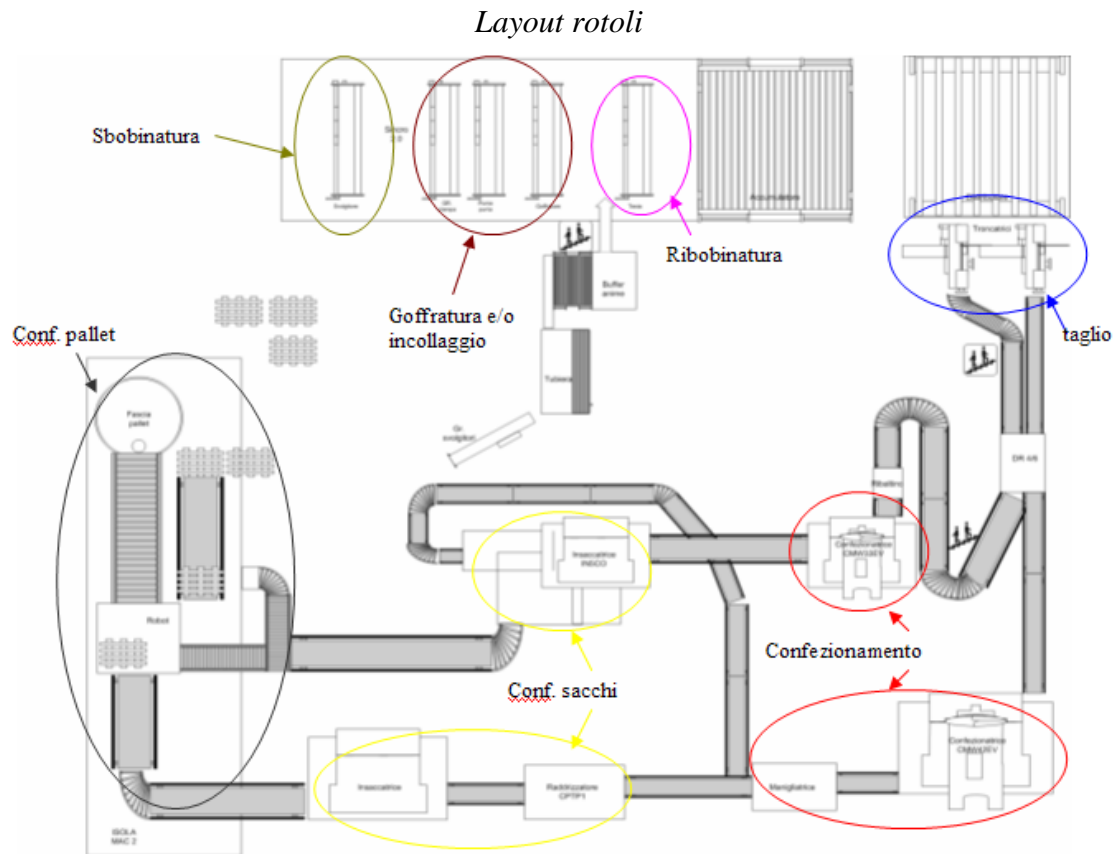
17 formati rotoli (12 carta igienica + 5 rotoli ascia tutto)

11 formati tovaglioli

Il processo di produzione è lo stesso per tutti i prodotti::

- sbobinatura: la bobina viene svolta per poter essere lavorata
- goffratura e incollaggio: la carta può subire sia un goffraggio che l'incollaggio dei veli
- ribobinatura o piegatura: per i rotoli si ha la ribobinatura per creare un nuovo rotolo ma di diametri inferiori, per i tovaglioli si ha la piegatura del velo di carta
- taglio: questa fase permette di ottenere le dimensioni desiderate per i prodotti

- confezionamento: questo processo serve per ottenere dapprima la confezione e poi il pallet

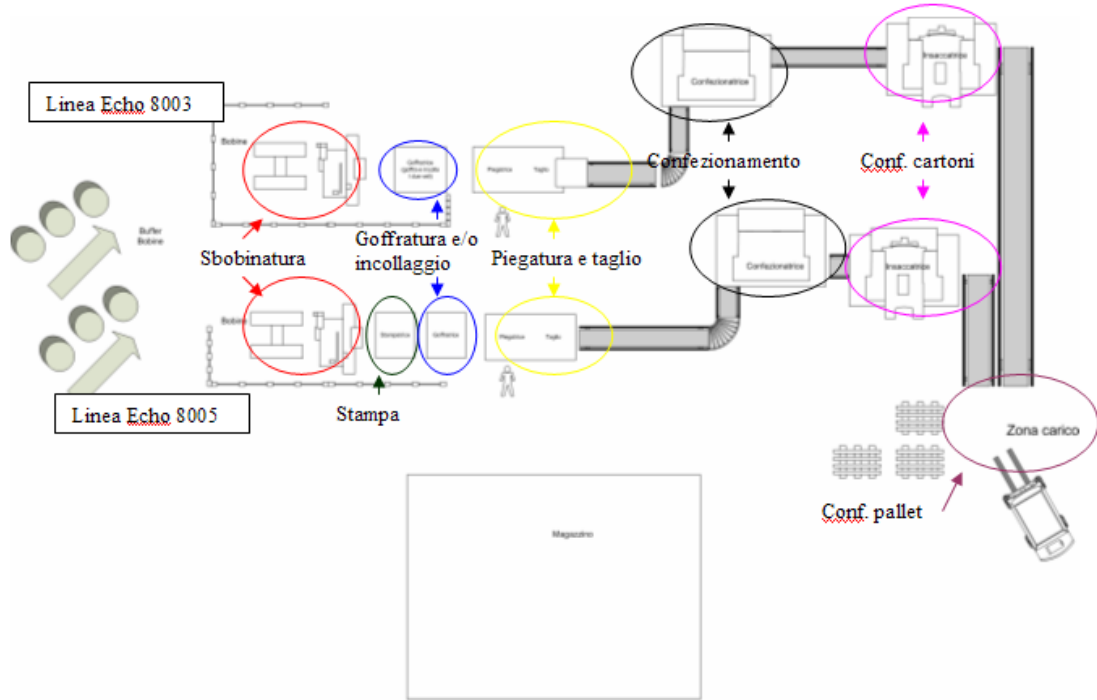


Di seguito riportiamo un elenco delle risorse e dell'operazione che svolgono:

Reparto rotoli		
Risorse		Descrizione operazione
Sincro 4.0	Sbobinatrice	Svolge la bobina di carta
	Goffratore	Goffra la carta
	Incollatore	Incolla i due veli
	Gruppo stampa	Stampa sulla carta
	Ribobinatrice	Realizza i rotoli di un dato diametro
	Accumulatore	Buffer
Distributore		Distribuisce i rotoli alle troncatrici
Troncatrici		Taglia i rotoli di una altezza data
Gruppo svolgi tori		Svolge le bobine di cartone
Tubiera		Realizza le anime di cartone
Buffer anime		Immagazzina le anime di cartone
Ribaltino		Riposiziona i rotoli
Confezionatrice CMW33EV		Crea una confezione
Confezionatrice CMW42EV		Crea una confezione
Manigliatrice		Applica la maniglia alle confezioni
Insaccatrice INC50		Realizza un sacco contenente confezioni
Raddrizzatrice		Riposiziona le confezioni
Insaccatrice		Realizza un sacco contenente confezioni
Isola Mac 2	Robot	Posiziona i sacchi e le pedane
	Fascia pallet	Imballa e realizza il pallet

La manodopera presente sulla linea rotoli si compone di 3 operatori e un assistente di produzione.

Layout tovaglioli



Di seguito si riporta un elenco delle risorse e dell'operazione che svolgono:

Reparto tovaglioli				
Linea Echo 8003		Linea Echo 8005		Descrizione operazione
Sbobinatrice		Sbobinatrice		Svolge la bobina
		Gruppo stampa		Stampa sulla carta
Gruppo incollatore Goffratore		Goffratore		Incolla due veli e/o goffra
Echo 8003	Piegatrice	Echo 8005	Piegatrice	Piega il tovagliolo
	Troncatrice		Troncatrice	Taglia il tovagliolo
Transfert		Transfert		Conta e trasferisce il blocco di tovaglioli
Confezionatrice G&P		Confezionatrice		Realizza una confezione
Incartonatrice		Incartonatrice		Realizza una confezione di cartone
Fascia pallet		Fascia pallet		Realizza un pallet

Sulle linee di produzione dei tovaglioli sono presenti 2 operatori e un assistente di produzione nel reparto tovaglioli.

Inoltre ci sono tre operatori per la movimentazione delle materie prime e prodotti finiti che realizzano l'approvvigionamento e lo scarico per tutte le linee di produzione.

Dati di produzione

I dati di produzione raccolti sono stati i seguenti:

- tempi ciclo
- tempi di setup (changeover)
- tempi di approvvigionamento
- tempi di guasto
- TRS tasso di rendimento sintetico
- difettosità
- piano di produzione

Non tutti i dati necessari per ottenere un quadro completo sono stati disponibili poiché non esisteva un sistema di acquisizione dei dati né tantomeno un sistema di registrazione (per esempio dei guasti).

Per questo motivo, tempi ciclo si fa riferimento ai tempi ciclo teorici e la determinazione dei tempi ciclo delle varie macchine segue la procedura descritta di seguito:

la produzione stessa di un determinato prodotto impone dei vincoli produttivi alle macchine così come le macchine impongono dei vincoli all'intera linea di produzione.

Prendendo in considerazione il prodotto Vit 4, la macchina collo di bottiglia è la Sincro e in particolare la ribobinatrice che ha una velocità massima di 450 m/min. A partire da questo vincolo, considerando che il prodotto Vit 4 è costituito da 34.56 metri di carta, si ottiene un numero di log (rotolo lungo) al minuto pari a 13,02 . Tale valore non rappresenta un limite per la Sincro 4.0 poiché il posizionatore e l'incollatore finale riescono a realizzare fino a 20 log /min. Se invece la produzione di 13,02 log /min fosse stata maggiore della produzione massima consentita, allora occorre prendere come valore di produzione il valore massimo consentito e attraverso una procedura botton-up si sarebbero modificate le impostazioni delle risorse a monte in modo opportuno. Dopodiché sapendo che un log è pari a 27 rotoli e una confezione è costituita da 4 rotoli si ottiene una produzione di 88 confezioni/min. Anche in questo caso, come nei prossimi, occorre verificare se il vincolo produttivo è maggiore della produzione. Sapendo che un sacco è formato da 15 confezioni si ha una produzione di 5,86 sacchi/min. Infine sapendo che un pallet è formato da 24 sacchi, otterremo una produzione di 14.65 pallet/ora.

Per quanto riguarda i tempi di changeover/setup e di guasto, non esiste un registro e quindi si è proceduto con tempi standard per i cambi formato e con una rilevazione sul campo per i guasti attraverso una scheda di registrazione come in figura 3.

Per i tempi di guasto, il TRS ovvero tasso di rendimento sintetico e il piano di produzione si è fatto riferimento al riepilogo giornaliero produzioni riportato in seguito.

RIEPILOGO GIORNALIERO PRODUZIONI		
SINCRO 4.0	PRODOTTI: VITICOLA 4 -	
PRODOTTO	SACCHI	ANOMALIE
1° TURNO		
VITICOLA	1110 cl.	AVVIO OP. OP. 06:30 x PULIZIA - PROBLEMI AVVIAZIONE
	cl.	AVVIAZIONE FERMA / 450
	cl.	FERMO SINCRO N. 1 PROBLEMI ALIQUOTI CANTIERI PP.
	cl.	
	%	
2° TURNO		
VITICOLA	1840 cl.	CONTINUAZIONE VENDITA MOTO DI P. BODINATI SUI P. S.
	cl.	
	cl.	
	cl.	
	%	
3° TURNO		
VITICOLA	1140 cl.	PROBLEMI INIPIETOSI PERDITE DI TEMPO x INCONTABILITÀ COSTO
	cl.	INCONTABILITÀ
	cl.	
	cl.	

Figura 3

I dati ricavati dalle rivelazioni sono i seguenti:

Reparto rotoli

- Perdite per guasti:
 dati T_f (tempi di fermo per guasti)=4110', T_t (tempo teorico di produzione)=48960' si ottiene:

$\% \text{guasti} = T_f / T_t = 8,4\%$

- Perdite per setup e avviamenti:
 dati $T_s = 1655'$, $T_t = 48960'$ si ottiene:

$\% \text{setup} = T_s / T_t = 3,4\%$

- Tasso di guasto delle singole macchine:

considerando i tempi di fermo per guasto delle singole macchine, rapportandole al tempo teorico di produzione delle singole macchine, si ottiene:

	Ore di produzione	Minuti_guasto	Tasso di guasto
Sincro	816	1000	2,04%
Accumulatore	816	80	0,16%
Distributore	816	60	0,12%
Troncatrici	816	195	0,40%
CMW33EV conf	125,83	550	7,28%
CMW42EV conf	690,17	605	1,46%
Insaccatr IN5C0	276,33	525	3,17%
RaddrCPTV1_insacatrice	474,15	135	0,47%
Isola MAC	816	120	0,25%
Tubiera	816	290	0,59%

Si nota come quattro macchine hanno un tasso di guasto elevato rispetto alle altre macchine. Questo in prima analisi permette di attribuire a quest'ultime una perdita di tempo di produzione pari a %guasti. Inoltre si nota che %guasti incide più del doppio rispetto a %setup.

Reparto tovaglioli

Linea Echo 8003

- Perdite per guasti:
dati Tf(tempo di fermo per guasti)=2110', Tt(tempo teorico di produzione)=48960' si ottiene:

$$\% \text{ guasti} = \text{Tf}/\text{Tt} = 4,3\%$$

- Perdite per setup e avviamenti:
dati Ts=2360', Tt=48960' si ottiene:

$$\% \text{ setup} = \text{Ts}/\text{Tt} = 4.8\%$$

Linea Echo 8005

- Perdite per guasti:
dati Tf (tempi di fermo per guasti)=285', Tt (tempo teorico di produzione)=48960' si ottiene:

$$\% \text{ guasti} = \text{Tf}/\text{Tt} = 0.6\%$$

- Perdite per setup e avviamenti:
dati Ts=1440', Tt=48960' si ottiene:

$$\% \text{ setup} = \text{Ts}/\text{Tt} = 2.9\%$$

Si nota subito che la linea Echo 8003 è interessata da più fermi sia per guasti che per setup. Questo evidentemente suggerisce che esiste una relazione tra i setup e i guasti. In particolare, analizzando il piano produttivo si nota che sulla linea Echo 8003 sono stati effettuati, nell'arco temporale preso, molti setup rispetto alla linea Echo 8005. Poiché i setup comportano degli aggiustaggi meccanici delle macchine, è evidente che comportano un deterioramento prestazionale delle risorse con frequenti fermi per rotture meccaniche. Al contrario pochi setup permettono di ottimizzare il funzionamento della macchina con una diminuzione dei fermi per guasto.

Infine, come per le macchine del reparto rotoli, riportiamo di seguito il tasso di guasto per le singole macchine delle due linee dei tovaglioli:

Linea 8003	Ore di produzione	Minuti_guasto	Tasso di guasto
Sbobinatrice	816	0	0,00%
Gruppo punta punta	816	0	0,00%
Piegatrice/Troncatrice Echo 8003	816	1020	2,08%
Transfert	816	60	0,12%
Confezionatrice G&P	816	900	1,83%
Incartonatrice	816	210	0,43%
Conf. Pallet	816	0	0,00%

Linea 8005	Ore di produzione	Minuti_guasto	Tasso di guasto
Sbobinatrice	816	0	0,00%
Goffratore	816	0	0,00%
Piegatrice/Troncatrice Echo 8005	816	30	0,06%
Transfert	816	120	0,24%
Confezionatrice	816	50	0,10%
Incartonatrice	816	30	0,06%
Conf. Pallet	816	0	0,00%

Circa la difettosità, non avendo la possibilità di rilevare per ogni singola macchina e per ogni singolo prodotto, il numero di difettosi, si è stimato il suo valore grazie al rapporto tra la materia prima da riciclare e quella in ingresso. La difettosità risulta essere del 3%.

La successiva fase di acquisizione dati è funzionale alla definizione del layout attraverso la schematizzazione del processo e la creazione dei modelli 3D della linee. Nelle seguenti figure viene schematizzato il flusso logico della linea rotoli e della linea tovaglioli.

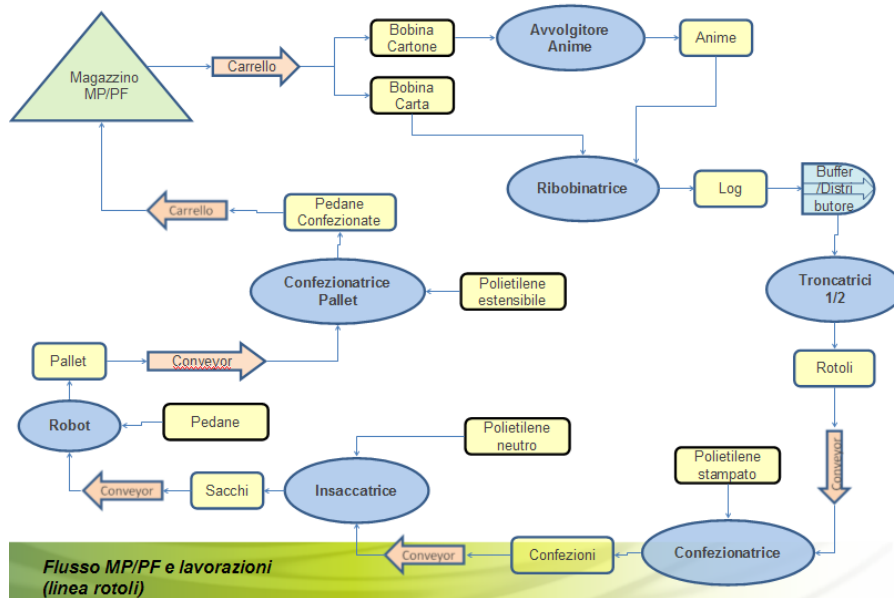


Figura 4

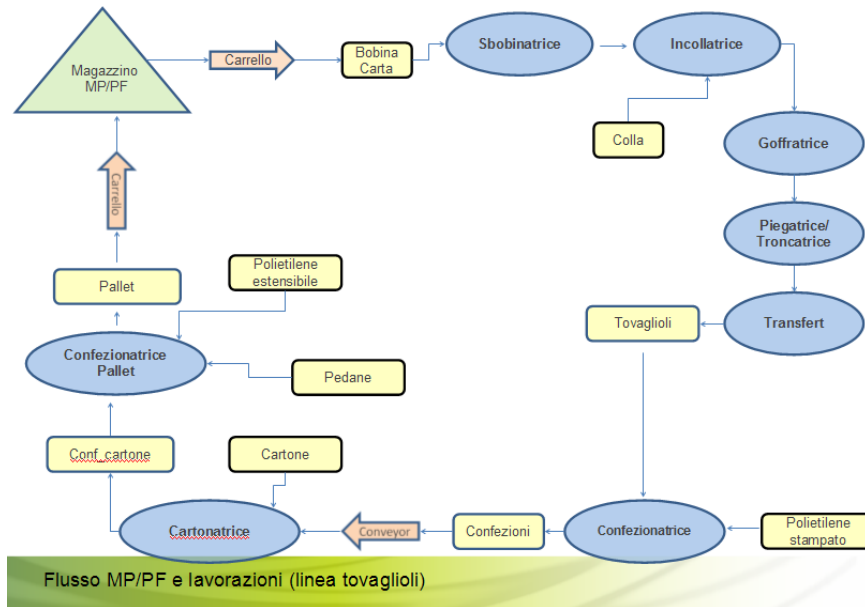


Figura 5

Per la rappresentazione dei macchinari si realizza utilizzando un software CAD che permette, attraverso l'utilizzo di schizzi, estrusioni e rotazioni di visualizzare in un ambiente 3D ogni oggetto dell'impianto.

Il modello 3D delle linee di produzione dei tovaglioli si presenta come nelle figure successive:

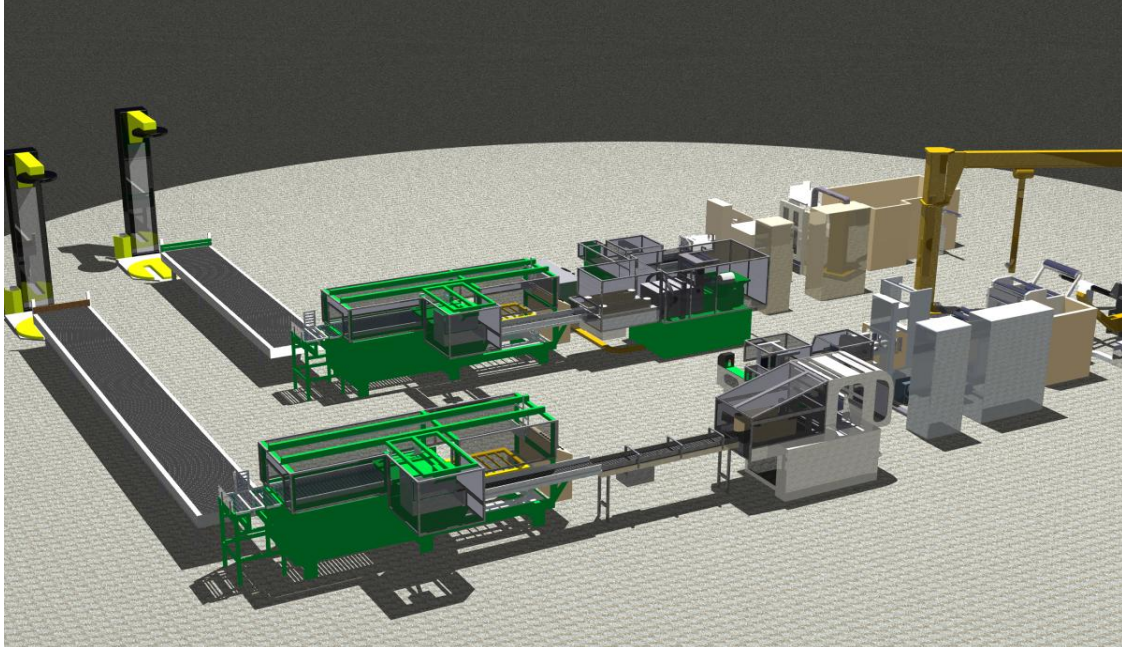


Figura 6

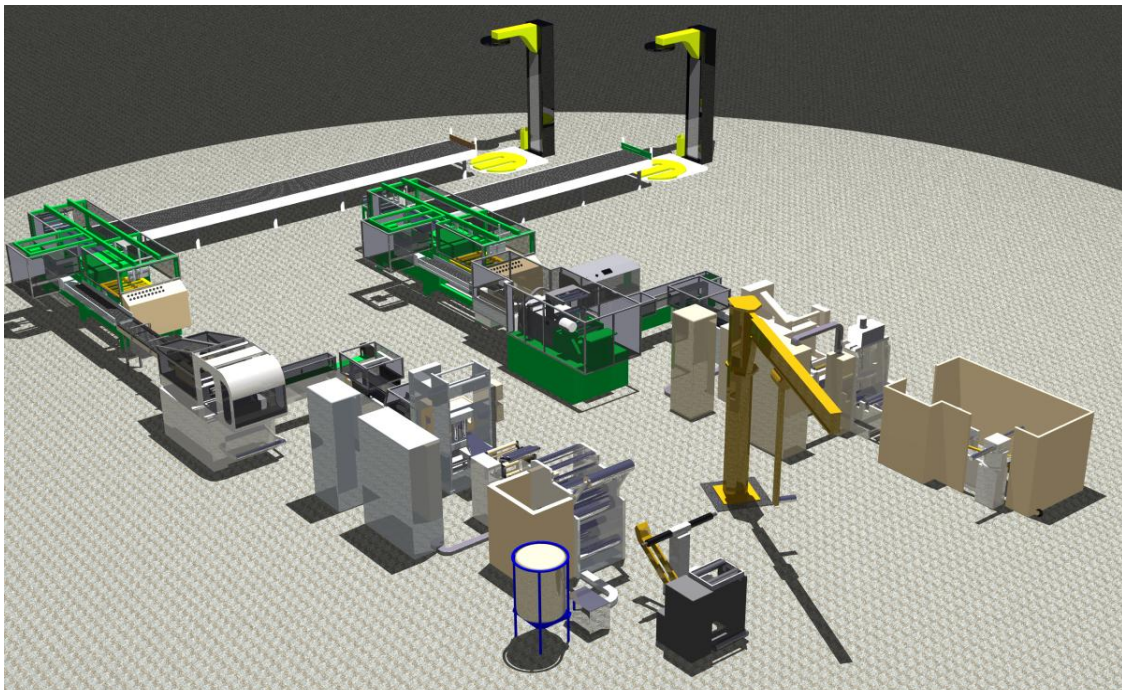


Figura 7

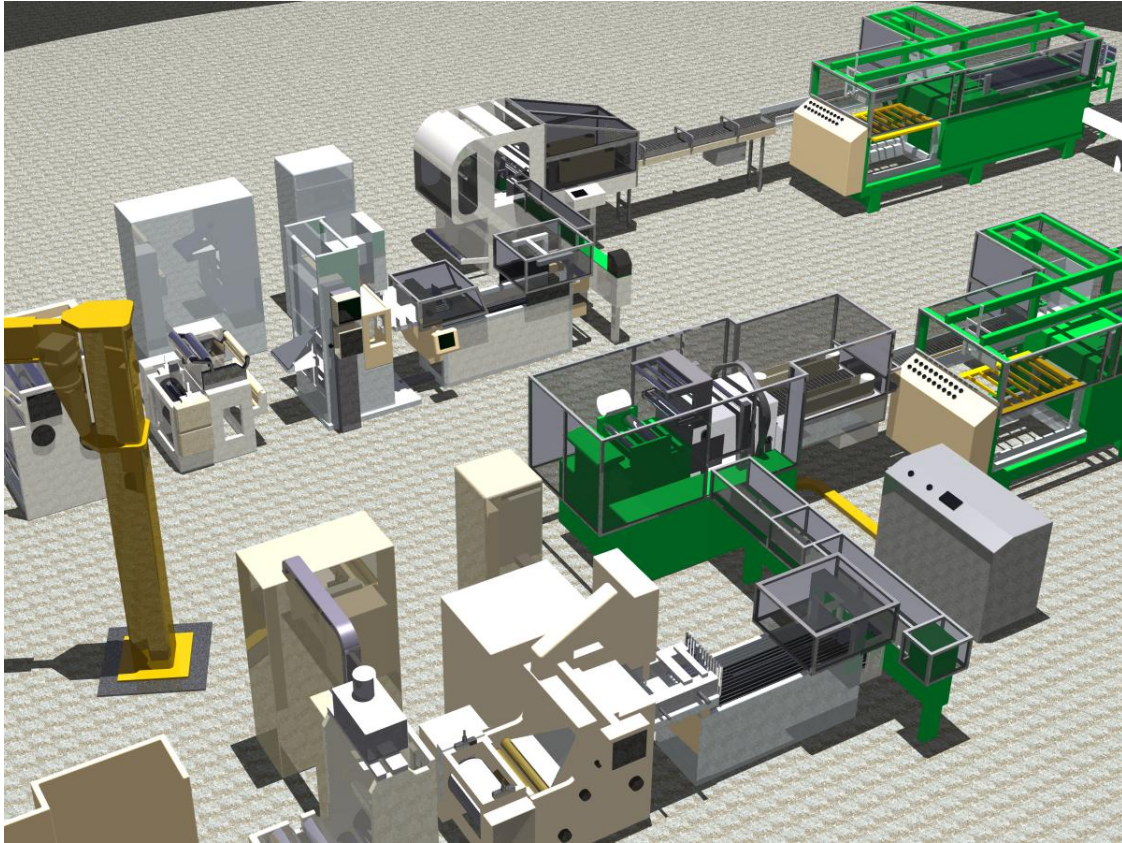


Figura 8

Il modello 3D della linea di produzione dei rotoli si presenta come nelle figura successive:

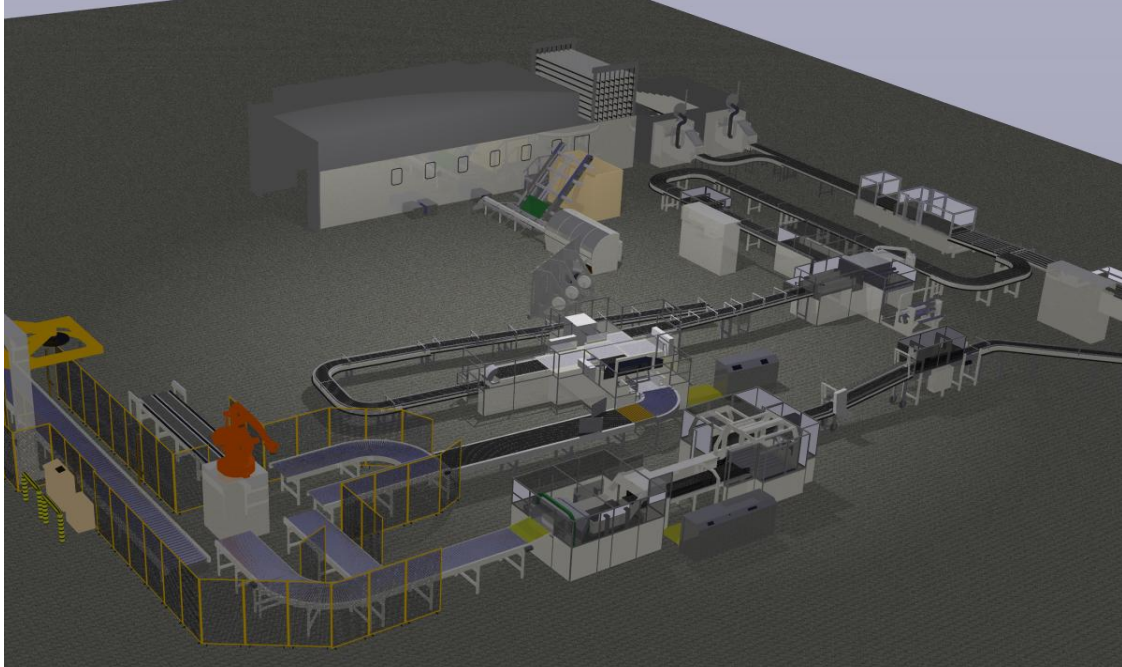


Figura 9



Figura 10

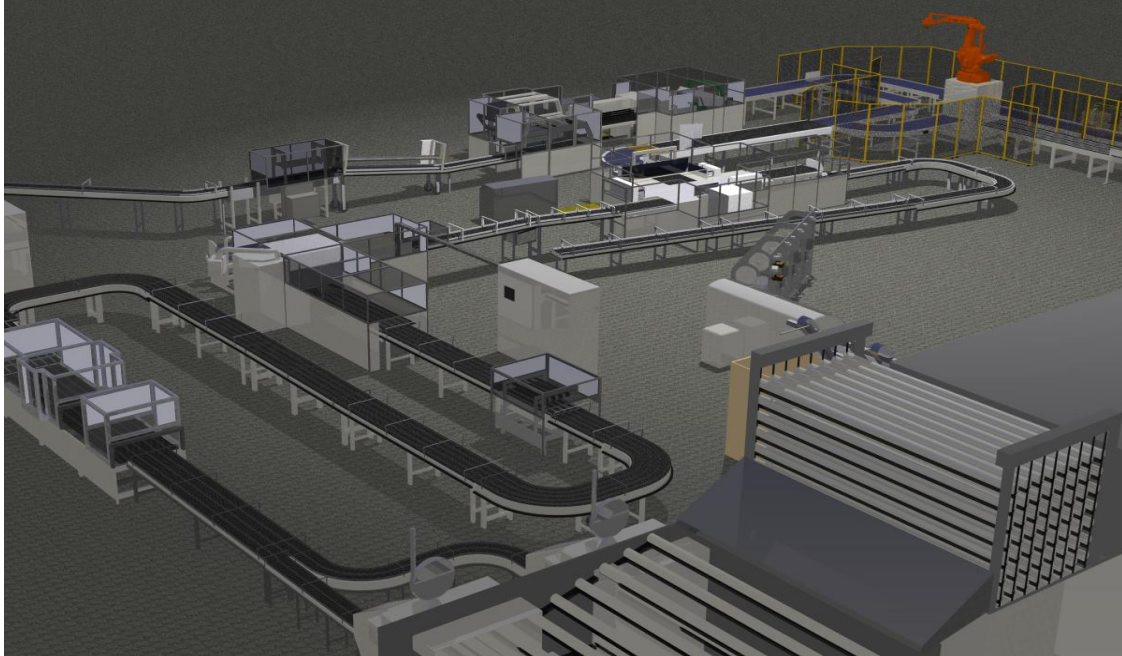


Figura 11

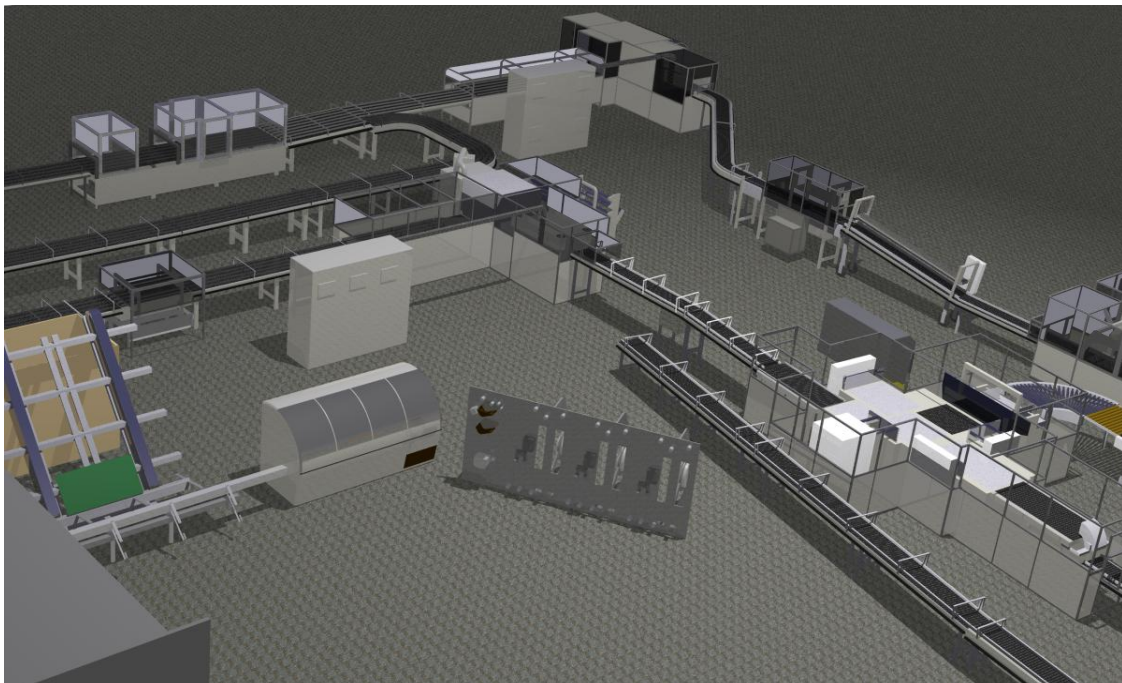


Figura 12

2.2.2 Modellazione del sistema con QUEST DELMIA

Realizzata la fase di acquisizione dati e costruzione dei modelli 3D delle macchine, si è utilizzato un programma di simulazione DES: QUEST Delmia.

Questo programma è un simulatore ad eventi discreti che consente l'analisi, la modellazione e la simulazione di sistemi produttivi.

Un modello QUEST è costituito da due tipi di oggetti fondamentali gli elementi e le parti: mentre ai primi è possibile associare logiche specifiche, le parti possono essere caratterizzate solo da attributi. Le connessioni infine rappresentano il legame logico e forniscono il meccanismo necessario per muovere le parti da un elemento ad un altro.

I principali elementi standard definiti dal software sono

- creazione/distruzione di parti: tali elementi sono rappresentati dai sources, utilizzati per la creazione e l'immissione delle parti nel modello, e dai sink, utilizzati per la fuoriuscita delle parti dal modello
- accumulo di parti: buffer
- processamento di parti: machines
- sistemi di movimentazione di materiale: conveyor, agv, labour.
- altri elementi: decision points, accessories, labor system, ecc...

Il software fornisce anche dei processi standard:

- setup process: definisce il processo di riattrezzaggio della macchina tra una operazione e quella successiva
- load process: definisce il processo di carico di ciascuna parte all'interno dell'elemento per il processamento
- unload process: definisce il processo di scarico delle parti da un elemento dopo la lavorazione
- cycle process: definisce il processo di lavorazione delle parti eseguito sulle macchine ed è definito attraverso un cycle time e i requisiti in termini di parti e risorse
- repair process: definisce il processo che determina i requisiti e il tempo richiesto per la riparazione di un elemento a seguito di un guasto

Infine, il software permette di definire eventi come failure e di impostare layout/percorsi specifici per AGV e labour.

Di seguito si descrive i passi da completare per la definizione di alcuni elementi che sono stati utilizzati nel modello. Tale descrizione servirà poi ad evidenziare alcune caratteristiche di questo tipo di simulazione.

Implementazione del modello

In questa fase occorre decidere la rappresentazione in termini di elementi e parti di tutto quello che occorre per riprodurre il sistema.

Facendo riferimento alla linea 8003 rotoli, si descrive il processo di costruzione della stazione produttiva sbobinatura, incollaggio/goffratura, piegatura/taglio e transfert per la quale si utilizza l'elemento machine che è selezionabile attraverso Model→Build→Element→Machine. Nella dialog box, che il programma fornisce, fig. A, inseriamo il nome della macchina 'Svolg_transfert', il numero di istanze per l'elemento pari a 1, la logica di ingresso e uscita 'Push', e il numero di processi che caratterizzano la macchina pari a 1. Di seguito selezionando Cycle Process→New compare una dialog box, fig. B, per definire tutti i parametri del processo che in questo caso chiameremo 'sbobin_tov_vit_mix'. I parametri richiesti sono 'Parts' ovvero le parti in ingresso, 'Labor' ovvero la presenza dell'operatore, 'Cycle time' ovvero il tempo ciclo e 'Products' ovvero i prodotti della lavorazione. Per poter settare questi parametri occorre fare una ipotesi: ingresso abbiamo una bobina con certe caratteristiche, e in uscita abbiamo dei plichi di tovaglioli; partizionando la bobina possiamo dire che ogni plico è prodotto da una 'frazione' di bobina. In questo modo possiamo dire al processo che la parte in ingresso è rappresentata da una frazione di bobina e che il prodotto ottenuto è un plico di tovaglioli.

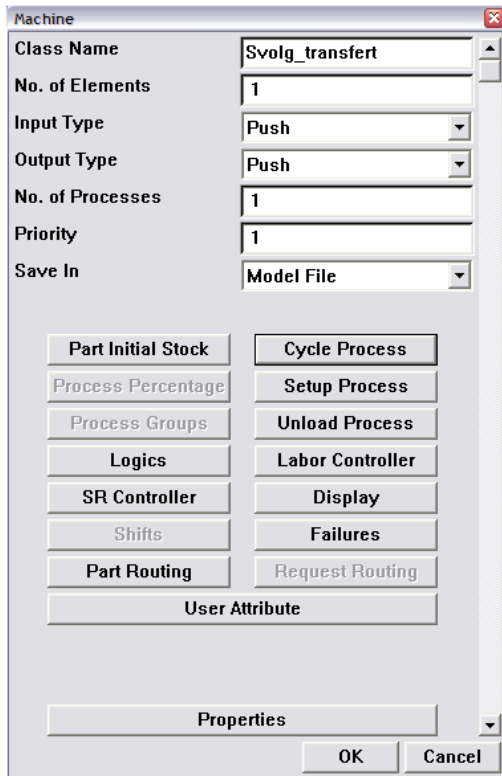


Fig. A

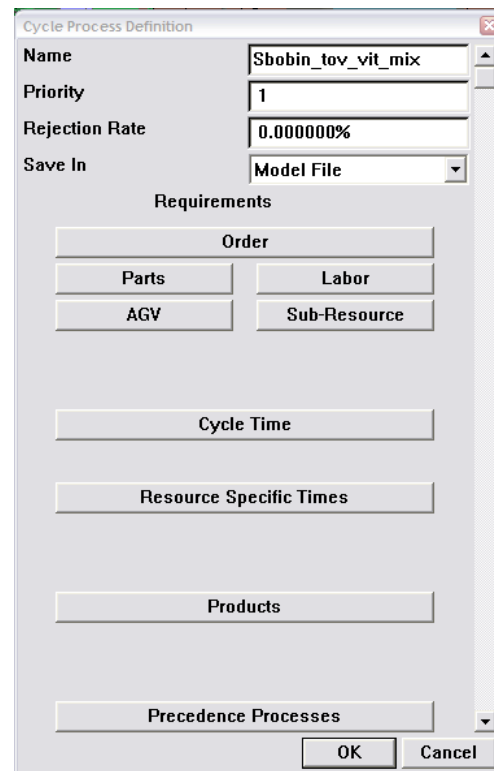


Fig.B

Prima di poter settare la dialog box 'Cycle Process Definition' dobbiamo definire le parti, vedi fig.C, selezionando Model→Build→Part Class→Create/Modify→New. Definiamo il nome e selezionando Display possiamo associare alla parte una rappresentazione grafica 3D presente nelle librerie di default o caricata dall'utente. Dopo aver fatto questo possiamo settare Parts e Products nella dialog box del Cycle process indicando in Cycle time lo stesso tempo ciclo della confezionatrice a valle, per i motivi già detti precedentemente. A questo punto occorre definire un generatore di parti che si occuperà di fornire le frazioni di bobine alla machine. Per fare questo selezioniamo Model→Build→Element→Source e indichiamo in Class Name 'Gen_bob' e in Part Creation Mode 'Passive', vedi fig.D. Tra il generatore di parti e la machine inseriamo un buffer selezionando Model→Build→Element→Buffer, vedi fig.E. Settiamo il buffer indicando Input Type 'Pull', Output Type 'Push' e in Thresholds indichiamo il livello minimo e massimo di bobine presenti pari a 1. Di seguito colleghiamo gli elementi Gen_bob, Buffer1 e Svolg_transfert con le connessioni push selezionabili attraverso Model→Build→Connections→Element. Poi connettiamo il buffer con il generatore attraverso una connessione pull. Quello che

accade nella logica del programma è molto semplice: se una frazione di bobina è in lavorazione, ci sarà una sola frazione di bobina nel buffer e il generatore non produrrà nessuna parte; quando sulla macchina viene a mancare la parte in ingresso, istantaneamente viene richiamata una parte dal buffer, il quale invia una richiesta al generatore che istantaneamente produce una nuova frazione di bobina affinché la 'soglia' del buffer sia quella settata in thresholds. L'utilità di settare il buffer nella maniera *input type 'pull'* è proprio quella di permettere al buffer di inviare richieste a monte.

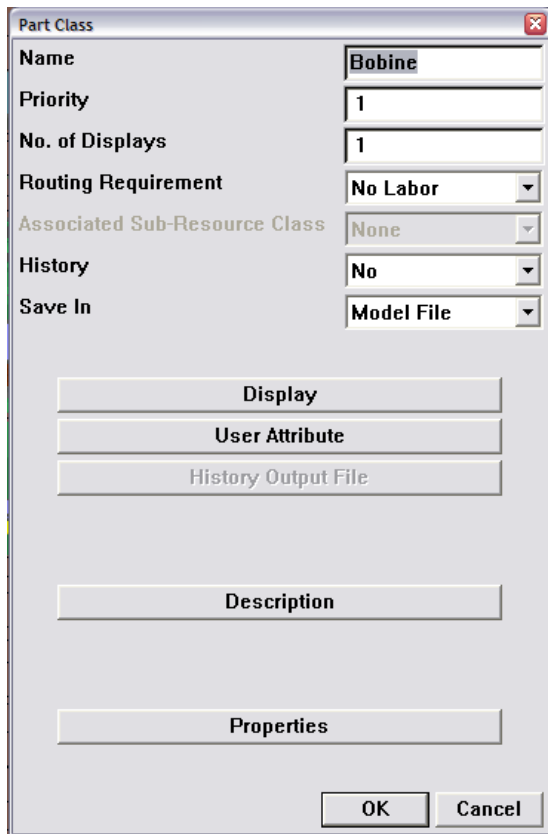


Fig.C

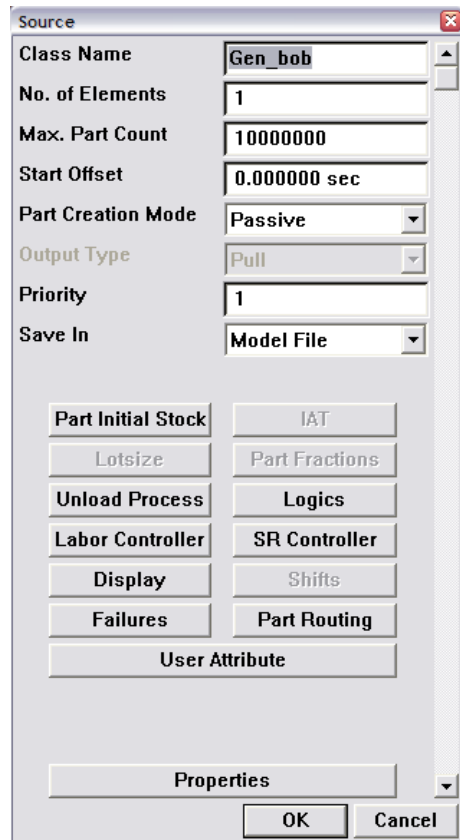


Fig.D

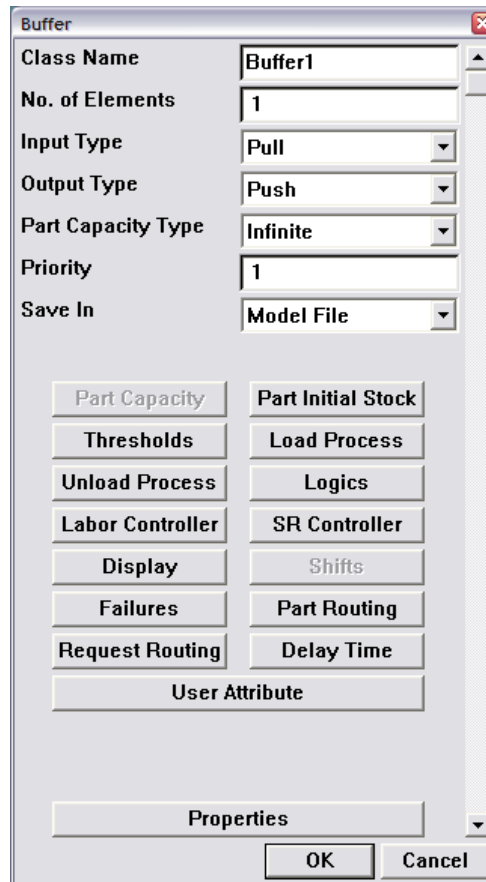


Fig.E

Quando invece si deve un processo di movimentazione come per esempio quella della confezione di tovaglioli occorre selezionare Model→Build→Element Class→Conveyor, vedi fig.G e fig. H. Selezionando conveyor info possiamo settare il tipo di convogliatore che nel caso in esame è accumulativo e indicare la velocità di movimentazione. Selezionando invece Part Capacity indichiamo il numero massimo di confezioni contenute.

Conveyor

Class Name: Conv_conf_incart

No. of Elements: 1

Input Type: Push

Output Type: Push

Part Capacity Type: Number

Priority: 1

Save In: Model File

Part Capacity | Conveyor Info

Load Process | Unload Process

Logics | Labor Controller

SR Controller | Display

Shifts | Failures

Part Routing | Request Routing

User Attribute

Properties

OK | Cancel

Fig.G

Conveyor Info

Conveyor Type: Accumulating

Stop At Load: No

Stop At Unload: No

Moving Space: 0.000000 cm

Stopping Space: 0.000000 cm

Speed: 60.0000 cm/sec

Part Orientation

OK | Cancel

Fig.H

Infine per modellare l'operatore si seleziona Model→MHS→Controller→Labor. Per inserire l'operatore vero e proprio selezioniamo Model→MHS→MHSElement→Labor e settiamo la dialog box che appare come in fig. L.

La velocità è stata ipotizzata pari a 115cm/s e il load process pari a 1s.

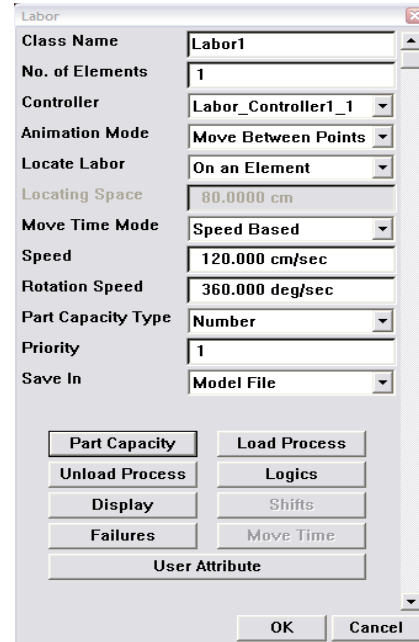


Fig. L

La conclusione del processo di costruzione del modello seguendo lo stesso tipo di procedura per le altre macchine, buffer, conveyor e labour.

Il modello di presenta come in figura M1, M2 e M3

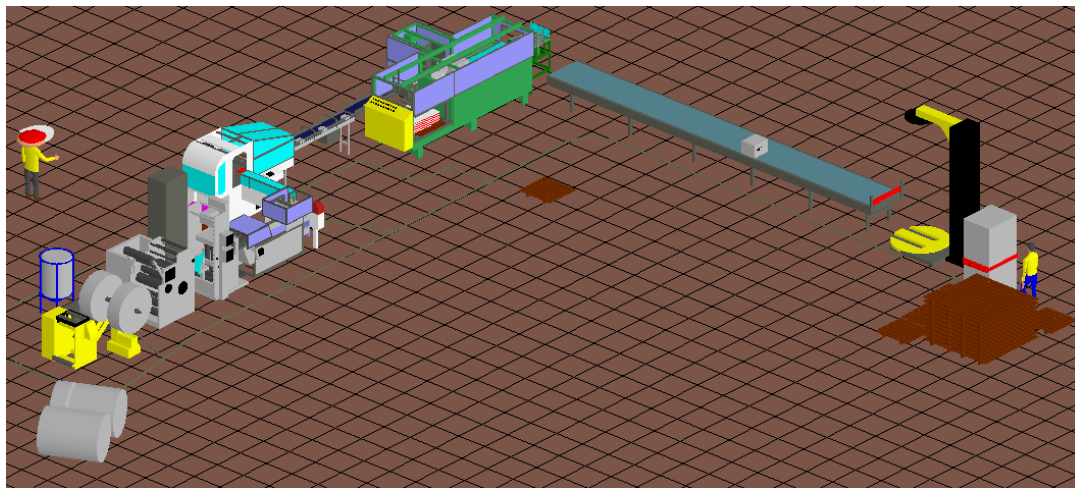


Fig. M1

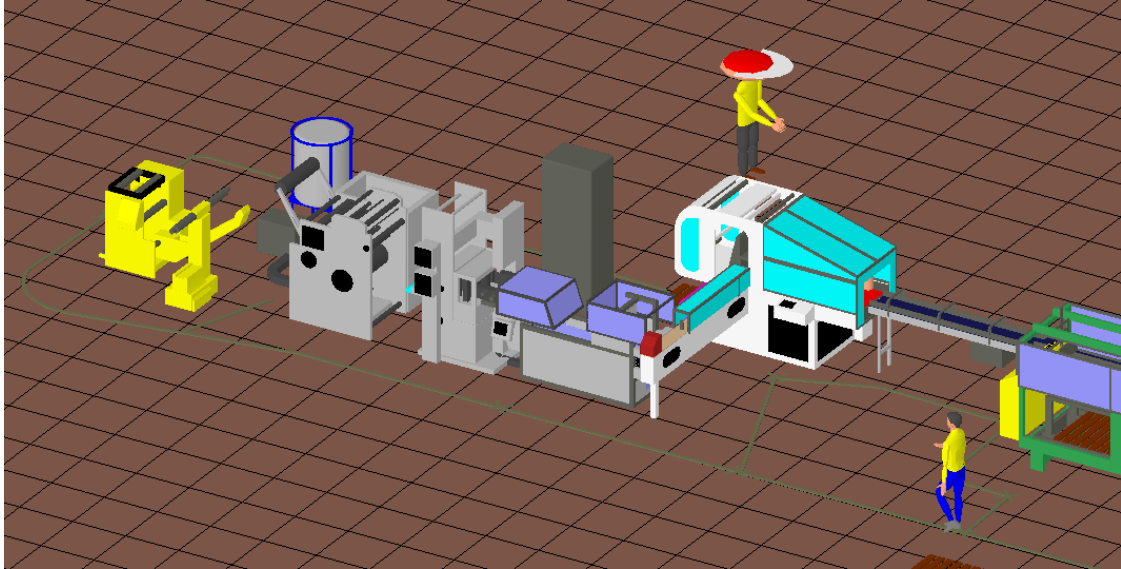


Fig.M2

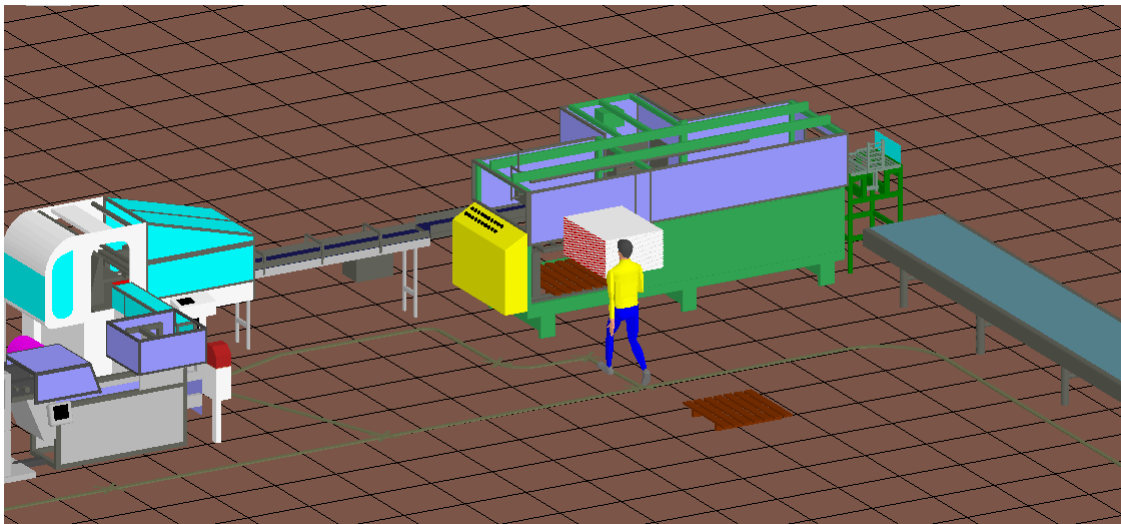


Fig. M3

Infine replicandola costruzione per l'altra linea di ottenere il modello completo come in figura N1,N2,N3,N4.

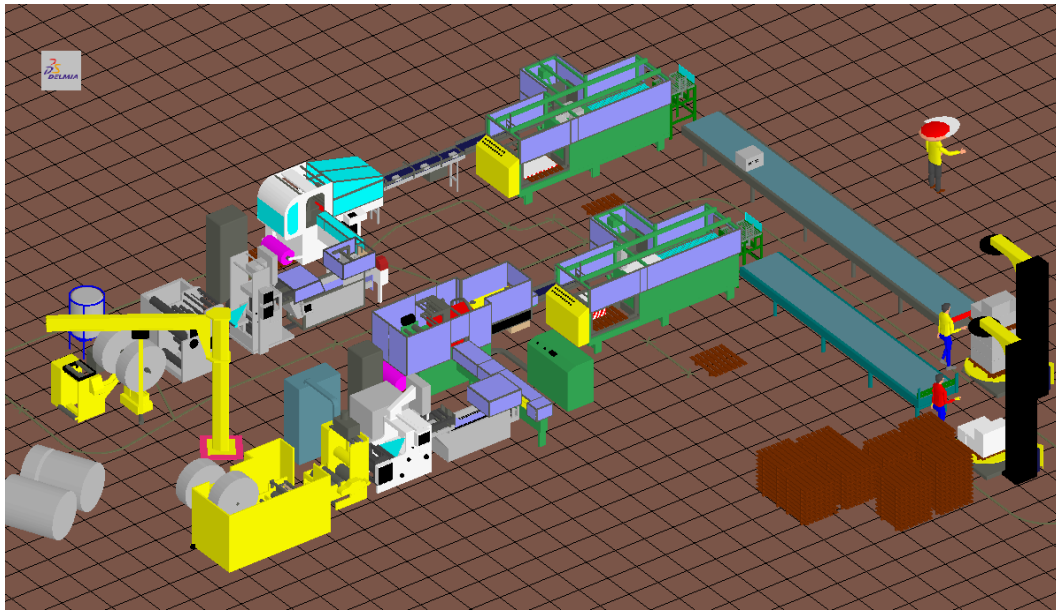


Fig. N1

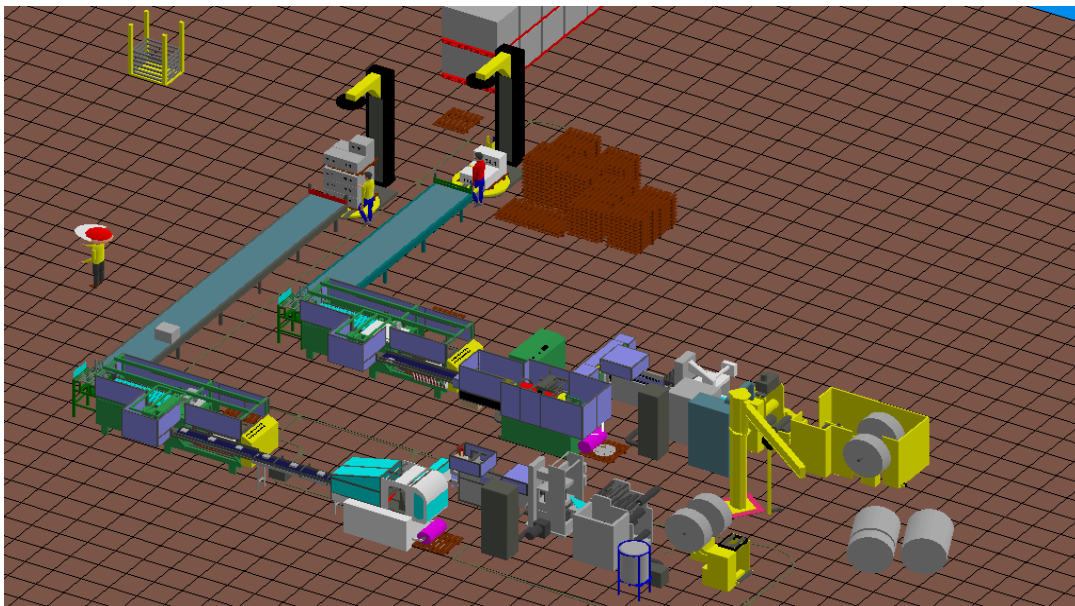


Fig. N2

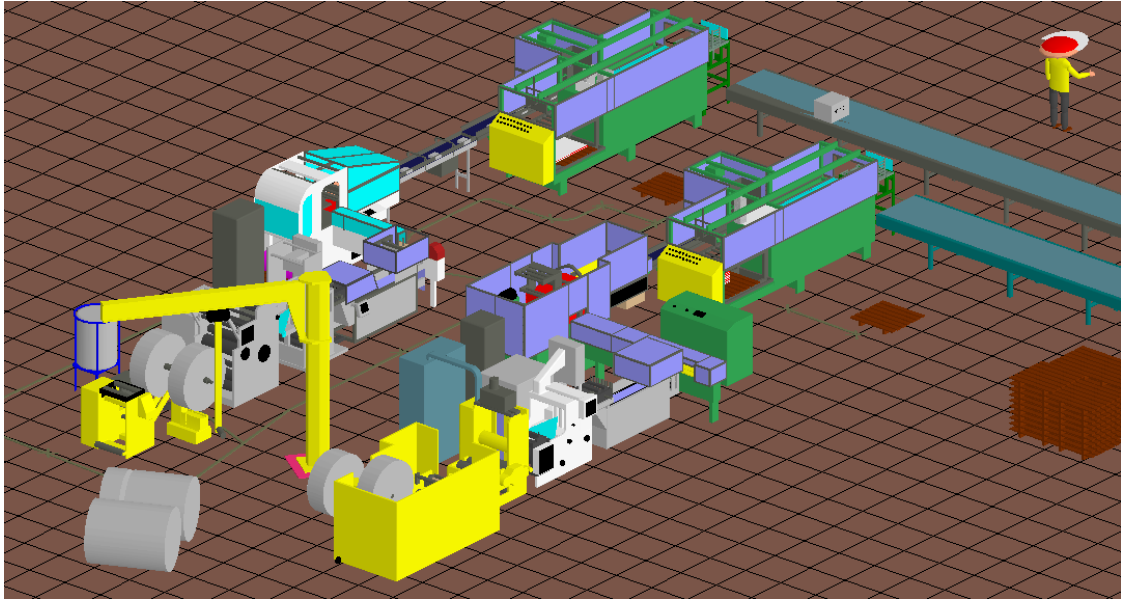


Fig. N3

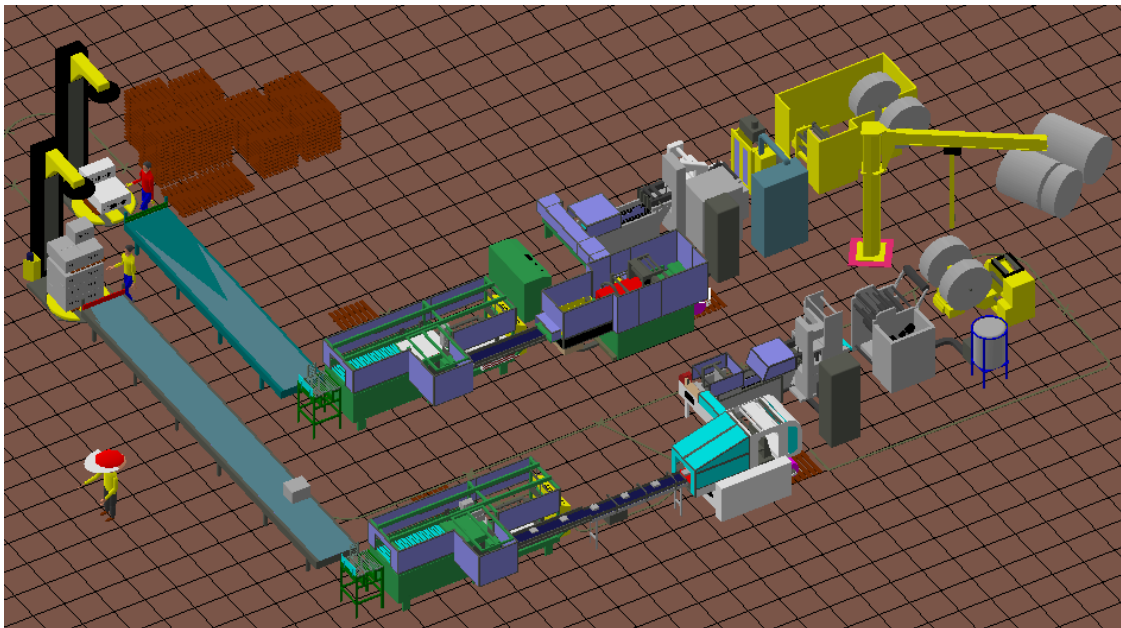


Fig. N4

2.2.3 Validazione del modello

A seguito della modellazione del sistema produttivo, occorre realizzare la validazione del modello che si distingue di due fasi:

- 1) la verifica logica del modello attraverso un'analisi visiva di run di simulazione per assicurarsi che i comportamenti logici degli elementi sia concordi con gli schemi di flusso realizzati
- 2) validazione statistica: confrontare il risultato di un insieme di run di simulazione con i risultati del sistema reale.

La scelta delle variabili da monitorare dipende dall'obiettivo dell'analisi. In questo caso la scelta è ricaduta sulle seguenti variabili:

- numero di confezioni prodotte
- utilizzazione della confezionatrice
- tasso di guasto della confezionatrice
- saturazione operatore
- distanza percorsa dall'operatore in un turno

Per validare il modello eseguiamo 10 run con un tempo di simulazione di 116 h e 10 run con un tempo di simulazione di 576 h. Di seguito si riporta il numero di confezioni di cartone prodotte:

Numero di confezioni di cartone prodotte							
Linea	Durata run	Prodotto	run 1	run 2	run 3	run 4	run 5
Linea 8003	116 h	Vit mix	3675	3665	3668	3673	3666
Linea 8005	576 h	Vit superbum	22243	22280	22275	22278	22270

I valori medi riscontrati sono:

Linea	Durata run	Prodotto	Media	Dev. S
Linea 8003	116 h	Vit mix	3669	4,393
Linea 8005	576 h	Vit superbum	22269	15,12

A questo punto per validare il modello non è stato utilizzato un test statistico poiché la qualità dei dati storici e le ipotesi semplificative necessarie per poter riprodurre il sistema produttivo non consentivano di realizzare un confronto statistico. Consapevoli di questo, e degli obiettivi dello studio, si è ritenuto di procedere nel valutare lo

scostamento in termini percentuali dei valori medi del modello rispetto al numero di scatole effettivamente prodotte.

Per la linea 8003 la differenza rispetto al sistema reale è dell' 1.18%.

Per la linea 8005 la differenza rispetto al sistema reale è dell' 3.16%.

Entrambi i valori si ritengono accettabili.

Durante i run di validazione abbiamo estrapolato i valori delle altre variabili di interesse:

Linea 8003 Prodotto Vit Mix				
Run	Util conf	%Guasto conf	Saturazione oper8003	Dist [Km/turno]
Run 1	59,67%	20,87%	43,41%	3,12
Run 2	59,54%	21,07%	43,67%	3,11
Run 3	59,54%	20,90%	43,65%	3,11
Run 4	59,67%	20,98%	43,50%	3,12
Run 5	59,67%	20,92%	43,60%	3,10
Media	59,62%	20,95%	43,57%	3,11
Deviazione	0,07%	0,08%	0,11%	0,01

Linea 8005 Prodotto Vit superbum				
Run	Util conf	%Guasto conf	Saturazione oper8005	Dist [Km/turno]
Run 1	73,00%	16,90%	27,98%	2,30
Run 2	73,11%	16,92%	27,90%	2,31
Run 3	73,09%	16,99%	27,92%	2,31
Run 4	73,18%	16,94%	27,92%	2,31
Run 5	73,00%	16,97%	27,99%	2,30
Media	73,08%	16,94%	27,94%	2,31
Deviazione	0,08%	0,04%	0,04%	0,01

Questi dati rappresentano le informazioni di riferimento per ottimizzare il layout e quindi è rispetto a questi che opereremo un confronto quantitativo per poter sviluppare delle alternative al layout attuale.

2.2.4 Ottimizzazione del modello

La fase di ottimizzazione del modello ha previsto l'individuazione di possibili soluzioni migliorative sia in termini di incremento della produzione sia in termini di ottimizzazione delle risorse produttive intese come operatori.

Di seguito si riportano alcune soluzioni proposte:

Modifica finelinea del layout

Questa soluzione nasce dalla volontà di ridurre i percorsi che gli operatori compiono per la gestione della linea. Difatti, le attività di ripristino dei guasti e delle micro fermate dipendono dalla posizione dell'operatore al momento dell'evento. La soluzione prevede il riposizionamento dei convogliatori, la modifica della lunghezza e il riposizionamento delle macchine. Vedi figura O1 (layout attuale) e figura O2 layout della soluzione proposta

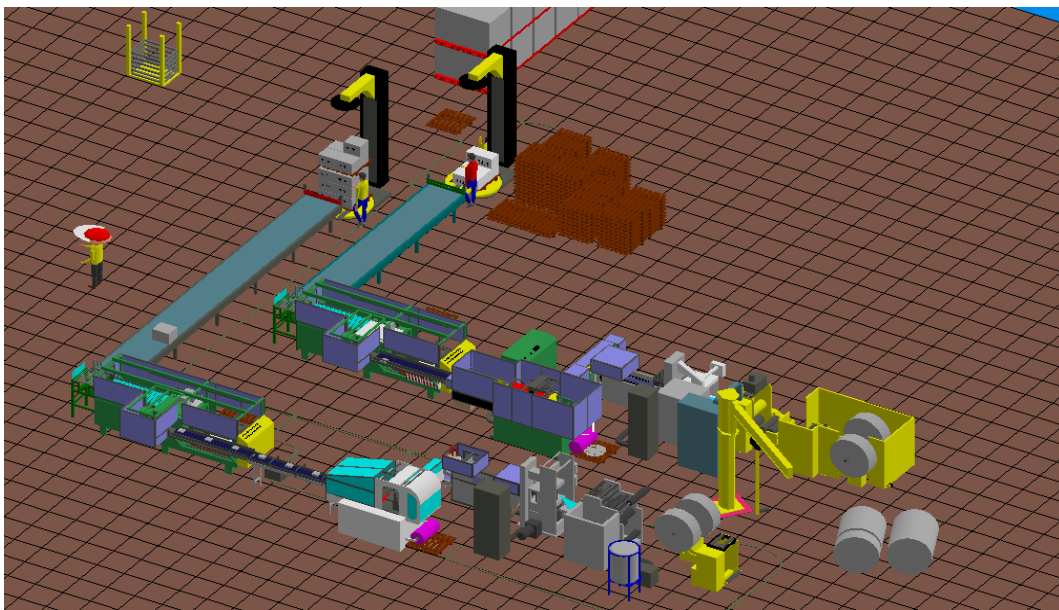


Fig. O1

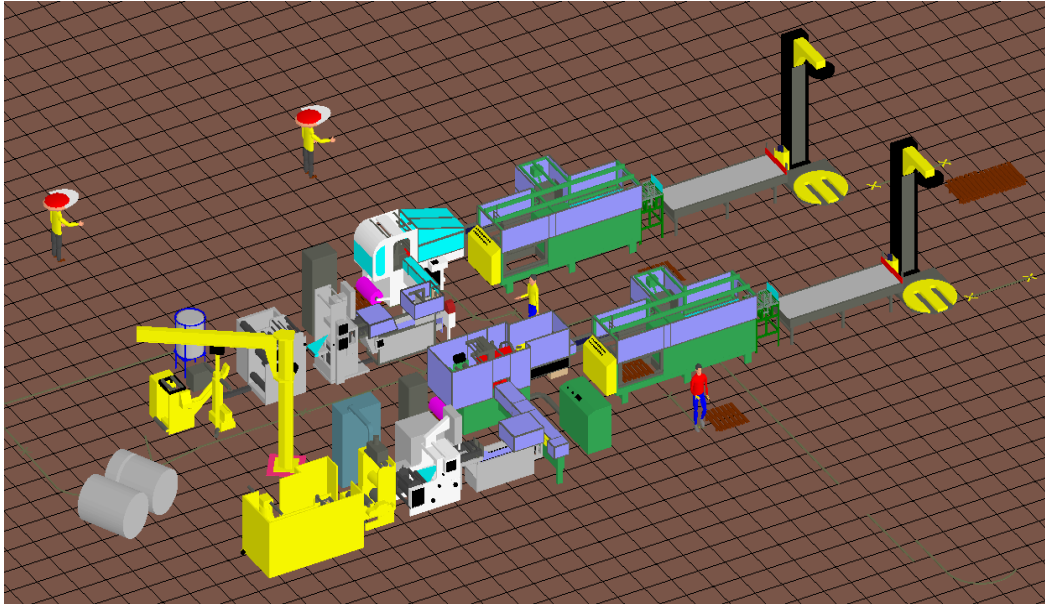


Fig. O2

I risultati medi a seguito della campagna di simulazione mostrano che per la linea 8003 la produzione è aumentata del 1,6% , il percorso compiuto da un operatore in un turno è diminuito del 32,4%., mentre gli altri parametri di interesse risultano sostanzialmente invariati. Per la linea 8005 invece non si ha nessun cambiamento significativo.

Inserimento stazione di pallettizzazione e fasciatura automatica

Questa soluzione nasce per verificare se a fronte di un investimento sul finelinea si riesce ad ottenere un aumento di produzione . La soluzione prevede l'utilizzo di una stazione automatizzata con robot di pallettizzazione, movimentazione automatica dei pallet e fasciapallet automatico. La modifica vuole dispensare l'operatore dalle operazioni di creazione del pallet e riposizionarlo sulla linea per aumentare la tempestività degli interventi di ripristino.

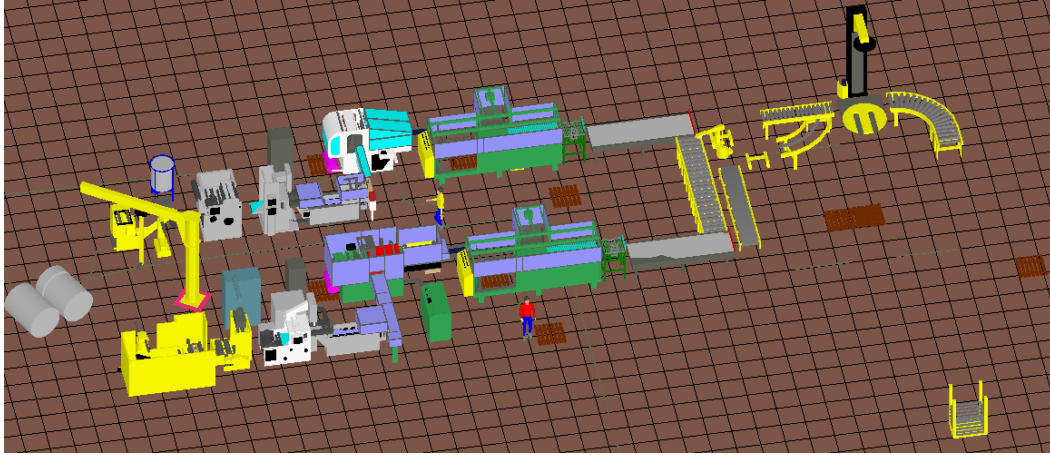


Fig. P

I risultati delle simulazioni mostrano un aumento della produzione del 6.3% sulla linea 8003 e del 5% sulla linea 8005. Inoltre incrementa la saturazione delle confezionatrici (+3.7) . Inoltre l'utilizzazione delle confezionatrici aumenta del 3.7% su entrambe le linee e il tasso di guasto delle stesse diminuisce del 3.6%. La saturazione degli operatori diminuisce (-6.2% e -4.6%) così come la distanza percorsa.

Layout automatizzato con 1 operatore per entrambe le linee e 1 operatore in comune con linea rotoli

L'ultima soluzione proposta nasce dall'evidenza di una saturazione molto bassa degli operatori e dalla verifica che un solo operatore per entrambe le linee comporta una riduzione notevole della produzione. Si è pensato quindi di utilizzare un solo operatore per la gestione dei ripristini delle macchine e un operatore condiviso (manovale di reparto) con la linea rotoli per le attività a bassa frequenza come il cambio bobina di carta.

I risultati di questa soluzione un aumento di produzione di +3.6% linea 8003 e una diminuzione del 0.7% per la linea 8005. La saturazione del singolo operatore di linea simile a quella ottenuta con il layout attuale mentre la saturazione del manovale di reparto pari circa a 20%. Questa saturazione quindi è compatibile con l'utilizzo contemporaneo sulla linea rotoli per le operazioni a bassa frequenza di approvvigionamento materiali alle macchine

2.2.5 Conclusioni

Questa attività di analisi e proposta di soluzioni migliorative è stata condivisa con l'azienda su cui lo studio si è concentrato ed è stata presentata per il Progetto Piano Industriale di Confindustria.

Tralasciando i risultati specifici delle soluzioni, in questa tesi si vuol porre l'attenzione sul tool utilizzato evidenziando quali sono stati i punti critici.

Dal punto di vista della costruzione del modello, la metodologia DES, seppur richiedendo una fase di training iniziale di qualche mese, si adatta molto bene alla simulazione di processi produttivi poiché la struttura di modellazione a blocchi permette di poter costruire seguendo lo schema logico del processo tutte le fasi di lavorazione di una linea produttiva. L'utilizzo di elementi standard del software come gli elementi machine, buffer, conveyor o labor, così come l'utilizzo di finestre per l'inserimento dei singoli dati, facilitano la modellazione e ne permettono l'utilizzo anche a utenti (dopo specifico training) che non hanno familiarità con la programmazione. Tuttavia, ci sono alcuni aspetti negativi che nel corso dello studio sono emersi chiaramente: la struttura a blocchi predefiniti è piuttosto rigida dal punto di vista della modellazione poiché ogni necessità di ricreare comportamenti o processi non standard diventa piuttosto complessa e richiede una forte conoscenza di linguaggi di programmazione a volte specifici del software (SCL, BCL, Java, ect...). Questa criticità è caratteristica della metodologia DES. Nella seconda parte di questa tesi, è sviluppato un modello di una linea di produzione attraverso la metodologia Agent Based Modeling che permette di constatare l'estrema duttilità di quest'ultima rispetto ai DES.

Un'altra caratteristica negativa è la mancanza di un sistema di costruzione di modelli predefiniti che possano accelerare le fasi di costruzione e di un sistema di verifica dei dati inseriti. Questo tipo di problema è molto evidente quando il modellatore ha un numero di elementi nel modello superiore a qualche decina.

Se per esempio, il modellatore deve inserire nel modello molte macchine identiche, la procedura di modellazione prevede numerosi passi con interfaccia a finestre. La verifica dei dati inseriti è possibile solamente ripetendo quasi interamente la procedura di modellazione.

Per ovviare a questa criticità, nel prosieguo della tesi viene presentato un software eseguibile creato per facilitare e velocizzare il processo di costruzione di un modello di simulazione con QUEST Delmia.

2.2.6 Articolo

A Digital Factory approach to identify losses of efficiency of flow shop production lines

A. Lambiase¹, M. Sammarco¹, M. Treves¹

¹Department of Mechanical Engineering, University of Salerno ,
via ponte Don Melillo 1, Fisciano, Salerno, 84084, Italy

Presentato a: CIRP ICME '10 - 7th CIRP International Conference on INTELLIGENT COMPUTATION IN MANUFACTURING ENGINEERING Innovative and Cognitive Production Technology and Systems 23 - 25 June 2010, Capri (Gulf of Naples), Italy

Abstract

Nowadays, manufacturing enterprises need to increase their productivity in order to maintain their competitiveness. For this, it is fundamental the loss of production recovery to increase overall performance. Many causes affect the performance production lines as imbalance pace of stations, bad allocation of resources, human performance variation, and so on. Digital Factory tools allow to extensively investigate on causes of production losses, to evaluate their entity and to test eventual changes. In this study, the authors examined a small paper mill enterprise. The proposed changes has permitted to easily estimate the effectively system improvements and the corresponding savings.

Keywords:

Digital Factory, DES, Production Recover

1. An Introduction to the Digital Factory World

The expression Digital Factory indicates virtual modelling integrated systems that permit to simplify concurrent engineering through analysis and simulation of production systems, workspace (as well as ergonomics analysis), flow of materials, resources saturation, etc... [1]

The possibility to analyze a production system and its evolution on the time through virtual instruments permits to evaluate early the impact of model changes (as new resources introduction, new production cycles, layout modification, tasks reallocation to resources, etc...) [2]. In this way is possible to evaluate system productivity and flexibility, work-in-progress, buffer dimension, internal logistic compatibility all of this before the physical realization of the system.

Moreover the realization, the validation and the alteration of the model are absolutely non-invasive for the real environment and so there aren't any production stops [3] [4]. Anyway the analysis in virtual environment (i.e. VRe) is not invasive, speedy and economically sustainable [5].

A virtual implementation permits many evaluations on the results run and so is possible to improve many production features like material flow, manpower mansion attribution changing the input model for each simulation run [6][7]. Studying the output of current simulation step is possible to guide the future simulations to converge in a optimal solution and in a little slice of time and without physical change to real plant [8].

2. The implemented approach

This study has been conducted through four major steps.

At the beginning the authors were stayed in the enterprise to collect the important data for the analysis: general information about the enterprise, information about product, process and resources, the historical data of production, the machines data included the physical features useful for virtual model.

At the same time the work cycles have been studied for all type of products.

Finished collected phase the virtual model has been built (i.e. AS IS modeling phase).

This manifests the second step.

In the afterward step the model has been validated according with real model. In this third phase the output data of the model are compared with the real effect of the system. In this way the authors modelled a particular production line. They compared the results of virtual model with the data of the real world. In this phase the real world is not contaminated and the production continues without any stops [9]. In the case

study our validation step outperforms the results in according with the real world data with a deviation about 3%.

The next phase consists in a sequence of simulations with different inputs to evaluate the critical points of production system. A decision making procedure has been performed to weight the critical assessment.

The latter step is the system optimization (i.e. TO BE modelling phase). A design experiment analysis has been performed. The exploration and exploitation of domain were based on an expert heuristic criterion [10]. The critical points of the system are marked out by the simulation results.

In our flow shop production line the main cause of inefficiency are about: job assignment to worker, buffer size and a wrong production scheduling.

The simulation of workers mansions has offered real interesting outcomes. The simulation considers the real saturation of the workers including path length, worker speedy, overlapping event. In fact is possible that a single worker receives more than one calling in the same time. In this case, the worker responses to calling according to FIFO rule. For each step simulation the authors changed the coupling worker/machine evaluating the effects of a different worker route. For each step the authors calculated the gains of the new allocation driving the final solution.

Failures and stops time have been modeled with triangular function. The maximum, minimum and modal value has been defined according with the real environment.

A buffer capacity analysis needs to be performed. Whatever the buffers are not rightly dimensioned will be true lack of production in order to probability of failure and time to repair. In the case study the reallocations of workers and the optima measuring of buffers have allowed to obtain savings in term of operating cost and time.

The optima distribution of workers mansions in order to time to repair and tame to move and the optimal capacity o/& buffers have been obtained in output to dynamic simulations in the virtual model.

3. The case study: a paper mill enterprise

The authors analyzed a small paper mill italian enterprise.

The enterprise makes over than thirty products changing in quantity, variety and quality working in three shifts per day. The production is shared into three lines, the first one dedicated to different rolls of paper and the other two dedicated to different type of napkins.

A typical work cycle in a paper enterprise consists in the following phases (Fig. 3-5):

- unrolling the big bobbin of paper;
- gluing / embossing;

- creating rolls tree metres long / folding;
- cutting;
- packaging;
- packing sacs / cartons;
- moving sacs/cartons;
- packaging pallets.

Both napkins and paper rolls lines have been analyzed. In both case the global efficiency is about 60%.

The main causes of inefficiency are about the “six big losses” as shows the picture below.

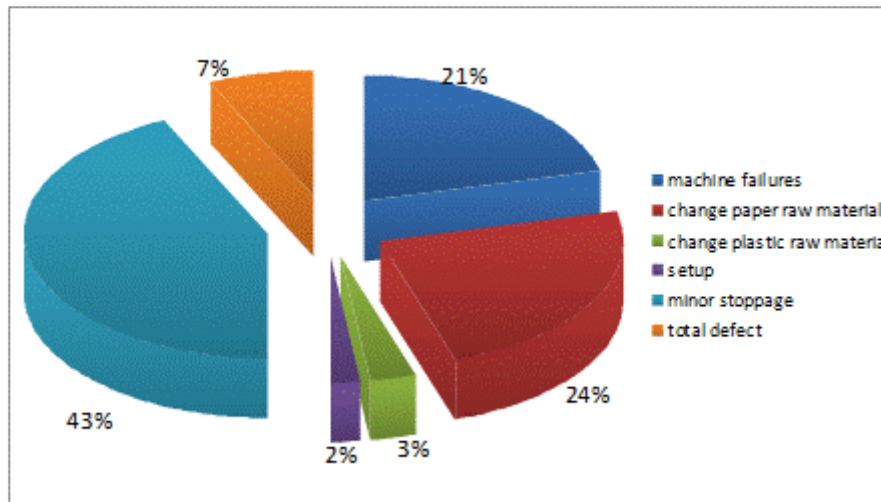


Figure 1

3.1. The paper rolls line

The paper rolls line is made up fifteen machines (e.g. cutting machines, packaging machine, etc...), see Figure 2. Each product has a specific production job and each job has different tasks. The job doesn't include all the machines. Four workers are engaged on the line and each worker has his own mansions.

A PPR (product, process, resources) analysis has been conducted.

Figure 3 shows the relationship between products, process and resources.

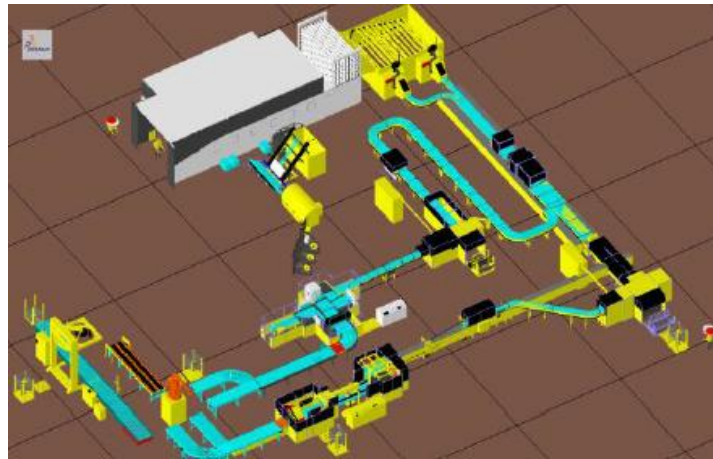


Figure 2

This project has been developed after a six month of collaboration with the paper enterprise. The authors collected the data in a period of ninety eight hours. A preliminary analysis of data allowed to quantify downtime, setup time, the amount and frequency of minor stoppages, and waste production. Production slowdown has been modelled according with a triangular distribution.

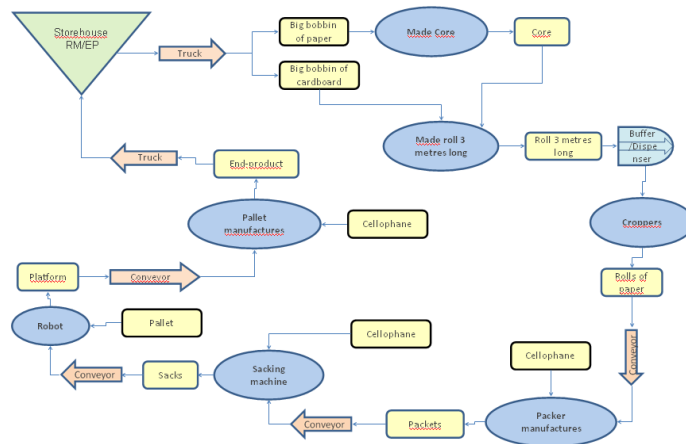


Figure 3

The Overall Equipment Effectiveness (i.e. OEE) has been evaluated ($OEE \approx 60\%$). This result showed a great opportunity of improvement.

An analysis of main problems that cause this inefficiency has been developed. Improvement hypotheses have been supposed and implemented into VRe.

Poor quality of raw materials, setup frequency and sequence, maintenance, task scheduling manifested as main causes of inefficiency.

Process simulation has permitted to evaluate the best solution to improve simultaneously all these problems. A raw materials quality control has been put in. A setup scheduling optimization has been developed. A planned maintenance has been inserted. A Methods Time Measurement (i.e. MTM) has been made to improve the task scheduling [11]. The MTM analysis in virtual environment has permitted to manifest improved results in terms of worker saturation rate. The virtual environment visualizes workers paths, workspace, route and mansions.

The simulation time evolves in discrete way. At time t the worker will be on a task according with implemented queue rules. The virtual model calculates the time to arrive at machine in order to distance (from-to task) and worker speed. Moreover in this way is possible to evaluate the effects of tasks overlapping. The model considers, in addition to the saturation of the single task, the loss of production caused by overlapping effects. The workers calling procedure has been stated and simulated as defined into the approach paragraph. This type of analysis has permitted to evaluate the best allocation of mansions to workers in order to reduce workers numerosness and optimize task scheduling. The result is about one and half worker less for each shift (e.g., layout optimization, reduction of NVAA, etc...).

The analysis has been conduct as previously described approach.

The AS IS simulation showed an unbalancing assignment mansions to the four workers. Moreover the workers had a low saturation and so many free time. In addition the more critical operations in term of frequency and tasks overlapping are committed to only one worker while the other three workers are few saturated and engaged on predictable tasks.

An improving simulation considers just three workers. The mansion of two workers are shared into only one worker. In this way one worker for each shift has been saved and so is employable for new mansions.

To solve the second critical point, a better balancing of mansions between workers, the authors have reallocated the tasks. After this second improving simulation the saturation is enough balanced.

The last improvement is about a better distribution of the critical tasks. In this way the critical tasks have been shared between two workers and one worker have only simple manual tasks. In this last simulation the system has only three workers and one of this with a saturation about 40% busied only for manual tasks.

Finally a saving of one worker has been obtained and one worker is busied for less than 50% of the time and so is employable on another task or to solve manual tasks in the napkins lines.

3.2. The paper napkins lines

Actually the paper napkins line is shared into two different lines with a “L” layout. Both lines are made up four machine. Two workers are engaged on the two lines and each worker is the owner for only one line. Each line is independent and there is a worker for all mansions.

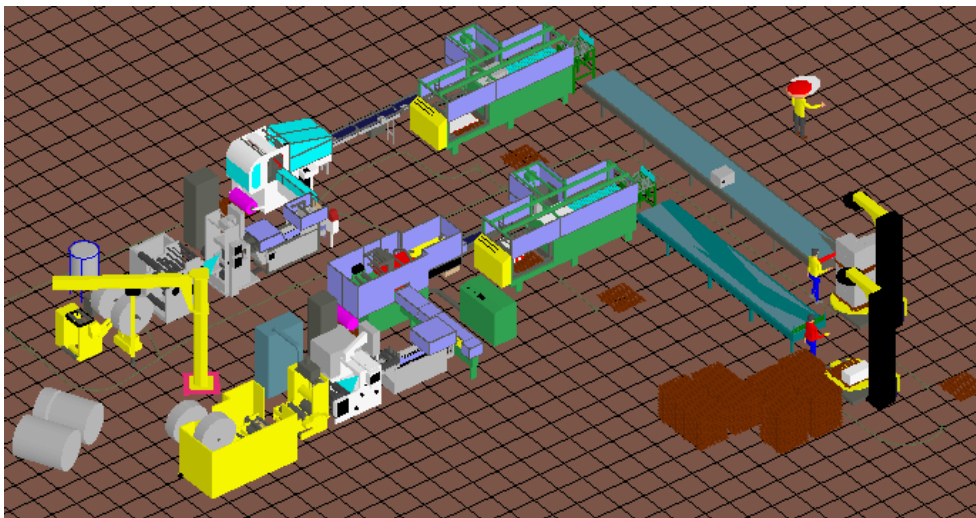


Figure 4

The authors used the same approach showed for the previous case. In fact the main problems funded are similar the paper rolls line. Also in this case a PPR (product, process, resources) analysis has been conducted.

The picture shows the relationship between products, process and resources.

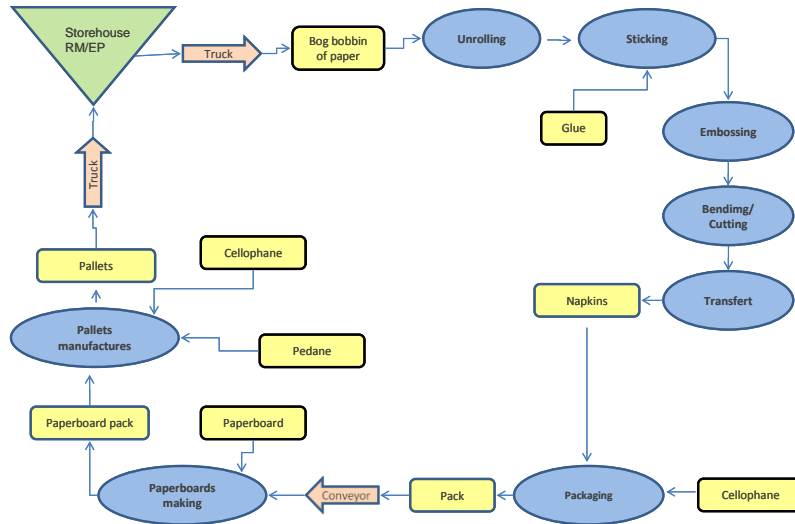


Figure 5

The authors have collected the data in a period of five hundred and sixteen hours. The Overall Equipment Effectiveness (i.e. OEE) has been evaluated ($OEE \approx 60\%$). The AS IS simulation has been showed that: one worker is saturated at 33% and the second one at 44%. In this configuration the workers are saturated only for less than 50% but all of them are necessary because for each line must be present no less than one worker.

To an improving simulation the authors assigned only one worker like the owner for both lines and a manual worker for all the loading and unloading operations. The worker must be control both lines only for the critical operations while the manual worker do the others.

In this way the saturation of the worker is about 34% and the saturation of manual worker is about 33%.

The manual worker has at least 50% of the time to use for others activities and in particular to spent for the other one line: paper rolls line.

In a second time, the authors have modified the model by providing the use of a packaging robot to replace the pallet manual creation. The simulation has permitted to verify that this solution, although valid, is economically worse than previous.

Finally in the last simulation the authors have linked together the results obtained in the both type of line: paper rolls and napkins lines.

4. Results

Overall the saving obtained to the two lines together is two workers for each shift. The authors simulated all the lines simultaneously committing the right tasks for each worker.

There are two workers dedicated for the paper rolls line and one worker for both paper napkins lines and at last there is one manual worker for the auxiliary tasks for all lines together.

The manual worker provides to load and to unload products to machine and to manage the storehouse.

The global effort is more than 180.000 euro and without any more cost.

Moreover the result is an improvement of OEE about 4%.

The results come out dynamic simulations that permit to evaluate the real saturation of the workers. In this way the authors evaluated the feasibility to reorganize the tasks between the workers and evaluated the effort for each solution.

Finally all changes on the system are tested in virtual environment without impact on the production.

5. Conclusions

The application of Digital Factory has yielded results for both large corporations and for small and medium enterprises. Although the use of these techniques to allow larger companies to observe the greatest benefits in terms of time and implementation costs, they are not negligible results for small and medium enterprises especially in view of the potential of the instruments used.

Digital Factory tools used have allowed us to evaluate directly in a virtual environment, performance of solutions to problems, allowing for a lower investment risks due to changes (eg introduction of a robot for activities assembly, extending internal logistics system, replacement of conveyors, etc. ...).

The DF is a strategic tool for continuous improvement and optimization of resources both in manufacturing than in services, both for small and medium enterprises to multinationals.

Acknowledgments

Sincere thanks are extended to all workers of paper mill industry.

References

- [1] Choi S. H., Chan A. M. M., 2004, A virtual prototyping system for rapid product development, *J. of Computer-Aided Design*, Vol. 36, Issue 5, 2004, 401-412
- [2] Bao J. S., Jin Y., Gu M. Q., Yan J. Q., Ma D. Z., 2002, Immersive virtual product development, *J. of Materials Processing Technology*, Vol. 129, Issues 1-3 , 592-596
- [3] Zulch G., Stowasser S., 2005, The Digital Factory: An instrument of the present and the future, *J. of Computers in Industry* , Vol. 56, Issue 4, 323-324
- [4] Di Martino C., Fruggiero F., Lambiase A., Lambiase F., 2007, Making virtual the reality: A factory planning across an integrated ergonomic digital factory approach, CARV, Toronto
- [5] Lambiase A., Lambiase F., 2007, An integrated Approach to the Analysis of Automotive As-sembly Activities using Digital Manufacturing tools, Special Issue of *International Journal of Internet Manufacturing and Services*
- [6] Lambiase A., Lambiase F., Palumbo F., 2007, Effectiveness of Digital Factory for simple re-petitive task simulation in medium-small enterprises, *Proc. of CARV, Toronto, Canada*
- [7] Gomes De Sà A., Zachmann G., 1999, Virtual reality as a tool for verification of assembly and maintenance processes, *J. of Computers & Graphics*, Vol. 23, Issue 3, 389-403
- [8] Bracht U., Masurat T., 2005, The Digital Factory between vision and reality, *J. of Computers in Industry*, Vol. 56, Issue 4, 325-333
- [9] Wohlke G., Schiller E., 2005, Digital Planning Validation in automotive industry, *J. of Computers in Industry*, Vol. 56, Issue 4, 2005, 393-405
- [10] Sartzetaki M., Psaromiligkos Y., Retalis S. and Avgeriou P., 2003, Usability evaluation of e-commerce sites based on design patterns and heuristic criteria, 10th International Conference on Human - Computer Interaction, Iraklion Crete, June 22-27, 2003
- [11] Ben-Gal I., Bukchin J., 2002, The ergonomic design of workstations using virtual manufacturing and response surface methodology, *IIE Transactions*, Vol. 34, number 4 / apr.,375-391

2.3 Sviluppo di architettura software per l'ottimizzazione dello sviluppo di modelli di simulazione DES con QUEST Delmia

Durante lo sviluppo delle attività per l'ottimizzazione delle linee produttive nel caso Confalone, sono apparse evidenti alcune criticità in merito allo sviluppo dei modelli.

In particolare:

- Lungo periodo di training
- Procedure di inserimento dei dati nel modello laboriose e ripetitive
- Elevati tempi di creazione dei modelli
- Elevati costi di sviluppo dei modelli

La maggior parte delle operazioni che l'utente svolge per modellare un sistema produttivo rappresentano la ripetizione di una procedura già eseguita. Per modelli che contemplano un numero elevato di elementi (macchine, parti, buffer, conveyor, ect...) il tempo speso per le attività ripetitive è rappresentato da oltre il 50% del tempo di sviluppo complessivo.

In termini di costi, le piccole e medie imprese che vogliono avvalersi di uno strumento di questo tipo, devono sopportare sia un investimento iniziale (a parte le licenze) per il training sia il costo di sviluppo dei modelli. Entrambi rappresentano un ostacolo alla diffusione di tool di simulazione.

In figura 13 vengono mostrate le operazioni necessarie per creare un processo e attribuire una parte. Il tempo necessario varia da 25 a 30 secondi per un utente esperto.

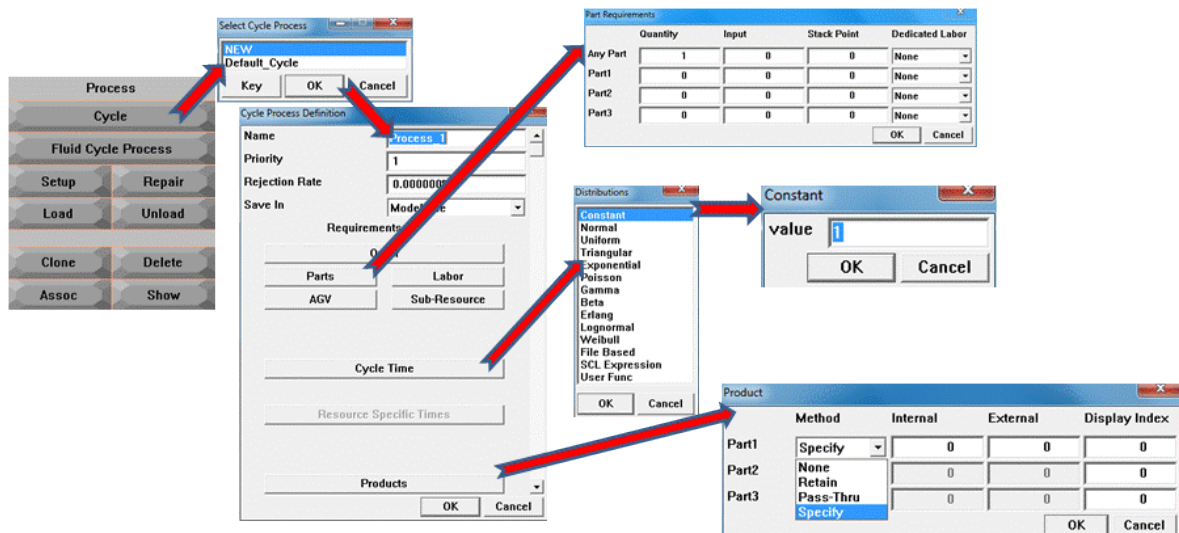


Figura 13

Alla luce di queste considerazioni, si è deciso di sviluppare un' architettura software con le seguenti caratteristiche:

- Procedure semplificate
- Riduzione del numero di operazioni nelle fasi standardizzate e ripetitive
- Riduzione dei tempi di realizzazione di un modello
- Visione Globale sui Parametri del Sistema

Innanzitutto, semplificare le procedure di implementazione consentirebbe di rendere più accessibile l'uso del simulatore anche ad utenti meno esperti mentre la riduzione del numero di step nelle fasi ripetitive e standardizzate consentirebbe una riduzione dei tempi di sviluppo dei modelli e dei costi. Per permettere la visione globale dei parametri si è deciso di utilizzare tabelle di immissione dei parametri del sistema.

2.3.1 Struttura del software

L'Architettura del software è realizzata con: un modulo consente l'immissione dei dati attraverso un Database realizzato in Access. Poi attraverso Visual Basic le informazioni vengono tradotte in linguaggio BLC che consente di comunicare con il software Quest. L'applicazione è stata corredata da un convertitore CAD , da un sistema di importazione dei dati in input qualora fossero disponibili già in formato elettronico e da un modulo di generazione della documentazione a valle della simulazione.

La figura 14 mostra come lo schema di funzionamento del software.

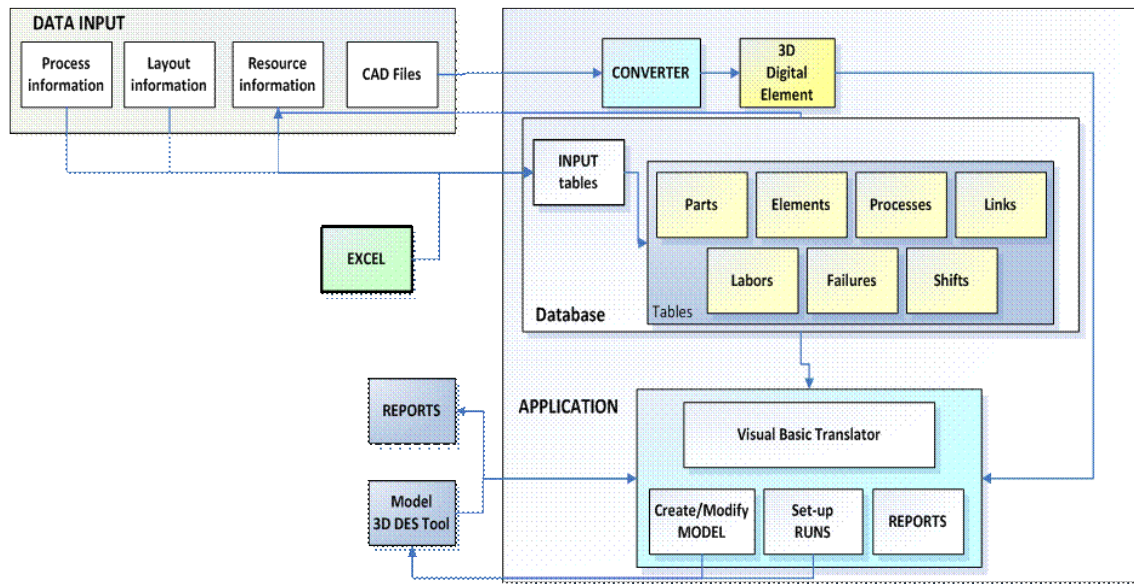


Figura 14

La fase di immissione dati, attraverso una maschera iniziale e delle tabelle è realizzata attraverso 3 livelli, vedi figura 15.

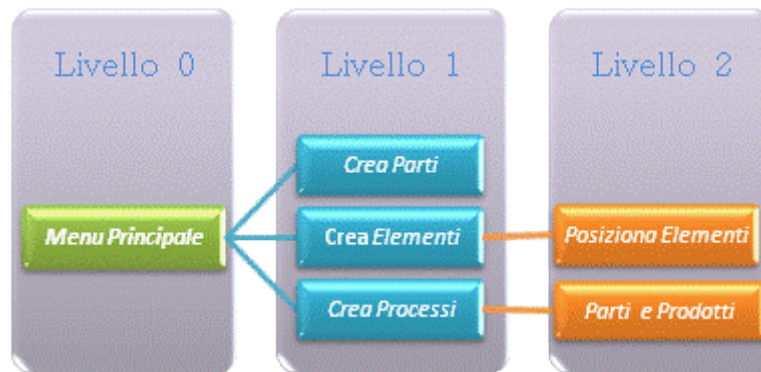


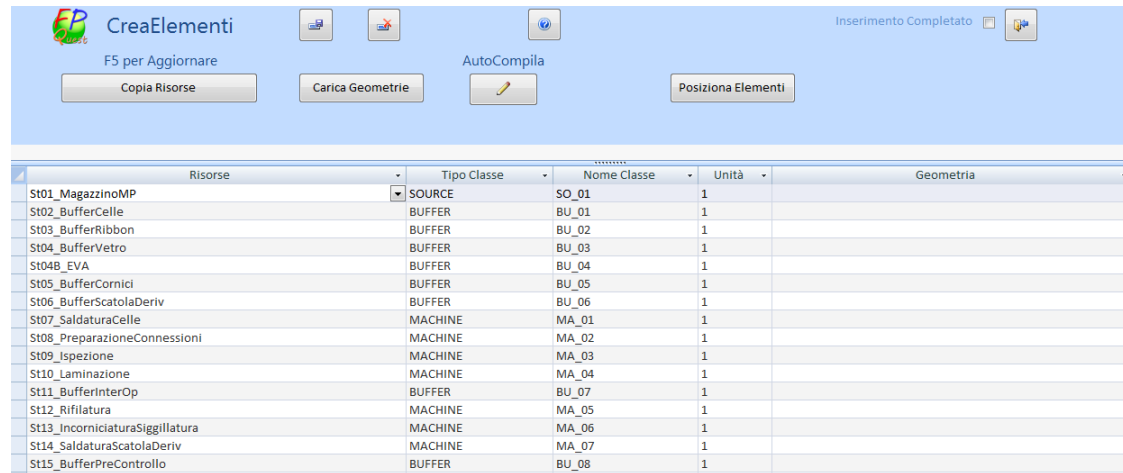
Figura 15

La figura 16 mostra la maschera iniziale che consente di scegliere la funzione necessaria.



Figura 16

La figura 17 mostra il modulo di creazione degli elementi (la cui struttura è del tutto analoga agli altri moduli). Il comando Crea Risorse consente di compilare automaticamente la colonna Risorse qualora si disponesse di una lista in formato elettronico. I pulsanti in alto consentono di creare un nuovo record, di eliminarne uno esistente o di accedere alla guida creata per rendere ancora più semplice la compilazione del modulo. La funzione di autocompilazione consente di scrivere automaticamente i nomi delle classi delle risorse andando a leggere i primi due caratteri della stringa “tipo classe” e assegnando in automatico un numero progressivo. Il comando Posiziona elementi consente di accedere all’interfaccia di livello successivo. Nella colonna Geometria è possibile selezionare un file CAD che fornirà l’aspetto estetico alla risorsa. Il comando di uscita in alto a destra è corredato da un indicatore di stato che consente di visualizzare sul menù principale l’avvenuta compilazione del modulo in esame.



The screenshot shows the CreaElementi software interface. At the top, there is a header bar with the logo 'CreaElementi' and the text 'F5 per Aggiornare'. Below this, there are several buttons: 'Copia Risorse', 'Carica Geometrie', 'AutoCompila', and 'Posiziona Elementi'. On the right side of the header, there is a status indicator 'Inserimento Completato' and a small icon.

Risorse	Tipo Classe	Nome Classe	Unità	Geometria
St01_MagazzinoMP	SOURCE	SO_01	1	
St02_BufferCelle	BUFFER	BU_01	1	
St03_BufferRibbon	BUFFER	BU_02	1	
St04_BufferVetro	BUFFER	BU_03	1	
St04B_EVA	BUFFER	BU_04	1	
St05_BufferCornici	BUFFER	BU_05	1	
St06_BufferScatolaDeriv	BUFFER	BU_06	1	
St07_SaldaturaCelle	MACHINE	MA_01	1	
St08_PreparazioneConnessioni	MACHINE	MA_02	1	
St09_Ispezione	MACHINE	MA_03	1	
St10_Laminazione	MACHINE	MA_04	1	
St11_BufferInterOp	BUFFER	BU_07	1	
St12_Rifilatura	MACHINE	MA_05	1	
St13_IncorniciaturaSiggillatura	MACHINE	MA_06	1	
St14_SaldaturaScatolaDeriv	MACHINE	MA_07	1	
St15_BufferPreControllo	BUFFER	BU_08	1	

Figura 17

2.3.2 Validazione del software

Conclusa la fase di sviluppo software, è stata realizzata una campagna di validazione per la verifica del corretto funzionamento del software. Per fare ciò si è deciso di testare tutti i moduli attraverso la costruzione di diverse tipologie di sistemi di produzione.

Nell'esempio mostrato nelle figure 18 e 19 sono state create sette stazioni di lavoro, un generatore di parti, sette buffer e due sink e si sono testate le logiche di instradamento delle parti, oltre che le classiche funzioni di base.

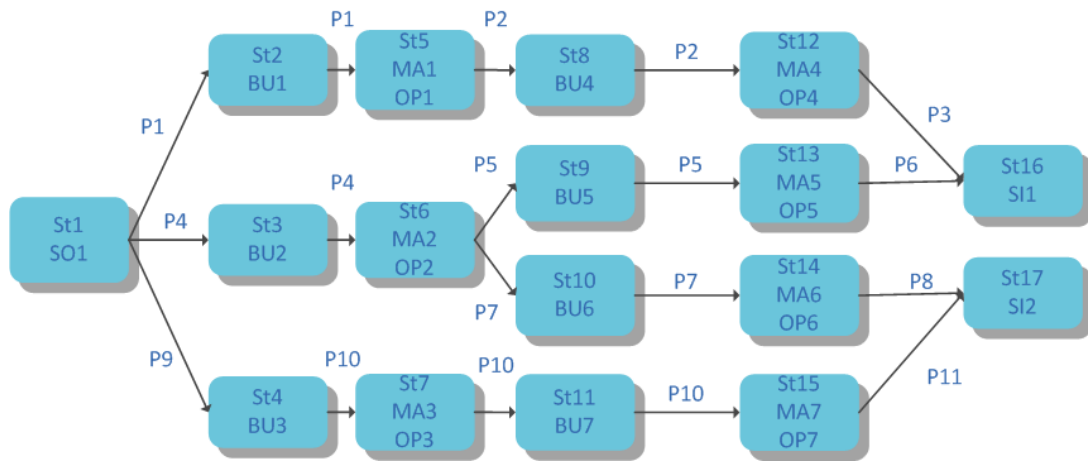


Figura 18

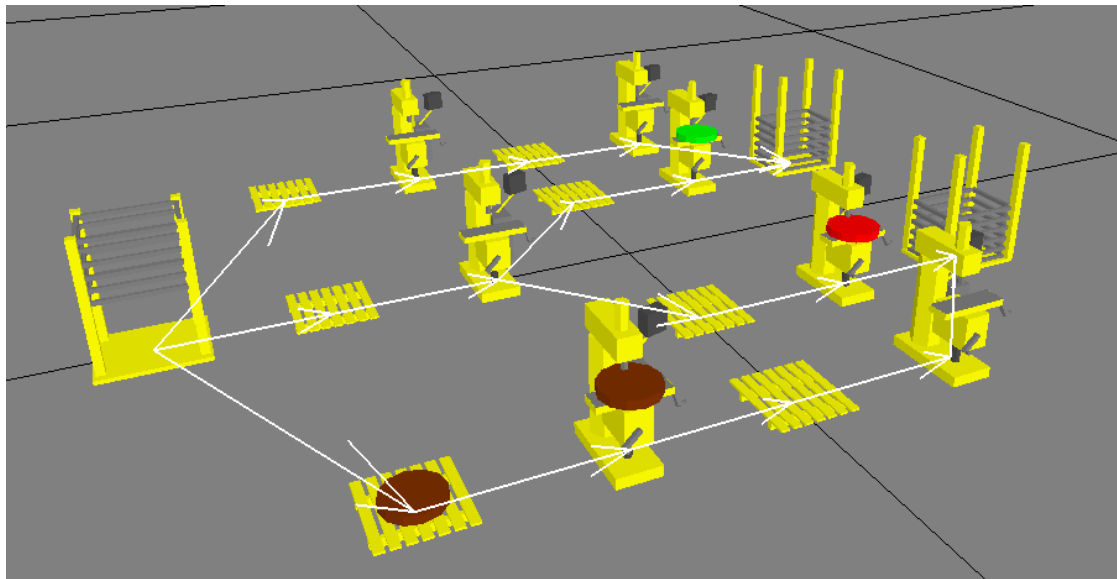


Figura 19

2.3.3 Valutazione delle performance del software

Per verificare le performance dell'architettura software si è deciso di valutare 2 parametri prestazionali: tempo di creazione di un modello/elemento e il numero di operazioni elementari necessarie.

Le prime comparazioni rispetto al software Quest sono state fatte in riferimento alla procedura di creazione parti valutando i parametri prestazionali per un numero crescente di elementi richiesti. La figura 20 mostra i risultati:

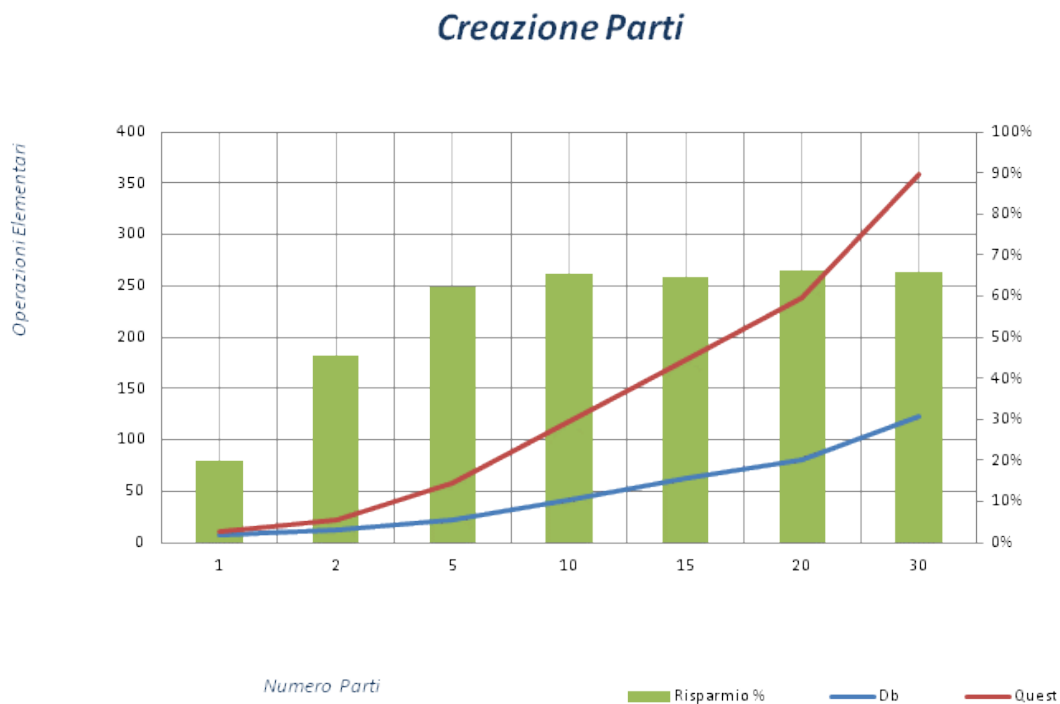


Figura 20

Le operazioni elementari (apertura finestre, inserimento dati, ect...) che devono eseguite con l'architettura software realizzata (Db – linea blu in figura) sono sempre minori in numero con una riduzione del 60% rispetto al software Quest allorché le parti da creare sono maggiori di 5.

Lo stesso tipo di valutazione rispetto al tempo di creazione delle parti, vedi figura 21, mostra un riduzione dei tempi superiore al 70% rispetto al software Quest.

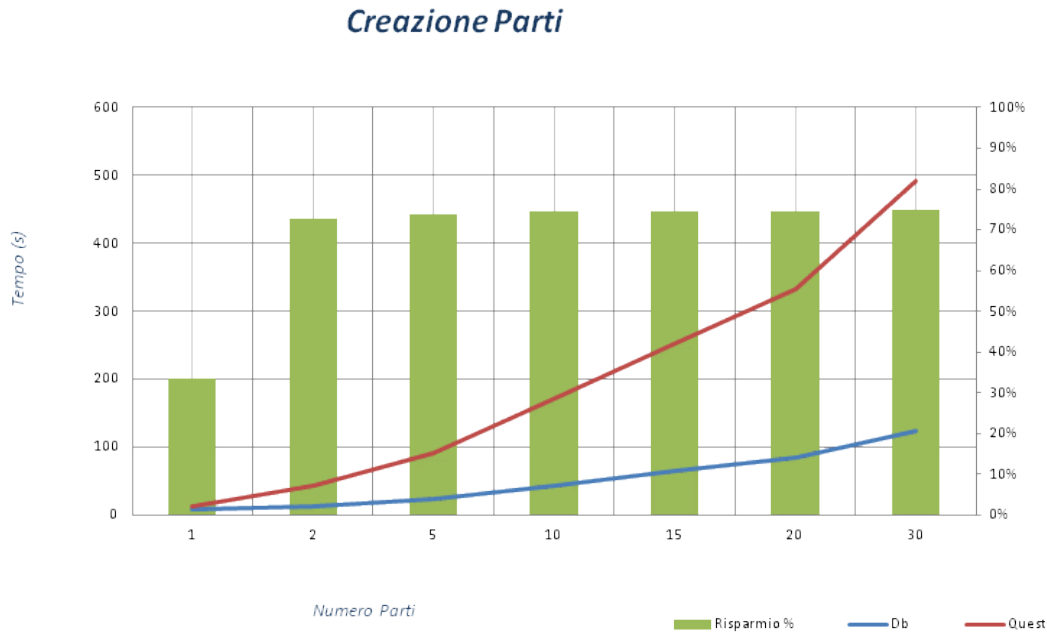


Figura 21

La comparazione tra l'architettura software realizzata e il software Quest ha avuto come oggetto altre procedure di modellazione come: creazione macchine, creazione processi, modifica processi, posizionamento risorse e modifica posizionamento risorse. I vantaggi in termini di tempo sono stati sempre superiori quantomeno al 50% fino a punte del 75% mentre per quanto riguarda il numero di operazioni elementari da svolgere la riduzione è stata compresa tra il 40 % e il 70%.

In realtà la realizzazione di un modello di un sistema produttivo non può essere completato interamente attraverso l'architettura software realizzata poiché non è possibile prevedere tutte le possibili e specifiche esigenze di modellazione. Per poter quindi verificare le prestazioni nella realizzazione di un modello complesso si è deciso di costruire il modello della linea rotoli del caso Confalone precedentemente trattato sia con la procedura utilizzata con il software Quest che con l'applicazione realizzata per velocizzare tale processo.

I risultati della comparazione sono stati:

- Procedura Software Quest: 4 h 15 min tempo di realizzazione e 2200 operazione elementari eseguite

- Applicazione software realizzata: 2 h 10 min tempo di realizzazione, e 1230 operazioni elementari eseguite

I risultati ottenuti nella creazione di un modello con l' applicazione software realizzata sono notevoli poiché di traducono in costi di sviluppo più bassi.

È da sottolineare inoltre che questo tipo di applicazione è stata realizzata, in maniera indipendente e parallela, da un centro di ricerca (CCAT – Stati Uniti) con obiettivi simili ai nostri.

2.3.4 Articolo

A novel approach for development and analysis of discrete event simulation model

Alessandro Lambiase, Francesco Palumbo, Mauro Sammarco

Department of Mechanical Engineering, University of Salerno, via ponte Don
Melillo 1, Fisciano, 84084, Italy

Presentato a: CIRP ICME '10 – 7th CIRP International conference on Intelligent Computation in Manufacturing engineering – Innovative and Cognitive Production Technology and System 23-25 June 2010 – Capri – Italy

ABSTRACT

Today, digital factory offers a new approach to product development, innovation process and life cycle management. Digital factory (i.e., DF) is a concept including methods, tools, architecture of digital models, visualization 3d, which are integrated together. Simulation is key technology in Digital Factory and can be applied for continuous improvement of performance, security of workstations, scheduling and planning, logistic problem. In this paper, authors are going to present a software architecture that interacts with a 3D discrete event simulator. Tool developed to link database software and back by encouraging its use also to non-experts. The results show a reduction of construction phases of the model, greater visibility of data, increased rate of change of data and develop time reduction.

Keywords:

Digital Factory, Virtual Manufacturing, Modeling, DES

1. Introduction

In the last few years, the development of Information Technology had allowed the growth of applications software in the industrial field and not only. At beginning, singular software were developed for specific applications, for example discrete event simulator, software of mechanical design, numerical analysis, ERP, MRP, database for the data management, tool for planning project and so on. Every particular application has allowed many developments in the field in which was applied but the impossibility of communication of the different tools has hidden other factors of success. The times of development of the products, the level of service and the increasing need to reduce the costs have addressed the search toward the development of integrated bases for total management of cycle life of product. Great computer societies have developed integrated software by the acquisition of specialized society in specific software. The total integration has allowed developing the concept of Digital Factory (DF). Many researchers have couched the concept of Digital Factory:

- Digital factory is a concept including a network of digital models, methods and tools such as simulation and 3D-visualisation, which are integrated through a comprehensive data and flexible modules management [1]
- The Digital Factory is the correct term to gather under an only network you model digital, methods and integrated tools in a process stretched out to the global optimization of system [2]

An exact definition of Digital Factory doesn't exist because it represents a dynamic concept in evolution. The DF can be expressed by three words: integration, visualization and optimization. Research project on DF have concluded that the vision and progressing realization of the digital factory include the fundamental formulations and potential solutions of almost all problems posed by future planning methods, production, maintenance program [3].

2. 3D DES tool

The 3D DES tool, as an essential element of the DF, is certainly the most useful tool in the design and redesign of a manufacturing system. This tool allows us to design facility layout, process flow, staff schedules, machines arrangement, and also incorporate ergonomics constraints. Simulation data can then be manipulated into various charts and tables. Users can visualize and prevent potential problems, improve existing processes, reduce safety risk, optimize work-flow material and so on. In a few words, it is powerful tool to design, analyze and visually represent complex manufacturing processes and data, providing a single collaborative environment for industrial and manufacturing engineers, and management personnel to develop and provide the best manufacturing flow practices throughout the production design

process [4]. The modeling and simulation techniques enable dynamic analysis to ensure that plant design problems and waste are discovered before the company ramps up for production. Further simulation technology ensures in advance of the start of production, that the factory hits the demands for efficient operations[5]. Several strategic goals can be reach as control WIP, minimizing product handling, optimized buffer dimensions, efficient stock management, optimized human resource management, and so on [6,7]

Without going into detail on the use and applications amply documented in the literature[8,9,10], the success of this tool is due to some of its characteristics as follow:

- Integration: whole system allows the interactions among tools and so reduction of develop time and better cooperation is reached.
- Visualization: it facilitates the modeling and validation thus reducing the development time of a model; it represents also a result of analysis by 3D DES tool, it increases understanding of the results and speeds up the tuning of the model.
- Mask-oriented modeling: the develop of model is guided by input interface procedure for each object to model; this approach encourages the elementary use of the software by non-experts

These characteristics reveal many advantages but also have some disadvantages. Digital simulation leads to more graphic details and that means more development time. The positioning of resources, the paths of labor, the view of the parties increases the phase of modeling. In chapter 3, a detail discussion on developing steps of a simulation model is represented. In chapter 4, a software architecture is described in detail. In chapter 5 the results are discussed.

3. Current modeling procedure

The benefits of a DES are a lot. Certainly, easiness of modeling is fundamental for simulation software since it condition develop speed. Many software, especially 3D tools, use modeling step by input mask. This method could to make easier the model creation but also to slow down. Finally, the input mask method could be handy only expert user. So, often it is necessary a training period on software to learn basic rules to develop a model. This requires time and costs. Nevertheless, where user is expert on the specific software, some modeling steps could be boring since repetitive. These reflections induce to think new modeling procedure is required.

Before to explain the developing methodology, it is necessary to make clear that this study is concern with simulation tools for manufacturing environment. So, it is obvious that machine creation, process definition, allocation of task to labor, and so on... are main subjects.

Firstly, detail analysis of actual modeling procedure of a specific 3D DES has been done. The picture shows only some steps to create a manufacturing process because the number of ones depends on specific characteristic of process to create.

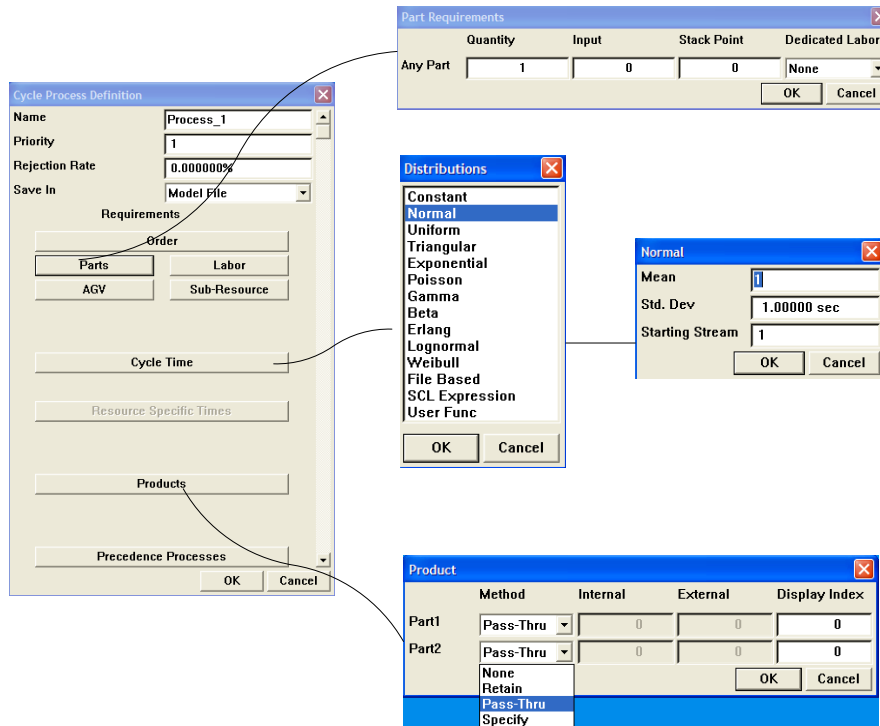


Figure 1

The picture shows five mask input. The “mother” mask is “Cycle Process Definition”. Others mask can be open in accordance with the showed link. Therefore, the set-up of input part provides the opening of new input mask named “Part requirement”. Then, after the close of precedent mask (Part requirement), by clicking on Cycle time, it is possible set-up the distribution time and its parameters. The procedure continues just the same to set-up others parameters as Products, Labor Requirement, and so on...

4. Software architecture

The basic idea in developing this architecture is to reduce the operations and development time. In particular, the standard operations such as creating a process, set

a cycle time and place machines, assign jobs to machines, change the name of an element, and so on... These operations have not great difficult of implementation but they absorb a lot of time. The software architecture is made up of an application in VBA code connected to Access database, Excel, 3d DES tool. Figure 2 shows the framework of software architecture.

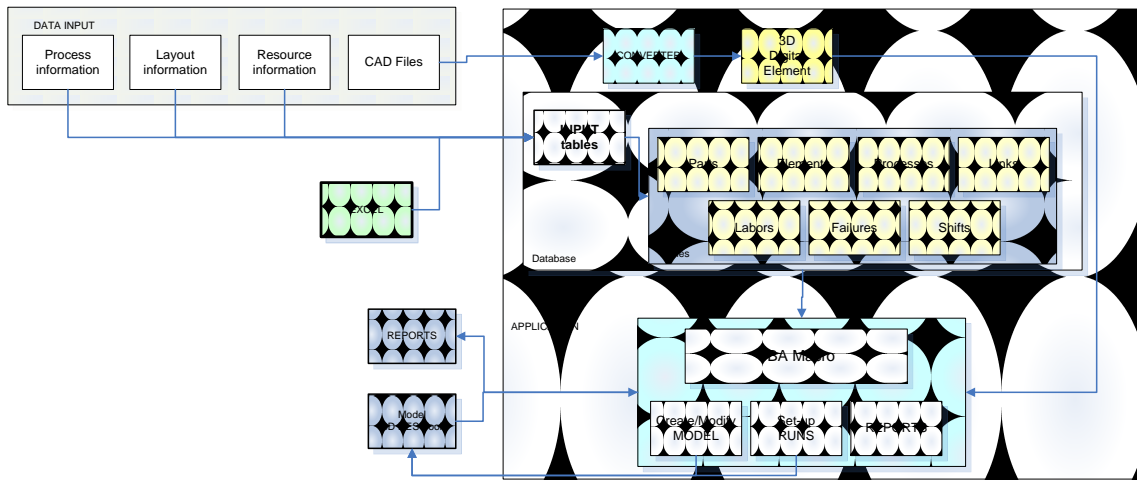


Figure 2

The input data are inserted by input tables in ACCESS software organizing for each element. For example, the input table for part creation, see figure 3, allows to set-up the name of part and path-file to insert 3D CAD file. Moreover, the input table allows us to be always aware of the parts already built, avoiding check-operations that in the procedure of the 3D DES are time-wasting considerable.

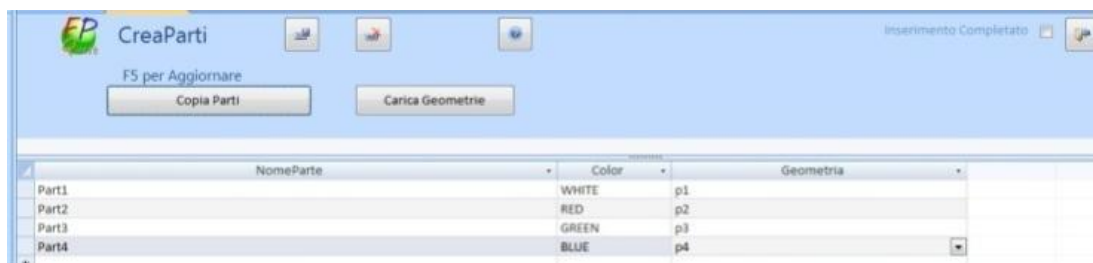
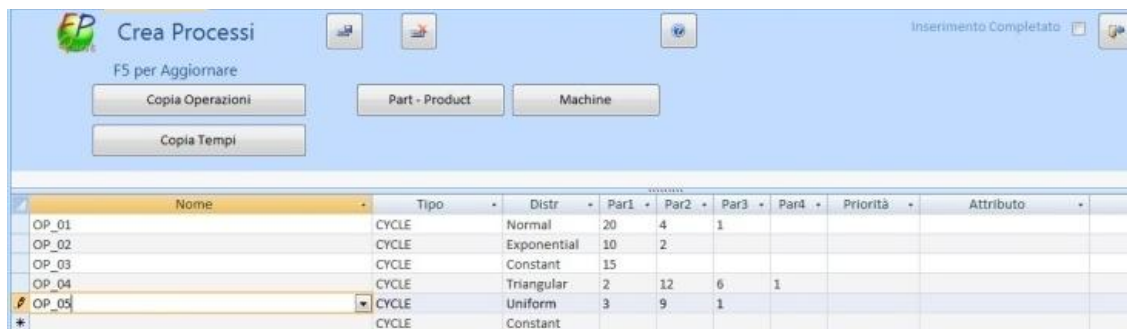


Figure 3

Figure 4 shows the input table for process. Besides the possibility of multiple insertions, the user can set the cycle time and some of its parameters in the same table. The ability to simultaneously view all processes reduces inspection time and the probability of compilation errors.



The screenshot shows the 'Crea Processi' window with a table of process parameters. The table has columns for 'Nome', 'Tipo', 'Distr', 'Par1', 'Par2', 'Par3', 'Par4', 'Priorità', and 'Attributo'. The data rows are as follows:

Nome	Tipo	Distr	Par1	Par2	Par3	Par4	Priorità	Attributo
OP_01	CYCLE	Normal	20	4	1			
OP_02	CYCLE	Exponential	10	2				
OP_03	CYCLE	Constant	15					
OP_04	CYCLE	Triangular	2	12	6	1		
OP_05	CYCLE	Uniform	3	9	1			
*	CYCLE	Constant						

Figure 4

Other input tables concern labors, shifts, breakdowns, machines, conveyors, source and sink. A converter is available to translate in .vrl format the 3D files for elements (parts, machines, conveyor, ect...).

The application allows also optional input data procedure. Often, data are already available in Excel file and so, the application allows to import many data to external file. This function is very efficient and allows a great saving of time.

After the compilation of input tables, a set of routines and macros in VBA allows to write automatically BCL instructions. Further, the grouped instructions can be launched by an interface. Finally, the model is automatically created in the 3D DES. Since the application provides also the setting of experimental run, the simulation can be launched. Finally, the results can be viewed without opening the 3D DES tools.

5. Validation and Results

A specific tuning phase is been done to validate each function of application. Several models are been implemented and running to examine the correct functioning. Before simple models with few parts, some machines and linear work-flow are been modeling to check the followed functions: Create Part, Create Process, Create Element, Locate Element, Connect Element, Set Cycle Time, Assign Process To Machine, Set Part Routing, and so on. After, some models with particular aspects are been developed to test functions as Failure, Shift, Create Labor, Create Conveyor, Create Buffer, Set Geometry and so on. To compare the our application with actual modeling procedure,

the kind of model to simulation affects the results since depend on number and kind of elements and functions. For a better evaluation of advantages of application a comparing for each function is been done. Certainly the modeling time is a effective parameter of comparison but it can be affect by experience of user. For this reason, both modeling time that elementary operations are evaluated in comparison. In our analysis, elementary operations are each operation to do to model an element or function. It means that opening and closing of input mask, set up of name or number, to put file-path for 3D geometry, and so on are all elementary operations. Figure 5 and figure 6 show time comparison and “elementary operations” comparison.

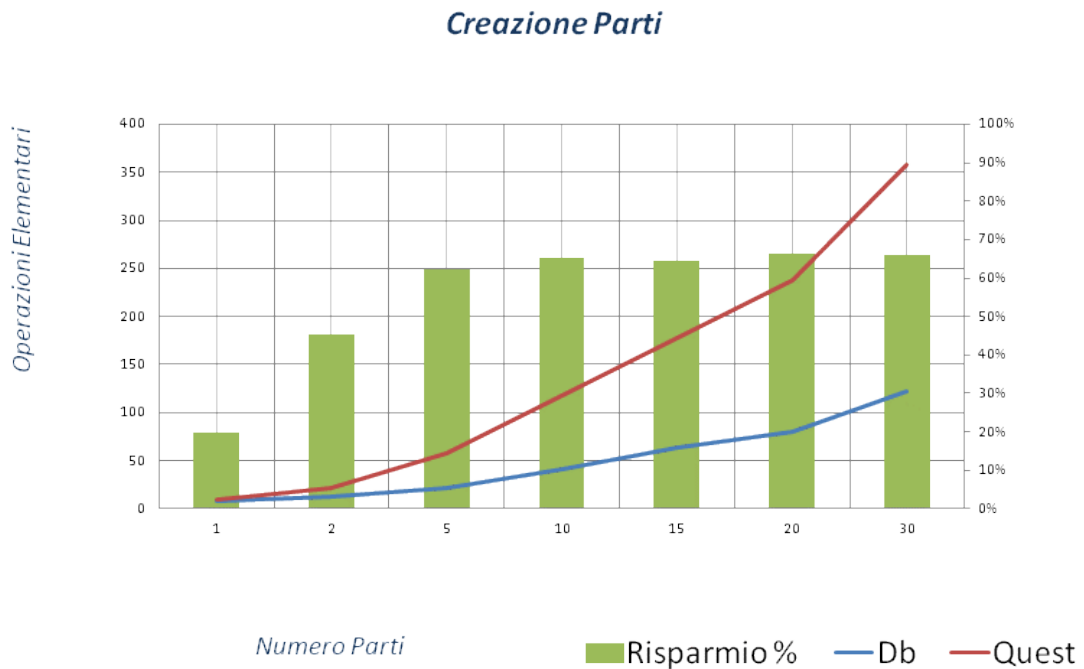


Figure 5

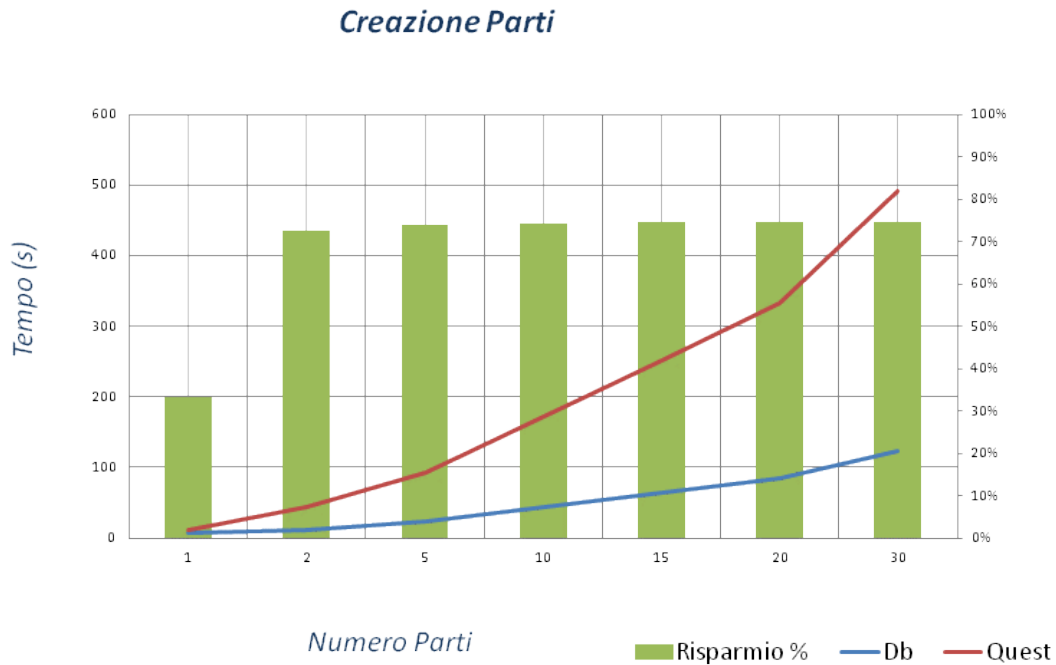


Figure 6

In the pictures software architecture is named “Application”. The comparison is been done for a created number part since 1 to 30. Both graphics show a saving both of elementary operations (20%-65%) that develop time (60%-80%). For shortness, others graphics are not exhibited but all developing functions show savings from 15% to 80% both operations and time. These savings are obtained also modifications of model are necessary. In this case, the advantages are wider.

Nevertheless, the advantages are not quantitative only. The our software architecture shows many qualitative advantages. Firstly, during the development of model, user has the possibility of quick check of all implemented functions. This reduces errors and check time. Secondly, user has the possibility to use the module to set-up of experimental runs that launch automatically the simulation. User can run the model and to analyze reports without opening directly the software. Thirdly, database structure facility the phase of change of a model. Fourthly the converter model allows immediately conversion of 3D geometries. The old procedure of conversion need 2-3 minutes for each geometry. Finally, user has the possibility to develop the model on computer without 3D DES tool license, in off-line way. Instead, license is necessary to launch the model and to simulate the manufacturing environment.

6. Conclusion

This paper wants to show as, by the use of an architecture software founded on a database, is possible to reduce the development time of a model of simulation. The high costs sustained for the analysis of an manufacturing environment by a DES are due to two motives: high costs of license and high times of development of the model and analysis. A reduction of development time can involve a reduction of the costs and therefore to also favor the use of this technique in small enterprises. In spite of many quantitative and qualitative advantages showed, the “efficiency” of software architecture is not always demonstrated. Figure 7 shows the relationship between “Efficiency of application” and “Complexity of model”.

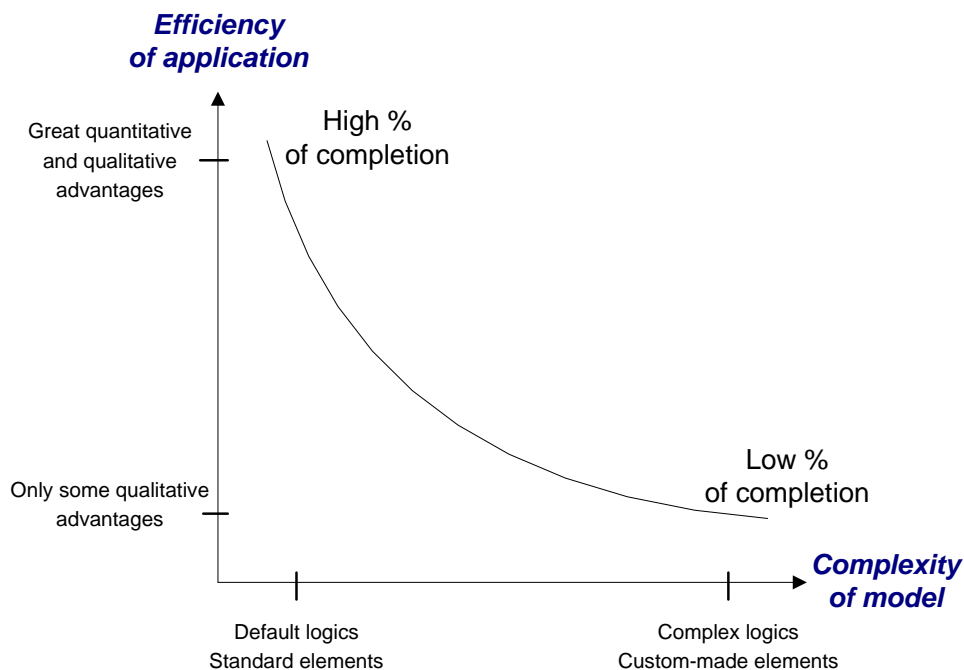


Figure 7

Many tests on real manufacturing systems have showed that if the model to simulate is very complex, then only a part of model can be developed in our application. In this

case, the percentage of completion is low and it obtain only qualitative advantages. Instead, where the model provides many standard elements and default logics, then it obtain high percentage of completion and many advantages.

- [1] Westkamper, E.; Gottwald, B.; Fisser, F., 2005, Migration of the digital and virtual factory to reality. CIRP Journal of Manufacturing Systems, no 34(5), p. 391-396
- [2] Fruggiero, F.; Tesi di Dottorato
- [3] Bracht, U., Masurat, T., 2005, The Digital Factory between vision and reality, Computers in Industry, 56: 325-333
- [4] Bzymek, Z. M.; Nunez, M.; Li, M.; Powers, S.; Simulation of a Machining Sequence Using Delmia/Quest Software
- [5] Kuehn, W.; Digital Factory – Integration of Simulation from product and production planning towards operative control
- [6] Zulch, G., Grieger, T., 2005, Modelling of occupational health and safety aspects in the Digital factory, Computers in Industry, 56: 384-392
- [7] Wohlke, G., Schiller, E., 2005, Digital Planning Validation in automotive industry, Computers in Industry, 56: 393-405
- [8] Fruggiero, F., Lambiase, A., The Digital Factory Concept from Manufacturing to Services Environment, 2009, Flexible Automation and Intelligent Manufacturing, FAIM '09, Middlesbrough, July
- [9] Lambiase, A., Lambiase, F., An integrated approach to the analysis of automotive assembly activities using digital manufacturing tools, 2008, Int. J. of Internet Manufacturing and Services, Vol.1, 2:160-175
- [10] Lambiase, A., Lambiase, F., Palumbo, F., Effectiveness of Digital Factory for simple repetitive task simulation in medium-small enterprises, 2007, CARV '07, Toronto, 22-24 July

2.4 Conclusioni – Discrete Event Simulation

In questo capitolo sono stati presentati 2 articoli scientifici che trattano su aspetti diversi il Discrete Event Simulation.

Il primo articolo tratta lo studio di ottimizzazione attraverso il DES in ambiente DF condotto su un caso reale mostrando come è possibile modellare un sistema complesso, trasferirlo in ambiente digitale e poi analizzare soluzioni alternative di ottimizzazione. I risultati ottenuti in termini di soluzioni migliorative, anche se ottenuti in una simulazione, rappresentano comunque una indicazione realistica di quello che si potrebbe realizzare implementando le soluzioni realmente. Da punto di vista della modellazione, la metodologia DES è chiaramente sviluppata per l'ambito produttivo, facilita la costruzione del modello poiché permette, attraverso blocchi logici predefiniti, di riprodurre il sistema produttivo seguendo lo schema di flusso del processo. Tuttavia, quando i comportamenti e le situazioni da modellare non rientrano in un gamma predefinita nel software, l'utilizzo di linguaggi di programmazione è necessario diventando un ostacolo per l'utente. Il training richiesto per realizzare un modello di media complessità è di circa 3 o 4 mesi e questo significa che le aziende che vogliono sfruttare un tool di ottimizzazione come il DES, devono sostenere costi di training iniziali elevati. I tempi di sviluppo dei modelli sono fortemente influenzati da operazioni e procedure di inserimento dati ripetitive. Sa da una parte, la procedura di modellazione del software facilita un miglior "understanding" del funzionamento logico del software, dall'altra un utente esperto è costretto a lunghi tempi di sviluppo che per circa il 50% sono dovuti a operazioni a non valore aggiunto.

Nel secondo articolo è stata presentata un'architettura software con interfacce semplificate per lo sviluppo di modelli di simulazione. Il processo di comparazione rispetto alla procedura standard ha mostrato, sia su impianti modello che sul caso reale Confalone, che la riduzione dei tempi di sviluppo è superiore al 50%. Inoltre, la struttura di immissione dati permette una visione di insieme dei dati mentre specifiche funzioni permettono di caricare dati da fogli elettronici precompilati. Questo tipo di applicazione può quindi essere di supporto e facilitare l'utilizzo di questo tool di simulazione nelle piccole e medie imprese che operano in ambito manifatturiero.

Capitolo 3
Agent Based Modeling

3.1 Introduzione

Il termine Agent Based Modeling significa letteralmente modellazione basata su agenti. Questa tipologia di modellazione si è sviluppata recentemente ed è nata circa un decennio fa nel mondo della ricerca.

La sua nascita è stata favorita dalla ricerca di strumenti di simulazione in grado di catturare logiche di comportamento differenti rispetto a quelle modellate attraverso Discrete Event Simulation o System Dynamics. In particolare, i modelli tradizionali non sono capaci di modellare un sistema fatto da una popolazione di “oggetti attivi” che interagiscono fra di loro attraverso la comunicazione tra singoli oggetti. Lo scopo era quello di capire il comportamento di un sistema complesso senza conoscere le leggi che lo regolano ma conoscendo il comportamento del singolo oggetto attivo.

Questo stravolge la tipologia di costruzione di un modello poiché al tradizionale approccio top down viene sostituito un approccio bottom up che prevede di identificare il singolo oggetto attivo (agente) e di definire il suo comportamento attraverso regole semplici.

Questo tipo di modellazione che ben si adatta a sistemi sociali, economici, popolazioni, poche volte è stato applicato a sistemi produttivi. In particolare in letteratura non sono presenti specifici casi di utilizzo dell' ABM per la simulazione di linee produttive.

L'attività di ricerca degli ultimi due anni del dottorato si è concentrata nello studio di questa metodologia “non-standard” per verificare l'applicabilità di tale approccio a sistemi come una linea di produzione. L'obiettivo dello studio è stato quello di analizzare la fase di costruzione del modello identificando i vantaggi e gli svantaggi rispetto al DES, la tipologia di informazioni che è possibile estrapolare dalle simulazioni e le potenzialità di inglobare comportamenti specifici e complessi in particolare rispetto agli Human Factors.

Il risultato di questa attività di ricerca è stato poi sintetizzato nell'articolo presentato a fine capitolo:

- Agent Based Modeling of Movement Rules in DRC systems for Volume Flexibility - Human Factors and Technical Performance
M. Sammarco, P. Neumann, F. Fruggiero, A. Lambiase
(in corso processo di revisione – International Journal of Production Research)

3.2 Dual Resource Constraint System

La scelta del tipo di sistema produttivo e il tipo di analisi da effettuare si è basata sul fine ultimo dello studio che era quello di valutare l'applicabilità dell' ABM in una linea di produzione testando le caratteristiche necessarie per tener conto di fattori come gli Human Factors.

La scelta è ricaduta su un Dual Resource Constraint ampiamente trattato in letteratura. Dato un sistema di produzione composta da un numero n di macchina che richiedono la conduzione, un DRC è un sistema dove il numero m degli operatori, definita nell'articolo workforce size, è inferiore al numero di macchina, quindi $m < n$. Il sistema produttivo così definito oltre al essere vincolato dalla risorsa macchina e vincolato anche dalla risorsa uomo.

In letteratura, numerosi studi sono stati presentati su i DRCs e in particolare alcuni studi, hanno investigato le regole di assegnazione degli operatori alle macchine. E' chiaro che l'assegnazione degli operatori a una qualsiasi macchina sottintende un cross-training generale per la manodopera.

Tra le differenti regole di assegnazione degli operatori alle macchine presenti in letteratura, possiamo distinguere le seguenti tre come quelle più adottate e studiate:

- Regole "**Where**": sono le regole utilizzate per assegnare un operatore ad una macchina. Ad esempio, la scelta della macchina può essere casuale (RDN), o può dipendere dalla "prenotazione" della attività sulla macchina secondo uno schema "first come, first served" e quindi la prima macchina in ordine temporale che è in attesa dell'operatore è quella scelta per l'assegnazione.
- Regole "**When**": sono le regole che determinano quando l'operatore può lasciare la macchina. In letteratura ne sono presenti due: "centralizzata" e "decentralizzata". La prima prevede che l'operatore possa essere assegnato ad un'altra macchina quando conclude una singola attività, la seconda invece prevede che l'operatore debba concludere tutte le attività in coda nel buffer della macchina per poter essere disponibile ad un'altra assegnazione.

- Regola “*Who*”: questa regola definisce chi tra gli operatori disponibili debba essere assegnato all’attività pending su una specifica macchina

Analizzando gli studi su i DRC system, tra i parametri che possono influenzare le performance del sistema non viene analizzato il tempo di trasferimento di un operatore da una macchina all’altra. Una ulteriore considerazione è che la quasi totalità dei sistemi analizzati sono dei job-shop.

3.3 La costruzione del modello e le ipotesi

Molte definizioni di agente e di sistema multi agente esistono in letteratura ma possiamo riferirci alle seguenti:

- Agente: è un sistema computazionale che è situato in un ambiente dinamico ed è capace di esibire un comportamento autonomo e intelligente
- Sistema multi agente: è una comunità di agenti che interagiscono attraverso la comunicazione e lo scambio di informazioni

Le più importanti proprietà di un agente sono:

- Autonomia: un agente agisce nell’ambiente basandosi sul proprio stato interno
- Intelligenza: l’agente ha un’intelligenza che deriva dall’applicazione di regole specifiche di comportamento
- Interazione: l’agente è capace di interagire con l’ambiente e gli altri agenti presenti in esso
- Adattamento: l’agente adatta il suo comportamento ai cambiamenti dell’ambiente esterno

In un sistema multi agente, le decisioni e le azioni scaturiscono dall’interazione degli agenti. In questa maniera, il comportamento dell’intero sistema dipende dall’interazione di tutti gli agenti tra di loro e con l’ambiente. Se compariamo ABM con DES o SD, il modellatore non definisce il comportamento globale del sistema ma piuttosto definisce il comportamento del singolo agente attraverso regole di comportamento. Questo tipo di approccio decentralizzato è chiamato bottom-up modeling.

La costruzione di un agente è realizzata attraverso un diagramma di stato e la definizione delle condizioni che determinano i cambiamenti degli stati stessi. Per la realizzazione di un agente che deve rappresentare una macchina (station), il diagramma di stato è quello della figura 22:

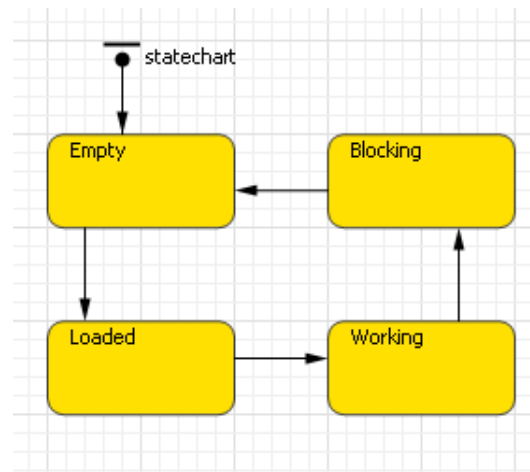


Figura 22

L'agente così costruito ha 4 stati che lo caratterizzano:

- Empty: la macchina o stazione di assemblaggio è libera e non è presente nessun prodotto o componente da assemblare.
- Loaded: sulla macchina o stazione di assemblaggio ci sono i componenti per realizzare l'attività ma manca l'operatore
- Working: sulla macchina si sta realizzando un'attività e quindi sia il prodotto/componente che la risorsa operatore sono presenti
- Blocking: sulla macchina è stata conclusa l'attività ma il prodotto o semilavorato non può essere scaricato perché il buffer a valle è pieno

Alla stessa maniera può essere costruito un agente "operatore" e un agente "prodotto/semilavorato" dotato di propri stati e regole di cambiamento degli stessi.

A questo punto, facendo riferimento ad un sistema DRC generico, descriviamo come un modello basato ad agenti può essere abile a rappresentare la complessità di un sistema manifatturiero.

Ipotizziamo un numero di macchine pari a M e un numero di operatori pari a N e assumiamo, così come è per un DRC, $N < M$.

Ipotizziamo, che un semilavorato sia presente sulla macchina. A questo punto, la macchina può essere in uno dei tre stati che la caratterizzano: load, working e blocking. Nel primo caso, la macchina è in attesa della risorsa operatore, nel secondo sia il semilavorato che l'operatore sono presenti, nel terzo caso, il semilavorato/prodotto è disponibile per essere scaricato ma il buffer a valle non lo permette. È evidente che gli eventi che caratterizzano la "storia produttiva" del semilavorato sono scaturiti dall'interazione del semilavorato con le altre risorse.

Adesso è chiaro la modellazione di un sistema produttivo con gli agenti deve sfruttare la loro capacità di scambiarsi informazioni. Questo tipo di comunicazione può avvenire come descritto nei seguenti step:

- Step 1: quando un semilavorato/prodotto viene caricato su una macchina, l'agente macchina invia un messaggio agli agenti "operatori" attraverso un protocollo di comunicazione. L'agente operatore è abile a rispondere alla chiamata, solo se è nello stato "free" ovvero libero. L'agente operatore mostra quello che viene definita: autonomia e cioè agisce a seconda del proprio stato
- Step 2: se l'operatore è nello stato "free" può ricevere le informazioni sull'attività che deve realizzare. In questa maniera conosce quale macchina o su quali macchine ci sono attività da realizzare. Con questo comportamento, l'agente operatore mostra autonomia e interazione poiché analizza il proprio stato e interagisce con l'ambiente esterno analizzando lo stato delle altre risorse raccogliendo informazioni.
- Step 3: se ci sono più macchine disponibili, l'agente operatore può realizzare una scelta utilizzando delle regole. Ad esempio quelle descritte per i sistemi DRC: regole When e Where. L'agente operatore ha quindi una propria intelligenza che gli permette di realizzare delle scelte basandosi su regole predefinite.
- Step 4: realizzata la scelta della macchina, l'agente operatore cambia il proprio stato da "free" a "moving" durante il percorso che lo porta sulla macchina e da "moving" a "busy" quando arriva ad essa. Nello stesso istante l'agente macchina cambia il suo stato da "load" a "working". Gli agenti quindi manifestano la loro proprietà di adattarsi perché adeguano i loro stati a quegli altri agenti e dell'ambiente.

A questo punto, descritto il meccanismo di funzionamento di un sistema ad agenti, assumiamo come sistema di produzione da modellare un flow-shop di assemblaggio con 8 macchine e 7 buffer intermedi.

Ipotizziamo un tempo ciclo per ogni macchina così come definiti

Macchina _j	1	2	3	4	5	6	7	8
Tc _j [min]	2	1.8	2.2	1.9	2.1	1.7	2.2	2.1

Il tempo ciclo medio della linea è pari a 2 minuti, l'indice di massimo sbilanciamento è pari a 0,3 minuti, l'indice di sbilanciamento della linea pari a 1,2 minuti e lo "smoothness index" pari a 0,24 min² così come definito nell'equazione (#)

$$SX = \sqrt{\sum_{j=1}^8 (Tc_j - \mu)^2} = 0.24 \text{ min}^2 \quad (\#)$$

Lo schema di sbilanciamento usato per il modello è di tipo "w" e quindi alterna tempi ciclo maggiori e minori rispetto al valore medio. Il modello assume un buffer infinito sia a monte della linea che a valle della linea, mentre i buffer intermedi sono di dimensioni finite. Inoltre si assume un velocità media dell'operatore pari a 5 Km/h.

Per realizzare un'analisi del modello ipotizzato sotto differenti caratteristiche del modello stesso vengono scelti dei parametri: "design factors", "sensitivity factors" e "operating factors". Lo scopo è quello di investigare il modello sotto parametri differenti e differenti combinazioni di essi.

I "design factors" considerati nel modello sono i seguenti:

- Numero di operatori (workforce size): il numero degli operatori è settato in tre livelli pari a 3/5/7 rispettivamente per ottenere uno "staffing level" pari a 37.5%/62.5%/87.5%. In una successiva analisi, il numero di operatori è stato posto pari a 8 per ottenere un "full staffing" di comparazione. Nel considerare il numero di operatori un "design factor" occorre fare una riflessione: se si considera questo fattore un vincolo stabilito a priori per ragioni sindacali o di sicurezza, allora è giusto considerarlo come un fattore di progettazione. Se invece, il numero di operatori può essere variato in maniera flessibile, occorre considerarlo come un "operating factor" perché esso può cambiare nel breve/medio periodo.
- Distanza tra le macchine (Distance): la distanza tra le macchine è un fattore di progettazione perché essa può variare per vincoli di sicurezza, dimensione dei prodotti, sistemi di scarico e carico. Nel modello si assumono due livelli: Lo=3m e Hi= 6m.

- Capacità dei buffer: per i buffer tra le stazioni sono assunti due livelli di capacità: $Lo=1$ e $Hi=5$.

Il “sensitivity factor” considerato nel modello è:

- Coefficiente di variazione CV: i tempi ciclo per la realizzazione delle attività sulle macchine sono modellati con una distribuzione Gamma. In questa maniera il modello contempla la variabilità insita dell’operatore. I livelli per il CV sono stabiliti in 7.7% e 21.2% e rientrano nel range definito per attività manuali.

Gli “operating factors” considerate nel modello sono:

- Regola “When”: come negli studi sui DRCs, nel modello si assume questa regola di controllo per definire quando l’operatore può lasciare la macchina sulla quale ha completato l’attività. Nel modello si assumono due differenti strategie precedentemente descritte: “Centralizzata” e “Decentralizzata”.
- Regola “Where”: gli operatori vengono assegnati alle macchine con attività disponibili attraverso queste regole. Nel modello vengono utilizzate sei regole diverse:
 - Random, quindi scelta casuale della macchina disponibile
 - Upstream, quindi scelta della macchina disponibile più a monte nel processo
 - Downstream, quindi scelta della macchina più a valle del processo
 - Closest, quindi scelta della macchina più vicina
 - Max-time, quindi scelta della macchina con tempo ciclo maggiore
 - Min-time, quindi scelta della macchina con tempo ciclo minore

Dopo aver descritto le variabili indipendenti del sistema, per poter valutare i risultati delle simulazione vengono scelte alcune variabili dipendenti classificandole in “System Effects” e “Human Effects”.

I “System Effects” fanno riferimento alle prestazioni del sistema produttivo e sono:

- Tasso di produzione (Production rate): è uno degli indici più comuni utilizzati ed è calcolato in termini di produzione oraria basandosi sull’intero periodo di simulazione.

- WIP: è una importante misura per un sistema di produzione poiché rappresentando il totale dei prodotti presenti nel sistema questo è direttamente legato ai costi.
- Flow – time: è il tempo di attraversamento della linea ed è correlato con il WIP.

In aggiunta alle misure di performance del sistema, sono state utilizzate due misure chiamate “Human effects” perché influiscono direttamente sul carico di lavoro degli operatori:

- Saturazione (Utilization): rappresenta una tipica misura di quanto l’operatore è saturo nel performare le attività. Si assume la saturazione pari alla media della saturazione degli operatori.
- Mean switching rate: rappresenta il valore medio del numero di movimenti tra le stazioni per singolo operatore e per ogni ora.

Definite le variabili dipendenti e indipendenti del modello, è stata completata la costruzione attraverso l’implementazione degli agenti utilizzando il software Anylogic 6.5 (www.xjtek.com).

Per condurre l’analisi del modello è stata progettata una campagna di esperimenti seguendo la metodologia DOE. Il numero di condizioni sono state pari a 288 (6 Regole WHERE * 3 NUMERO DI OPERATORI * 2 DISTANZA * 2 CAPACITA’ BUFFERI * 2 CV * 2 Regole WHEN) con un numero di replicazione pari a 30 per ogni condizione per un totale di 8640 run di simulazione. La lunghezza del periodo di simulazione fissata a 20000 minuti e un transitorio iniziale di 2000 minuti. Una analisi ANOVA è stata realizzata con un p-Value pari a 5%. L’analisi statistica è stata effettuata con il software MINITAB (Versione 15).

Inoltre una ulteriore campagna di simulazioni è stata effettuata con un numero di operatori pari a 8 per permette un confronto con un sistema produttivo che non si configura come DRC.

Nella tabella seguente i risultati dell’ analisi della varianza:

Tabella 1: Analisi della Varianza

Source	PRODUCTION RATE		WIP		FLOW TIME		UTILIZATION		MEAN SWITCHING	
	F	p	F	p	F	P	F	p	F	p
When	4137506.78	0.000	6556.25	0.000	28840.12	0.000	6173931.44	0.000	122351000.00	0.000
Worker	301734000.00	0.000	1041.74	0.000	346103.77	0.000	138034.31	0.000	2620208.90	0.000
Distance	32843.57	0.000	0.10	0.758	253.57	0.000	135121.64	0.000	420859.89	0.000
Where	63357.61	0.000	31036.03	0.000	75641.80	0.000	162412.60	0.000	86768.47	0.000
Buffer	887106.16	0.000	734830.83	0.000	1009487.96	0.000	1279979.33	0.000	4822624.99	0.000
CV	28616.63	0.000	108.48	0.000	119.52	0.000	19806.03	0.000	22262.00	0.000
When*Worker	200576.33	0.000	566.15	0.000	350.57	0.000	26782.49	0.000	953293.83	0.000
When*Distance	32711.69	0.000	0.65	0.421	264.57	0.000	134532.32	0.000	420486.74	0.000
When*Where	5953.81	0.000	2989.21	0.000	7891.85	0.000	12125.40	0.000	179361.75	0.000
When*Buffer	750930.96	0.000	5438.70	0.000	17497.70	0.000	1061594.00	0.000	5923192.35	0.000
When*CV	2388.34	0.000	18.73	0.000	15.81	0.000	4843.38	0.000	156645.54	0.000
Worker*Distance	32881.91	0.000	1.40	0.248	305.87	0.000	134501.35	0.000	420956.89	0.000
Worker*Where	20096.97	0.000	8790.05	0.000	30393.67	0.000	54567.70	0.000	151909.04	0.000
Worker*Buffer	57130.46	0.000	323.33	0.000	64670.74	0.000	6736.27	0.000	135713.57	0.000
Worker*CV	27961.39	0.000	12.52	0.000	14.57	0.000	21900.45	0.000	37248.34	0.000
Distance*Where	181.31	0.000	1.82	0.105	12.35	0.000	686.79	0.000	99528.95	0.000
Distance*Buffer	1.52	0.217	0.31	0.579	47.74	0.000	0.33	0.565	11.80	0.001
Distance*CV	4.05	0.044	0.03	0.852	0.29	0.587	28.25	0.000	85.51	0.000
Where*Buffer	5993.57	0.000	11380.86	0.000	24679.76	0.000	15911.53	0.000	7169.74	0.000
Where*CV	686.34	0.000	43.82	0.000	36.95	0.000	2514.32	0.000	1493.58	0.000
Buffer*CV	17632.16	0.000	85.99	0.000	61.74	0.000	15525.61	0.000	417.72	0.000
S		0.0219759		0.901650		2.86558		0.000962235		0.0682705
R-Sq		100.00%		99.26%		99.71%		99.93%		99.99%
R-Sq (adj)		100.00%		99.24%		99.70%		99.93%		99.99%

Molte delle variabili mostrano effetti statisticamente significativi. Un'analisi dettagliata degli effetti principali e degli effetti dovuti alla interazione di coppie di variabili indipendenti è stata realizzata. I grafici degli effetti (principale e di interazione) vengono riportati nell'articolo allegato a fine capitolo.

3.4 Risultati

I risultati in termini di effetto della singola variabile indipendente e di effetto dell'interazione di coppie di variabili è stato analizzato. L'analisi esaustiva dei risultati è riportata nell'articolo allegato a fine capitolo.

Rispetto ai "operating facotr", i risultati mostrano che la scelta di una specifica regola "Where" ha una bassa influenza sul tasso di produzione. Questo risultato concorda con gli studi di altri ricercatori (Treleven, Elvers e Fryer). Al contrario tale scelta influisce maggiormente sulle altre variabili dipendenti con effetti di interazione elevati con il

numero di operatori e la capacità dei buffer. In particolare, con un numero di operatori basso e una capacità dei buffer alta, la scelta deve ricadere sulla strategia Downstream. Questa scelta permette di ottenere un tempo di attraversamento del sistema e un WIP più basso.

Analizzando gli effetti singoli della variabile definita regola “When”, la scelta deve ricadere sulla strategia “Decentralizzata” che permette di massimizzare la produzione. Se al contrario, l’obiettivo è ridurre il tempo di attraversamento e il WIP, allora è consigliabile scegliere la strategia “Centralizzata” poiché permette cambi di stazione più frequenti con ridotto accumulo di semilavorati nei buffer. In quest’ultimo caso si ha anche una riduzione della saturazione degli operatori.

È chiaro quindi che la scelta della tipologia di strategia per ogni singola regola dipende dagli obiettivi. Per massimizzare il tasso di produzione, la scelta deve ricadere sulla strategia decentralizzata per la regola “When”. Se invece si vuole ridurre WIP e tempo di attraversamento, la combinazione di una strategia “Centralizzata” per la regola “When” e di una strategia Downstream” per la regola “Where” risulta essere la più vantaggiosa. Rispetto alle variabili dipendenti definite come “Human Effects”, saturazioni più basse si ottengono con regole “Where” come Upstream e Min-time, mentre le più alte con la strategia Downstream. Per quanto riguarda il Mean Switching rate, l’effetto principale è ottenuto dalla scelta della regola “When”. Difatti con la strategia decentralizzata si ottiene solo un quarto delle movimentazioni rispetto alla strategia centralizzata.

Analizzando invece gli effetti dei “design factors”, la sola variabile indipendente che mostra risultati interessanti è la capacità dei buffer. Mentre l’effetto principale di tale variabile è trascurabile, la combinazione con altre variabili mostra effetti significativi. Per esempio, quando il valore della capacità dei buffer è pari a 1, la scelta di quale regola “When” utilizzare ha un effetto inferiore al 3% sul tasso di produzione mentre quando il valore della capacità dei buffer è settato a 5, se si sceglie la strategia decentralizzata per la regola “When” si ottiene un effetto positivo sul tasso di produzione dell’ 8%. L’effetto della variabile capacità dei buffer ha, come atteso, una forte influenza sul WIP sia singolarmente che correlata ad altre variabili. In particolare con una scelta della capacità dei buffer pari a 5, i risultati in termini di WIP della scelta della regola “Where” tendono a differenziarsi. In particolare, se il valore della capacità è pari a 1, la differenza tra la strategia Downstream e Upstream, per la regola “Where”, è del 61% in termini di WIP mentre con una capacità pari a 5 è del 117%.

La campagna di esperimenti ha voluto confrontare i risultati della linea in configurazione DRC con la stessa linea con un numero di operatori pari a 8 operatori e quindi un operatore per ogni singola macchina. I risultati in termini di tasso produzione

premiano la configurazione “full- staffed” ma se si valuta la produttività, vedi fig.23, i risultati premiano nettamente la flessibilità di una linea in configurazione DRC.

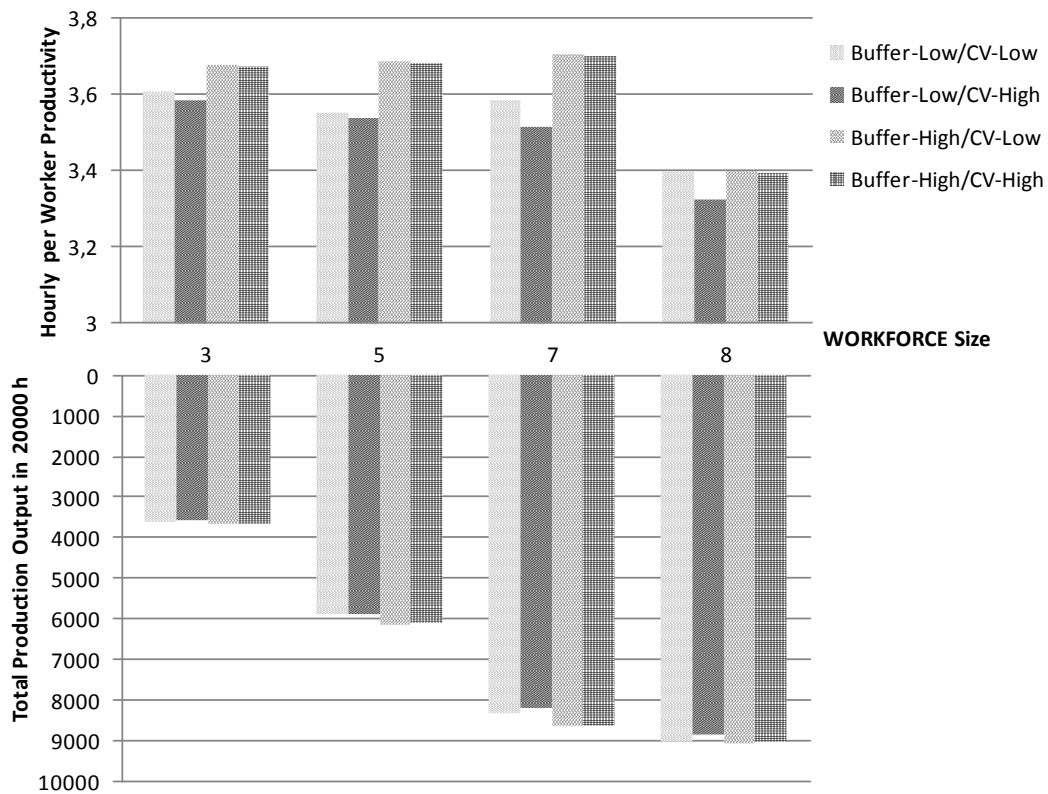


Figura 23

3.5 Conclusioni – Agent Based Modeling

L’attività di ricerca descritta in questo capitolo vuole essere il tentativo, speriamo riuscito, di proporre una metodologia di simulazione dei processi produttivi attraverso un nuovo paradigma rappresentato dalla modellazione ad agenti.

Quello che si intravede da questo studio è sicuramente una miglior capacità rispetto ad altri approcci di inglobare nel modello aspetti relativi ai fattori umani. Negli ultimi anni, numerosi ricercatori hanno dimostrato che una cattiva considerazione dei fattori umani nella progettazione e nella ottimizzazione dei sistemi produttivi si traduce in costi per le aziende a causa di fenomeni di assenteismo, problemi di qualità dei prodotti e di sicurezza. La possibilità di integrare fattori umani nei tool utilizzati nello studio dei sistemi di produzione rappresenta uno dei punti di forza della metodologia

ABM. Nel modello realizzato è stato possibile analizzare la relazione tra le strategie di assegnazione degli operatori alle macchine e fattori di progettazione come la capacità dei buffer o il numero di operatori presenti sulla linea. La saturazione degli operatori può essere valutata al fine di riconoscere la mancanza di un adeguato tempo di riposo mentre lo switching rate può dare delle indicazioni sulla ripetitività delle attività svolte dall'operatore.

Se si guarda ad approcci come il DES, il fattore umano è sempre stato modellato in termini di variazione delle performance. L'approccio di modellazione di ABM permette a mio avviso di inglobare nuovi parametri nelle simulazioni come ad esempio la fatica.

Dal punto di vista computazionale e tecnico, la metodologia ABM si posiziona tra il Discrete Event Simulation e il System Dynamics. In letteratura il DES è definito come una tecnica di modellazione caratterizzata da lunghi tempi di costruzione dei modelli ma da un livello di dettaglio elevato che ne incrementa l'accuratezza e la credibilità rispetto ad altre tecniche. Differentemente, SD è ritenuto un approccio limitato a causa della tipologia di modellazione a flussi che rende necessario un livello di astrazione elevato. La modellazione ad agenti mostra i vantaggi di entrambi poiché richiede meno dati e tempi di sviluppo del DES e ha un livello di dettaglio maggiore rispetto al SD.

3.6 Articolo

Agent Based Modeling of Movement Rules in DRC systems for Volume Flexibility - Human Factors and Technical Performance

M. Sammarco*

Dept. of Industrial Engineering – D.I.In., University of Salerno Via Ponte don Melillo 1, 84084, Fisciano (Sa), Italy. Email: msammarco@unisa.it

F. Fruggiero

Dept. Ingegneria e Fisica dell’Ambiente – D.I.F.A., Università degli Studi della Basilicata, Via Ateneo Lucano 10, 85100, Potenza, Italy.

Email: fabio.fruggiero@unibas.it

A. Lambiase

Dept. of Industrial Engineering – D.I.In., University of Salerno Via Ponte don Melillo 1, 84084, Fisciano (Sa), Italy. Email: lambiase@unisa.it

W.P. Neumann

Human Factors Engineering Lab, Dept. of Mechanical and Industrial Engineering, Ryerson University, Toronto, Canada. Email: pneumann@ryerson.ca

Abstract

This research applies Agent Based Modeling (ABM) to study volume flexibility in a Dual Resource Constrained (DRC) assembly flow shop environment. The simulation experiment evaluated System and Human Effects of varying DRC system staffing levels according to Design (i.e., Workforce, Distance and Buffer Capacity), Sensitivity (i.e., Coefficient of Variation) and Operating (i.e., When-rule and Where-rule) factors. Results showed that the rule by which workers are assigned to workstations affects WIP and Flow Time performances more than production rates. Furthermore per-worker productivity was found to increase, compared to the fully staffed system, particularly where the Downstream movement rule was applied. Using the Downstream rule when changing stations after completing current tasks reduced Flow Time (-15%) and WIP (-10%). If another Where-rule is chosen then it may be preferable for workers to move only after completing all jobs in the station (Decentralized rule). For Utilization rates and Mean hourly Switching of work (Human Effects), the model shows complex relationships depending on almost all evaluated factors. The novel ABM approach used here enabled the evaluation of emergent system behaviors and showed potential to help firms understand both human and performance effects of operational choices in efforts to achieve volume flexibility.

Keywords: Human Factors, Volume Flexibility, Agent Based Modeling, DRC, Strategy, Ergonomics

INTRODUCTION

In the light of increasing worldwide competition and uncertainty of markets, interest is increasing in manufacturing flexibility. The issue of manufacturing flexibility has long been cited as a key competitiveness measure (De Meyer *et al.*, 1989; Volberda 1998; Boyle 2006) and a strategic sourcing (Gerwin 1993; Lau, 1996; Safizadeh *et al.*, 2000). In the literature, many conceptions of flexibility exist (Sethi *et al.*, 1990; Koste, 1999; Kara and Kayis 2004; de Treville *et al.*, 2007), and their definition and measurement remain a research issue (Koste *et al.*, 2004, Chang 2009; P. He *et al.*, 2012). This paper addresses labor flexibility, or “*workforce flexibility*”, as a managerial tool to achieve “*volume flexibility*” in production.

Volume flexibility is recognized as a strategic means of facing uncertainty in markets and growing global competition (Wernerfelt *et al.*, 1987, Goyal and Netessine 2009). The role of the workforce in supporting industrial objectives, like “*volume flexibility*”, is recognized in many studies (Brass, 1985; Kara *et al.*, 2002; Hopp and Van Oyen, 2004a; Molleman, 2007; Digiesi, 2009). Irvani *et al.* (2005) stated that in many labor-constrained systems flexibility is mostly achieved through cross-training labor. Cross-training creates an extra-capacity to effectively face demand shifts (Allen, 1963; Nelson, 1968; Fry *et al.*, 1995; Slomp and Molleman, 2002) and can provide flexible-capacity to achieve higher performance than using specialized workers (Hopp and Van Oyen, 2004b). Secondly, cross-training can help to solve human resources problems like attrition, turnover, absenteeism or illness, safety and quality of product and working life aspects (Wilke and Meertens, 1994; Fry, 1995, Slomp and Molleman, 2002).

In this paper the authors will examine the choice of “operating” rules which determines the dynamic assignment of workers to work stations in high labor intensity tasks. Such a system operating with workforce size less than the number of stations is defined as a Dual Resource Constraint (DRC) one (Treleven, 1989). The operating rules here can affect the performance of the DRC systems in terms of system and human effects.

This study presents a case study (see fig. 2), related to a real assembly line where a small group of assembly workers are responsible for the entire final assembly process for units of scheduled at their technology unit (Ohno,1988). The assembly process is broken in individual steps and completed by different assemblers in a flow sequence. It has been analyzed using an Agent Based Modeling (ABM) approach (see fig. 1), which could be a new paradigm to modeling human complexity overcoming Discrete Event Simulation's (DES) weaknesses (Bankes 2002). The paper also includes a

comparison of “understaffed” conditions to a “fully staffed” system with 8 workers and 8 work stations. In this environment the consideration of Human Factors (HFs), such as team working policies, in production paths could become a critical factor in achieving production targets (McCreery and Krajewski 1999). Nevertheless, consideration of human aspects in Operations Systems (OS) are often neglected in production design and optimization research, despite many case studies demonstrating how embedding HFs in OS realizes benefits both in terms of technical performance and human effects (e.g., Neumann and Dul, 2010). Cost-benefit analysis, demonstrates a positive return on investment (ROI) for implementing human factors & ergonomics initiatives, often in less than one year (Stanton *et al.*, 2003; Goggins *et al.*, 2008). We therefore include HF aspects in this simulation study.

DRC systems

In the DRC systems literature, several aspects of cross-trained workforce are assessed as for Hottenstein and Bowman, 1998. The performance of DRC systems is constrained by both worker and machine resources. In this context it is of fundamental importance to investigate different management policies for moving operators among stations in the system.

Possible configuration scenarios can be combinatorially analyzed based on relative workers speed. Labor priority policy could absorb variance in the work by moving the worker to wherever the work is - see the Toyota bump-back sewing and bucket brigades approaches (Bartholdi and Eistensein 1996). Sequencing workers from slowest to fastest along the direction of material flow, abolishing *a priori* work assignments or zones, could improve system performances by overcoming system imbalances (Bartholdi *et al.*, 2001). However, for many assembly lines, workers are not allowed to pass one another and blocks could occur as each station can accommodate only one worker at a time due (i.e., limited equipment and access space) and rules could oblige to fixed routes for optimization (Gel *et al.*, 2002; Armbruster and Gel 2006).

In this situation performance evaluation needs inclusion and definition of rules in order to define which task will be completed by which operator at that time. “Where”, “When” and “Who” movement rules must be considered:

“Where” rules: the rule by which the worker is assigned to a particular workstation. Researchers have studied a variety of “Where” rules including: random choice (RND); first come, first served (FCFS); first in system, first served (FISFS); shortest operation time (SOT). Several other variants based on due date, bottleneck and amount of load have also been implemented (Nelson, 1967; Fryer, 1973; Gunther, 1979; Treleven and Elvers, 1985; Treleven, 1989; Park, 1990; Hottenstein and Bowman, 1998; Salum *et al.*, 2009).

“When” rules: this rule indicates when the worker is available to move to another machine to process task. In the literature two “When” assignment are prevalently presented: “*Centralized*” and “*Decentralized*” rules (Nelson, 1967; Fryer, 1973; Weeks and Fryer, 1976; Treleven *et al.*, 1985; Park and Bobrowski, 1989; Treleven, 1989; Hottenstein and Bowman 1998).

“Who” rules: this rule indicates which worker, amongst those available, is to be transferred (Bokhorst *et al.*, 2004).

A critical analysis of the literature reveals gaps between empirical studies and modeling outcomes. *Transfer time:* first of all, the measurement of “transfer time” (i.e., the time worker needs to go from one station to another) is not always considered in workforce modeling and human resource flexibility (for more insights see: Park, 1990; Hottenstein, 1998). This could be a relevant part of manufacturing flow time, or throughput time, in processes where cycle time is quite short (e.g., in flow shop process).

Layout issues: most of the studies on DRC systems are based on job-shop settings. According to McCreery and Krajewski (1999), few studies have addressed flow-shop systems in spite of their prevalence in industry. Scarcely any studies have explored management policies for moving operators among stations in assembly flow shop systems, even though the findings obtained in job shop studies cannot be translated in a flow-shop due to its different organization. While flow time is a common performance measure in job-shop settings, other performance indexes, such as throughput and productivity ratio, are more important in flow-shops (Conway, 1967). Most of the “Where” rules investigated in the job-shop literature are based on due date evaluation, amount of total processing time of products in a queue, and other product timing indicators. In flow-shops, these “Where” rules are simpler since the system is organized in linear flow. The simplicity in rules is necessary to limit workers’ reaction time (as they identify the next station to go to) so as to not disrupt production, particularly for short cycle work. Whatever short cycle times is required, the “reaction time”, the time it takes for workers to figure out which station to move to next, is of crucial relevance. Long reaction times can increase flow time then worsening system’s performances.

Agent Based Modeling (ABM)

The most common methods used to model DRC systems and assembly lines with cross-trained workforce are Discrete Event Simulation (hereafter, DES) (Park, 1990), Linear Programming (Slomp and Molleman 2002), Mixed Linear Programming (Wirojanagud *et al.*, 2007) and Queuing Theory (Bokhorst and Gallman 2009). Unusually, this paper presents an ABM approach which warrants some introduction.

ABM is a relatively a new paradigm of system modeling (see Monostori *et al.*, 2006) with growing interest for researchers (Julka *et al.*, 2002). The authors here characterize an agent as per Monostori *et al.* (2006): “an agent is a computational system that is situated in a dynamic environment and is capable of exhibiting autonomous and intelligent behavior”. Agents could interact, communicate and exchange information each other (Bonabeau, 2002). Some common properties of a computational agent include: *Autonomy* - agents act based on both their internal state and the behavior of others in the environment; *Intelligence* - agents have some kind of intelligence from applying fixed rules; *Interaction* - agents are able to interact with their environment and other agents; *Adaptation* - agents adapt their behavior to the changes of the environment based on their programmed intelligence. Agents may represent people or technology, such as a workstation or machine, in the system being modeled.

In a multi-agent system, complex actions emerge from interactions among agents. So, a multi-agent system exhibits emergent behavior that cannot be derived from individual knowledge but from the interaction and information exchange between many agents (Monostori *et al.*, 2006). Compared to System Dynamic (i.e., SD) (Forrester, 1961) or Discrete Event models (i.e., DE) (Law and Kelton, 2000), the AB modeler does not define the global system behavior. Instead, one must characterize individual or groups of agents with specific behavioral rules, tailored to the changing environment and dependant on interaction with other agents in the population. This approach is decentralized and constitutes an archetypal methodology called “bottom-up modeling” (Borshchev and Filippov 2004).

To exemplify the plan, consider a DRC system with N workers and M stations, under condition of $N < M$. Here, stations are characterized as being in a “loaded”, “processing” or “blocked” state. In the “loaded” state, the station is waiting for a worker, whilst in the “processing” state the worker occupies the station while performing a task on the product. In the “blocked” state, the product is ready to be unloaded to a downstream buffer but the buffer is full. Similarly the worker “agent” can be considered to be in one of the states of “free”, “moving” to a workstation, or “busy” processing the product at a station. Interaction between the worker and station “agents” occurs by ongoing communication of their states. If, for example, a “free” worker becomes aware of a station in a “loaded” state, the worker may (depending on specific rules applied), move to that station and become “busy” processing the product at that workstation. In this scenario the rules of “who”, “where”, and “when” become critical to how the various worker “agents” will respond to the messages from the workstations in the environment.

METHODS

The Effective Agent Based Model

In this study the agent based architecture, as discussed above, was modelled according to three main layers. Fig. 1 shows the current shell of the ABM paradigm. An Agent “Worker”, an Agent “Station” and an Agent “Product” make rule-based decisions based on direct and indirect communications from other agents and the environment. They require knowledge of the organization rules and respecting of obligations and authority incurred by the programmed rules. A code “Dispatcher” allows agents to exchange messages composed of domain dependent contents. It manages full indirect communications acts, containing conversations plans and rules in terms of the ways in which agents work out behaviour, change states and execute orders. The "Dispatcher" takes care of space, layout, states, coordination and negotiation issues and extracts interferences among agent classes. It manages the simulation code. The agents act instances intra and inter classes. Each agent holds in state and transition conditions. Those can be executive - changing state from “free” to “moving” and then “busy” - or recursive – standing under “free” state. The arrows in figure 1 indicate the existence of rules that will act from one state to another. Each agent has more than one way to respond to an event. The agent that receives a given message can select the appropriate action based on the programmed rules.

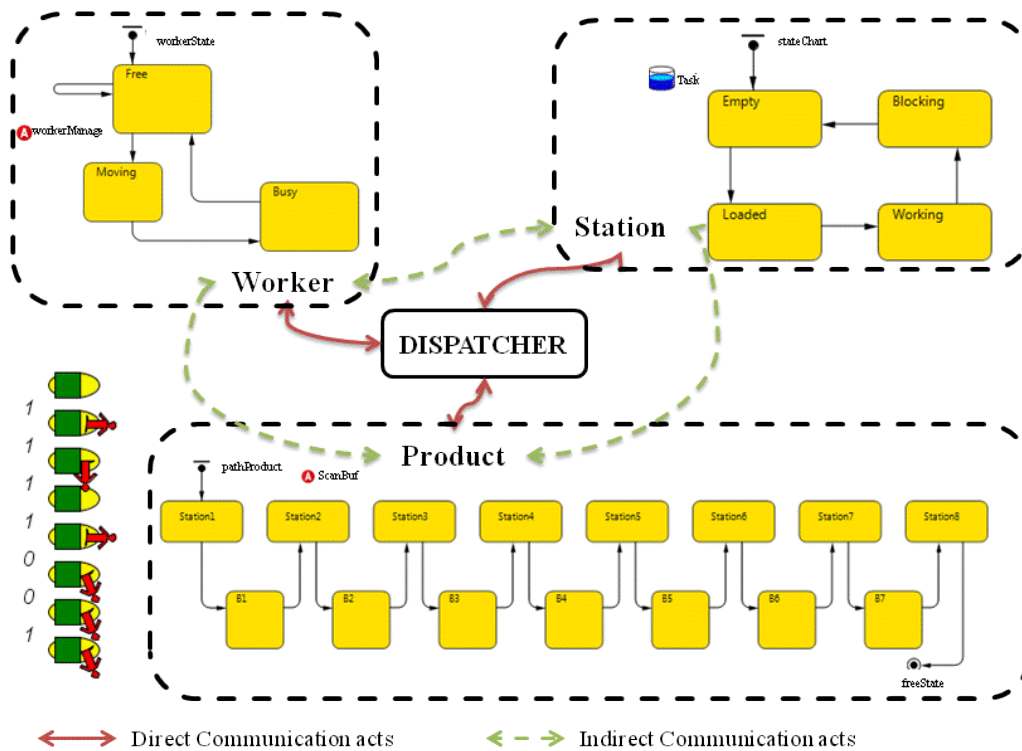


Figure 1: The Agent Based Model shell

To illustrate this process: When an inner action of the class “Product” arrives into the system, the “Station” agent reports its internal state (e.g., Empty, Loaded, Working, Blocking) to the “Worker” agents. These agents then react by querying its state (e.g., free, moving, busy) and evaluating the possibility to move towards the station agent. At this time the Worker needs to decide based on the operating rules as specified by the modeller. The Dispatcher exchanges messages with other worker agents. The Dispatcher selects station, checks the state of other workers and picks out one of them according to the operating rule. Then the selected worker would change state from “Moving” to “Busy” and the worker agent sends a communication message to the selected station ordering transition of internal state from Empty to Loaded. This conversation plan is established for each of the eight working stations that define the product’s path through the system over time. Conversation and reaction patterns then proceed to simulate the production process for each product.

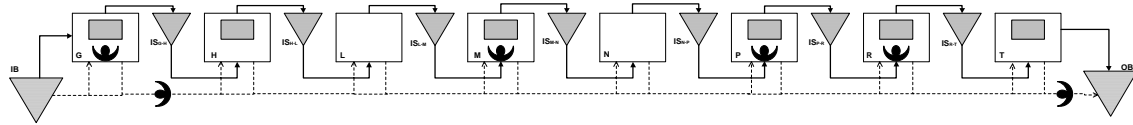
General case and assumptions

For this example, a light assembly scenario is used. The production system is based on a general flow line system consisting of eight sequential work stations, each with one between-station buffer (see fig. 2). The assigned values of cycle times are consistent with the literature (Merengo *et al.*, 1999) as for an electrical manufacturing scenario. The mean cycle time μ was 2 minutes, the maximum unbalancing index was 0.3 min, line unbalancing index was 1.2 min, the Smoothness Index (SX) was 0.24 min as per equation 1 (Elsayed and Boucher, 1994):

$$SX = \sqrt{\sum_{j=1}^8 (Tc_j - \mu)^2} = 0.24 \text{ min} \quad (1)$$

where Tc_j is the cycle time of station j and 8 is the total number of stations.

Line unbalance assumed a “w” pattern, with alternating station’s cycle times above and below the mean. The model assumed infinite buffer capacity up and downstream of the system. The modeling of workers assumed full cross-training for all workers, negligible worker reaction times, and a walking velocity equal to 5 Km/h which is consistent with the values used in the literature (Charteris, 1998; Meyers and Steward, 2002). When moving between stations, the worker’s path was assumed to be a straight line with the length equal to multiples of the distance between two consecutive stations.



LEGEND

- G,H,L,M,N,P,R,T = WorkStation Types
- IS_{i,j} = Inter-operational Storage
- IB = Input Buffer
- OB = Output Buffer
- = Worker Paths
- - - - -> = Product Flow

Figure 2: Schematic diagram of assembly flow shop environment used in simulation. Eight stations (G, H, L, M, N, P, R, T) each with Inter-operational Storage (IS_{i-j}) and Input (IB) and Output (OB) Buffer are considered. Worker Paths (broken line) and Product Flow chart (unbroken line) are also sketched.

The model included three core “design” factors – system features to be tested for eventual design – as well as a “sensitivity” factor used to test the stability of the model under the varying design assumptions (Law and Kelton, 2000). Finally, the model tested the “operating” rules (i.e., six “where” rules and two “when” rules) used to assign the workers’ movement strategy. Nomenclature of Factor and Effects evaluated is summarized in table 1.

Table 1: Nomenclature and typing reminder

FACTORS			EFFECTS	
		Values		
		Hi	Me	Lo
		divided in <u>Main Effects</u> (single effect evaluation) and <u>Interaction Effects</u> (double correlated influence)		
Design	WORKFORCE [unit] (“Worker” in simulation prospect)	7	5	3
	DISTANCE [m]	6		3
	BUFFER CAPACITY [unit] (“Buffer” in simulation prospect)	5		1
			System	PRODUCTION RATE [unit/h] WIP [unit] FLOW TIME [s]

Sensitivity	COEFFICIENT OF VARIATION [%]		21.2	7.7	Human	UTILIZATION [%]
	("CV" in simulation prospect)					
Operating	WHEN RULE		"Centralized"			MEAN SWITCHING [unit/h]
	("When" in simulation prospect)		"Decentralized"			
	WHERE RULE		Random			
			Upstream			
			Downstream			
			Closest			
			Max-time			
			Min-time			
("Where" in simulation prospect)						

Design factors under consideration

Factor A: WORKFORCE size - the number of workers assigned to the production system was set to three levels: 3, 5 and 7 workers representing respectively 37.5%, 62.5% and 87.5% staffing level. Staffing levels are consistent with the literature (Kannan and Jensen, 2004; Davis *et al.*, 2009.)

Factor B: DISTANCE - the distance between consecutive stations. This model considered two levels respectively as low and high: 3 m = Lo and 6 m = Hi.

Factor C: BUFFER CAPACITY - buffers between stations were modeled by two capacity levels respectively as low and high: 1 unit= Lo and 5 units = Hi.

Sensitivity factor under consideration

Factor D: COEFFICIENT OF VARIATION - cycle times were modeled using a gamma distribution with two levels of COEFFICIENT OF VARIATION (CV = mean/standard deviation): 7.7%-Lo and 21.2%-Hi. Variation in processes can come from individual assembler variation, variation between assemblers. Operator's variability represents one of the larger contributions to system losses in under-buffered serial flow systems (Wild, 1975). The values of CV used are consistent with characteristic ranges of manual assembly tasks (Neumann and Medbo, 2009). The gamma distribution is consistent with other simulation studies (Banks *et al.*, 2001).

Operating factors under consideration

Factor E: WHEN RULE - this rule is a "control" rule. This model used two approaches described in the DRC literature (Park and Bobrowski, 1989): the "Centralized" rule in which each worker is transferred to another machine each time that the job is completed, and the "Decentralized" rule in which a worker is transferred to another machine after completing all ongoing jobs in their current stations or in queuing, so that workers change station only if starving for product occurs.

Factor F: WHERE RULE - workers are dynamically assigned to stations based on available tasks and the where rule assignment – which sets the policy by which the next work station is chosen if more than one are available. This model included six WHERE RULES:

Random - free choice of next loaded station based on a random selection procedure

Upstream - choice of the most upstream of available loaded stations

Downstream - choice of the most downstream of available loaded stations

Closest - choice of closest loaded station to the worker

Max-time - choice of loaded station with longest cycle time

Min-time - choice of loaded station with shortest cycle time

Dependent variables

The dependent variables in this study can be classified in terms of System Effects and Human Effects (c.f. Neumann and Dul, 2010). The first three responses are System Effects since concerning system performances. System effects included:

PRODUCTION RATE: Production rate is one of the more common performance indices used in manufacturing. In the model, hourly production was evaluated.

WIP: The mean number of products in the system as per Little's law (Little, 1961).

FLOW TIME: The flow time (also called throughput time) time for the product to move through the system (Montoya-Torres, 2006)

In addition this study considered two further dependent variables which could affect work routine, physical and psychophysical aspects related with fatigue and stress and consequently absenteeism and safety issues (Santos *et al.*, 1999; Zamiska *et al.*, 2007, Bokhorst *et al.*, 2008). These human factors related indicators included:

UTILIZATION: it represents the worker-agent's ratio between busy time and the available time. In this paper, *UTILIZATION* is calculated as the mean value across all workers. Worker-agents have three states: "free", "moving" and "busy". In this model, *UTILIZATION* considers only the "busy" state omitting the time in "moving" and "free" states. The principal reason for this is that the walking during "moving" represents potential recovery after assembly induced fatigue (Jaber *et al.*, 2010). High *UTILIZATION* implies few rests to recovery, and increased fatigue affecting quality and productivity carelessness and underestimation of hazards. Assemblers will become tired and fatigued. Tiredness and distraction occur, irritation and susceptibility manifest and consequently team work cooperation becomes poor and difficult (Beckers *et al.*, 2004).

MEAN SWITCHING: this variable represents the mean number of times workers change between stations per hour. While high values of this variable imply production losses due to excessive total walking time, it also implies greater work variety (like job rotation) which can alleviate musculoskeletal problems due to monotonous repetitive assembly work which would themselves lead to production losses and quality deficits (Aptel *et al.*, 2008).

Simulation study design

The agent-based model was created using AnyLogic software [Version 6.5] (www.xjtek.com). The simulation study was a full factorial design of 288 conditions (6 WHERE RULEs * 3 WORKFORCE size * 2 DISTANCE values * 2 BUFFER CAPACITY level * 2 COEFFICIENT OF VARIATION * 2 WHEN RULEs) with 30 replications for each condition for a total of 8640 simulation runs. Mean values between partial solutions were chosen. The run-in time period was equal to 2000 minutes as determined by Welch's method (Heidelberger and Welch, 1983). The choice in length of simulation period, equal to 20000 min of run time, and number of replications was chosen as per Law and Kelton's (2000) approach with a Bonferroni correction due to multiple performance measures (c.f. Quinzi, 2004). ANOVA analysis was carried out for each response (Montgomery, 2006). The *F-Test* and *p-Value* set with a 5% significance level ($p < 0.05$). Statistical analysis was performed using the MINITAB software [Version 15] (www.minitab.com). Finally, as reference, a comparison is made of production volumes and worker productivity to a fully staffed system using the following settings: 8 *workers*, low level of DISTANCE and all combinations of *Buffer-CV* factors.

RESULTS

Table 2 presents *F*-statistics Test and *p*-Value for each factor with 2-way interactions. S, R-Sq and R-Sq (adj) are statistical parameters for the model which considers 3-way, 4-way and 5-way interactions as well (Montgomery, 2006). Both S, with low values, and R-Sq and R-Sq (adj), with high values, indicate the model is a good predictor of amount of variation in the observed values of responses. 91% of sources (i.e., factors) manifest statistical significance in *p-Value* ($p < 0.05$). Thus, to accredit hypothesis the *F-Test* is needed (Studenmund, 2010). According to Montgomery (2006), different orders of magnitude of *F-Test* mean different strength of factors or the significance of correlation. Thus, regarding main effects on *PRODUCTION RATE: WORKFORCE* yield higher significance than the other factors (table 2).

While most variables showed statistically significant effects, the next sections will focus on those effects with more substantial effect sizes that would be of interest to system managers (from now on called *Main Effects*) and interesting correlation effects (from now on called *Interaction Effects*). For the sake of brevity just principal *Main Effects* and *Interaction Effects* will be plotted.

Table 2: Analysis Of Variance – ANOVA: evaluation of p value and F statistic.

Source	PRODUCTION RATE		WIP		FLOW TIME		UTILIZATION		MEAN SWITCHING	
	F	P	F	p	F	P	F	p	F	p
When	4137506.78	0.000	6556.25	0.000	28840.12	0.000	6173931.44	0.000	122351000.00	0.000
Worker	301734000.00	0.000	1041.74	0.000	346103.77	0.000	138034.31	0.000	2620208.90	0.000
Distance	32843.57	0.000	0.10	0.758	253.57	0.000	135121.64	0.000	420859.89	0.000
Where	63357.61	0.000	31036.03	0.000	75641.80	0.000	162412.60	0.000	86768.47	0.000
Buffer	887106.16	0.000	734830.83	0.000	1009487.96	0.000	1279979.33	0.000	4822624.99	0.000
CV	28616.63	0.000	108.48	0.000	119.52	0.000	19806.03	0.000	22262.00	0.000
When*Worker	200576.33	0.000	566.15	0.000	350.57	0.000	26782.49	0.000	953293.83	0.000
When*Distance	32711.69	0.000	0.65	0.421	264.57	0.000	134532.32	0.000	420486.74	0.000
When*Where	5953.81	0.000	2989.21	0.000	7891.85	0.000	12125.40	0.000	179361.75	0.000
When*Buffer	750930.96	0.000	5438.70	0.000	17497.70	0.000	1061594.00	0.000	5923192.35	0.000
When*CV	2388.34	0.000	18.73	0.000	15.81	0.000	4843.38	0.000	156645.54	0.000
Worker*Distance	32881.91	0.000	1.40	0.248	305.87	0.000	134501.35	0.000	420956.89	0.000
Worker*Where	20096.97	0.000	8790.05	0.000	30393.67	0.000	54567.70	0.000	151909.04	0.000
Worker*Buffer	57130.46	0.000	323.33	0.000	64670.74	0.000	6736.27	0.000	135713.57	0.000
Worker*CV	27961.39	0.000	12.52	0.000	14.57	0.000	21900.45	0.000	37248.34	0.000
Distance*Where	181.31	0.000	1.82	0.105	12.35	0.000	686.79	0.000	99528.95	0.000
Distance*Buffer	1.52	0.217	0.31	0.579	47.74	0.000	0.33	0.565	11.80	0.001
Distance*CV	4.05	0.044	0.03	0.852	0.29	0.587	28.25	0.000	85.51	0.000
Where*Buffer	5993.57	0.000	11380.86	0.000	24679.76	0.000	15911.53	0.000	7169.74	0.000
Where*CV	686.34	0.000	43.82	0.000	36.95	0.000	2514.32	0.000	1493.58	0.000
Buffer*CV	17632.16	0.000	85.99	0.000	61.74	0.000	15525.61	0.000	417.72	0.000
S		0.0219759		0.901650		2.86558		0.000962235		0.0682705
R-Sq		100.00%		99.26%		99.71%		99.93%		99.99%
R-Sq (adj)		100.00%		99.24%		99.70%		99.93%		99.99%

Effects' analysis on PRODUCTION RATE response

Main Effects: the model showed two main effects (fig. 3): the number of *Workers* (denoted in this study as WORKFORCE) factor affects the *PRODUCTION RATE* and its main effect varies between 11 unit/h for 3 workers to about 24 unit/h for 7 workers with a linear trend (fig. 3) The second is the WHEN RULE factor which had a main effect of about 5%. From a managerial point of view, the other factors have negligible effects - less than 3%.

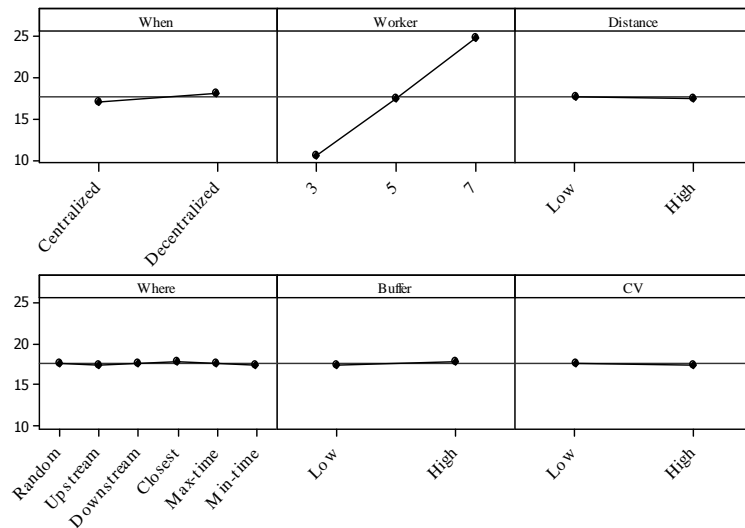


Figure 3: *Main Effects* evaluation for *PRODUCTION RATE* [unit/h] response: significance analysis

Interaction Effects: Two interaction effects emerged as important (fig. 4): the WORKER-WHERE as well as BUFFER-WHEN interactions. The WORKER-WHERE RULE interaction highlights increasing differences among the WHERE RULEs with decreases in WORKFORCE size. Secondly, the BUFFER-WHEN interaction describes how the WHEN RULE affects the *PRODUCTION RATE* depending on the BUFFER CAPACITY (fig. 4). For both BUFFER CAPACITY levels, the interaction effect demonstrates that the “Decentralized” rule outperforms the “Centralized” rule, but the differences are small. Indeed, with low BUFFER CAPACITY, the difference in *PRODUCTION RATE* is less than 3%, while for high value of BUFFER CAPACITY, the difference is just over 8%.

To summarize, the joint analysis of *Main Effects* and *Interaction Effects* on *PRODUCTION RATE* response highlights two main results: the dependence between WORKFORCE size and *PRODUCTION RATE* and another concerning the WHEN RULE: the main effect of the WHEN RULE factor shows that the “Decentralized” rule outperforms the “Centralized” rule but performance is strongly dependent of BUFFER CAPACITY as shown above (fig. 4).

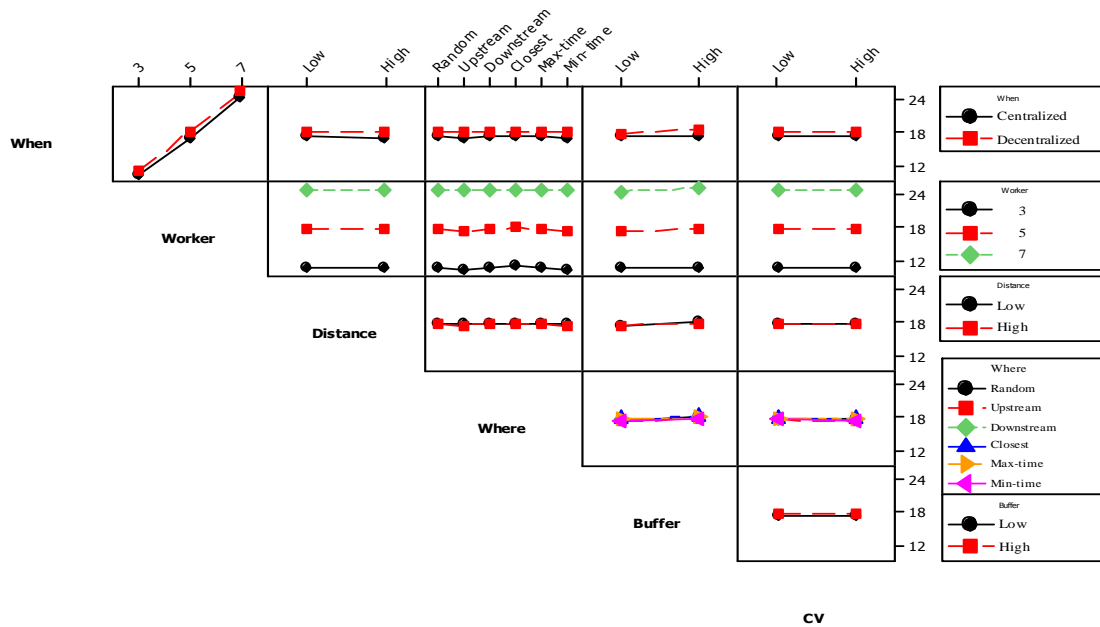


Figure 4: The plot of *Interaction Effects* for *PRODUCTION RATE* [unit/h] response.

Effects' analysis on WIP response

Main Effects: the model showed a strong dependence between *WIP* and *BUFFER CAPACITY*, which describes an expected increase in *WIP* with high levels of buffering. Secondly the *Downstream* rule outperforms the others as it has a *WIP* reduction from 30% to 150% compared to alternative *WHERE RULES*.

Interaction Effects: the interaction between *WHERE RULE* and *WORKFORCE* size (see "Worker" in figures) shows considerable variation on *WIP*. While *WIP* is almost constant at high (7 workers) staffing level, pronounced differences in *WIP* emerge between *WHERE RULES* at lower (5 and 3 workers) staffing levels. In these lower levels of *WORKFORCE* size, the *Downstream* rule outperforms the other *WHERE RULES*. A second significant interaction effect was found between *WHERE* and *WHEN* *RULES*. In particular the "Centralized" rule has worse *WIP* values than the "Decentralized" rule with an impact of between +2% to +23% *WIP* levels for all *WHERE RULES* except *Downstream*, which has a *WIP* reduction of around 25%. The *Downstream* rule outperforms other rules regardless of the *WHEN* rules used. The last result concerns the interaction between the *WHERE RULE* factor and *BUFFER CAPACITY* (indicated by "Buffer" in figures). The analysis of interaction effects also indicates that the *WHERE RULES* impact tends to differ with increasing *BUFFER CAPACITY*. In particular, the difference in *WIP* between the best *WHERE RULE*

(*Downstream*) and the worst WHERE RULE (*Upstream*) is approximately 61% for a low value of BUFFER CAPACITY and 117% for high value of BUFFER CAPACITY (fig. 5).

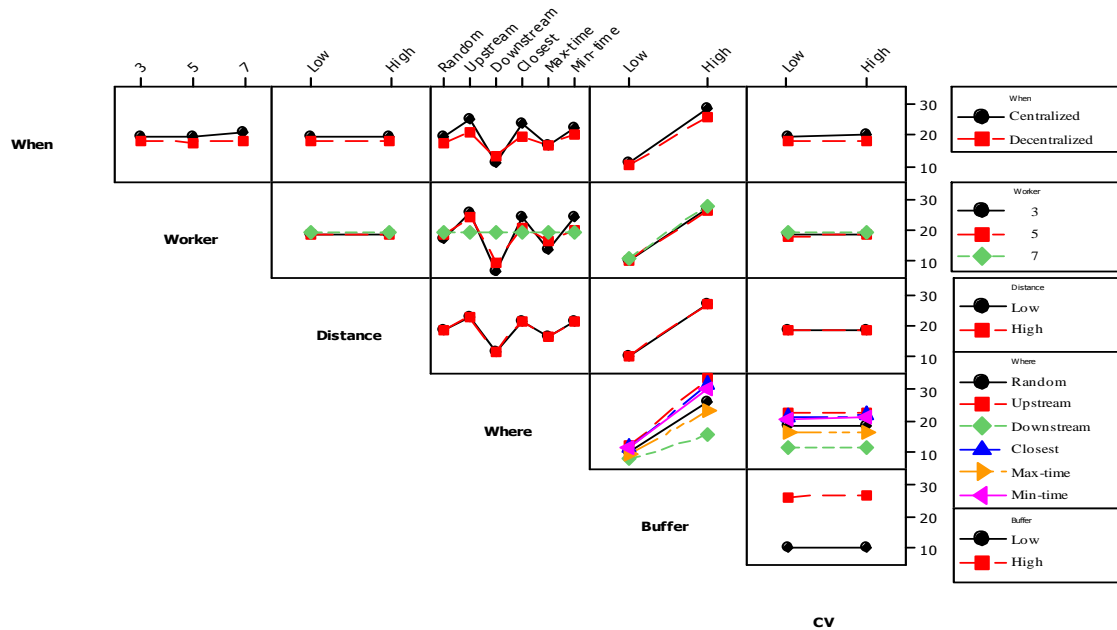


Figure 5: The plot of *Interaction Effects* for WIP [unit] response.

Effects’ analysis on FLOW-TIME response

Main Effects: Four main FLOW TIME effects were identified including BUFFER CAPACITY, WORKFORCE size, WHEN RULE and WHERE RULE. BUFFER CAPACITY has a negative effect on FLOW TIME: the increasing of BUFFER CAPACITY causes FLOW TIME to increase by over 100%. Reducing the number of workers increases the flow-time, and this effect is more pronounced at medium-low staffing levels (5 and 3 workers). The WHERE RULE factor is also significant in this case, as the *Downstream* rule results in reductions in FLOW TIME between 30% to 100%. Finally, the “*Decentralized*” rule has a 15% lower flow-time than the “*Centralized*” rule.

Interaction Effects: The analysis of interaction effects on FLOW TIME is similar to that on WIP (fig. 6). That is, regarding Where-Worker interaction, the *Downstream* rule is the better choice for any level of WORKFORCE size. Moreover, FLOW TIME increases significantly with decreases in the WORKFORCE size for most WHERE RULES except for the *Downstream* rule. Regarding the interaction of WHERE and

WHEN RULEs, the “*Centralized*” rule has worse results than the “*Decentralized*” rule for all WHERE RULEs except the *Downstream* rule. Thirdly, WHERE RULE changes to varying BUFFER CAPACITY levels as per WIP. Finally, the interaction of BUFFER CAPACITY and WORKFORCE SIZE shows that when BUFFER CAPACITY is high *FLOW TIME* is particularly increased at low staffing levels (3 workers). This negative effect is attenuated with 5 and 7 workers.

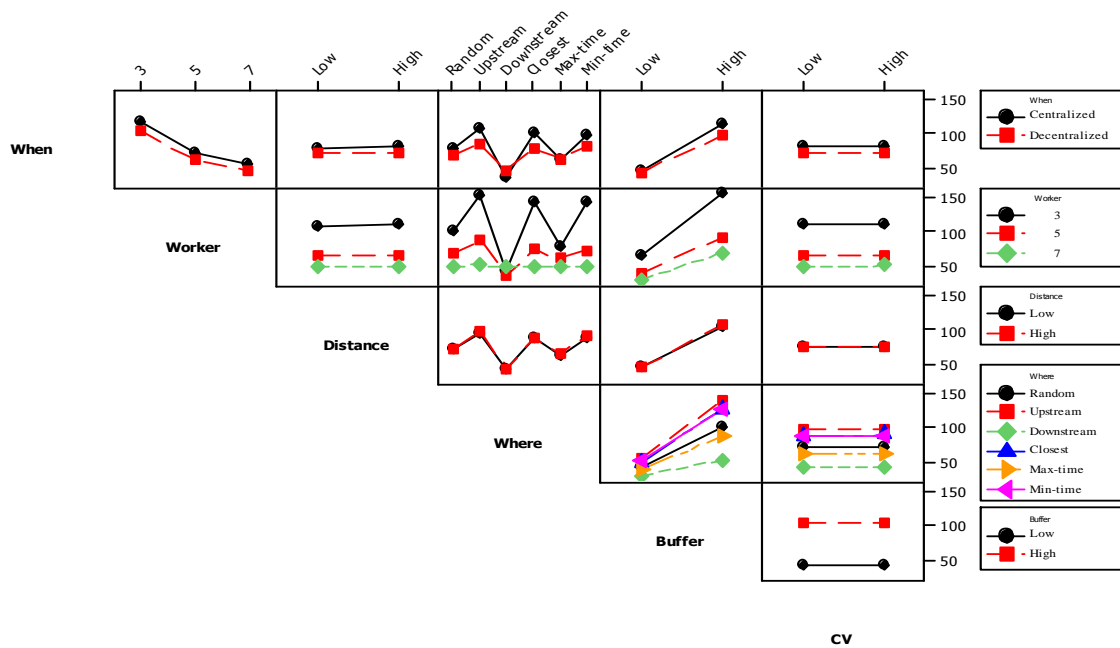


Figure 6: The plot of *Interaction Effects* for *FLOW TIME* [s] response.

Effects’ analysis on UTILIZATION response

Main Effects: The mean *UTILIZATION* of workers exceeded 90% under all conditions (this represents high value in DRC system as per Treleven and Elvers 1985). Only two factors have significant main effects: with regards to the WHEN RULE factor, the “*Decentralized*” rule has a main effect which boosts the *UTILIZATION* from about 92% (under the “*Centralized*” rule) to 96%. Both the *Upstream* and *Min-time* WHERE RULEs tended to decrease worker *UTILIZATION* more than the other rules.

Interaction Effects: Only two interaction effects manifest managerial significance: WHERE RULE-WORKFORCE size interaction and WHEN RULE-BUFFER CAPACITY interaction. Regarding WHERE RULEs, with high (7 workers) staffing level, the *UTILIZATION* is about 94.5% for all rules while at medium-low (3 or 5) staffing levels, the *UTILIZATION* is variable between 91.2% and 95% depending on

rule. Secondly, the “*Decentralized*” rule had higher *UTILIZATION* with a high *BUFFER CAPACITY* level (from 94% with low capacity to 98% with high capacity), an effect that was negligible with the “*Centralized*” rule (91,5% for both *BUFFER CAPACITY*).

Effects’ analysis on MEAN SWITCHING RATE response

Main Effects: The WHEN RULE factor has a substantial effect on *MEAN SWITCHING RATE*, with the “*Decentralized*” having only one quarter of the workstation switches of the “*Centralized*” rule. Finally, the last effect factor regards the WORKFORCE size: in particular, 16 is the value of *MEAN SWITCHING* in condition of 3 or 5 workers. With WORKFORCE size set to 7 units the *MEAN SWITCHING* becomes 13.

Interaction Effects: The analysis highlights only one significant interaction effect regards WHEN RULE-BUFFER CAPACITY interaction. While *MEAN SWITCHING* was stable for varying *BUFFER CAPACITY* under the “*Centralized*” rule, the “*Decentralized*” rule had much lower (over to 50% less) *MEAN SWITCHING* rates when Buffer capacity was high compared to low.

Comparison with full staffing and fixed approach

Generally a flow-shop line is fully staffed to obtain high volume of production. So, does workforce flexibility affect the worker productivity?

The comparison of worker’s productivity to varying the WORKFORCE size is shown in figure 7 – upper side. Comparison between productivity per worker and total production is displayed (fig. 7). The values for 7/5/3 workers are referred to low level of DISTANCE factor, *Downstream* rule and “*Centralized*” rule. The Tukey’s multiple comparison highlights all couples are significantly different at p value of 5% (Tukey, 1977). On the fully staffed flow line and fixed assignment of WORKFORCE, the hourly productivity for each worker is significantly lower than partial staffing.

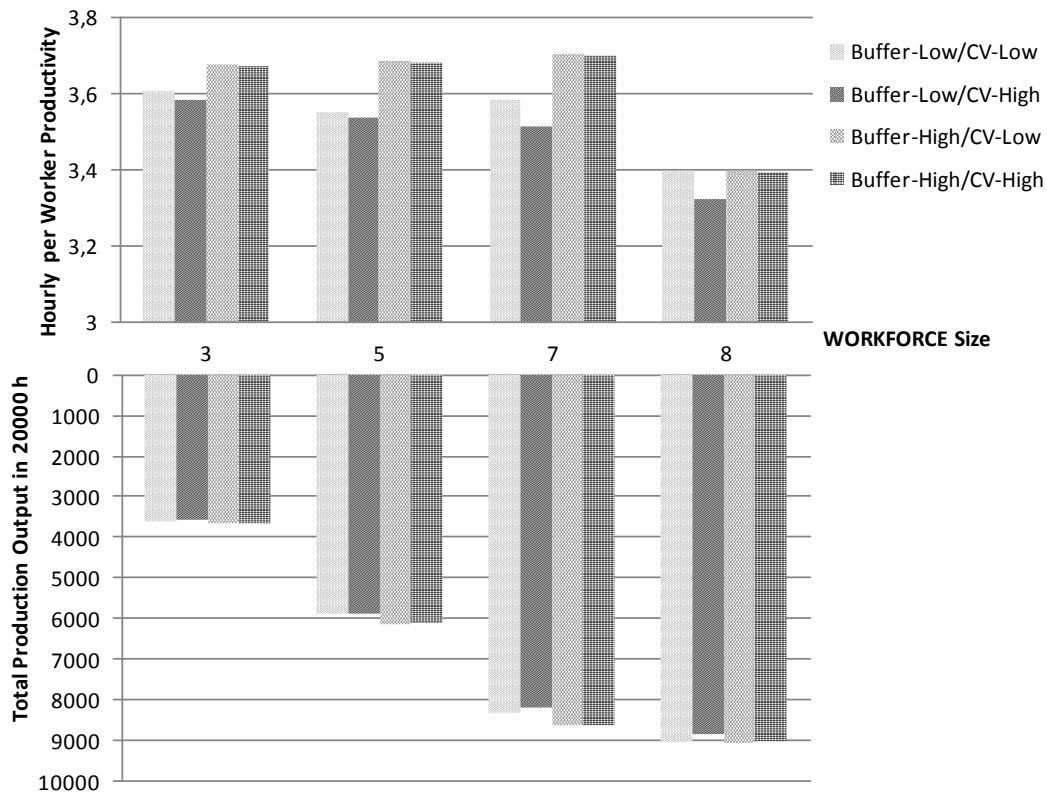


Figure 7: Comparison among different WORKFORCE size in terms of hourly per worker productivity (upper side of the fig. 7) and total production output (lower side of fig. 7).

DISCUSSIONS

This paper presented an ABM approach for evaluating design alternatives in worker assignment and control rules in understaffed DRC flow lines to achieve production volume flexibility. It demonstrates the utility of an ABM approach which has potential to embed HF considerations when testing assembly configurations. The “worker” element induces complexity into the simulation models due to the stochastic and random nature of human performance. The current DRC system study was based on a flow shop environment as dedicated line in assembly process. This differs from previous DRC studies which have been generally focused on job-shop settings and complex movement rules, based on information about due date, queue length, and so on (Garey *et al.*, 1976; Weeks and Fryer, 1976; Bobrowski and Park, 1993; Kher, 2000), but have generally not attended to human aspects of production.

WHERE RULE

A dynamic assignment approach is implemented in a DRC system. The paper investigates rules to dynamically assign worker to stations. Classified as “operating” factor, it has been tested six WHERE RULEs to evaluate assignment of worker to station. Here performance of these rules in response to System and Human effects are discussed.

As implemented, none of the WHERE RULEs show managerial significance regarding the *PRODUCTION RATE* response. This is consistent with the findings of Treleven and Elvers (1985) and Fryer (1973) who found that the WHERE RULE in job shop settings has little impact on shop performance. Similarly, in the line configuration studied here, none of the implemented WHERE RULEs exhibited greater than 5% difference in *PRODUCTION RATE*. Conversely to the productivity response, *FLOW TIME*, *WIP*, *UTILIZATION* and *MEAN SWITCHING* rate greatly depended on WHERE RULE. For these factors, the WHERE RULEs have strong interaction effect with *WORKFORCE* size and *BUFFER CAPACITY* parameters.

WHERE RULEs vs. DESIGN FACTORS

The importance in choice of “good” WHERE RULEs increases as staffing levels decrease. This implies that a manager can make the WHERE RULE assignment decision based on *WORKFORCE* size. For example, when the staffing level is relatively high (e.g., 70%) due to absenteeism and/or temporary conditions, the dynamic assignment WHERE RULEs makes little difference. As staffing levels decrease the choice of WHERE RULEs become more important as it influences the system’s performance in terms of *FLOW TIME*, *WIP* and Human effects, such as *UTILIZATION* rates and *MEAN SWITCHING* frequency. These could affect costs and revenues and customer’s service (Conway et al., 1988). The WHERE-BUFFER interaction becomes a concern as *FLOW TIME* and *WIP* are influenced more by the choice of a WHERE RULE when *BUFFER CAPACITY* increases.

To summarize, the *Downstream* rule is the best WHERE RULE and its advantages become increasingly important to decreasing of staffing levels and to increasing of *BUFFER*’ size. So, a manager should select the *Downstream* rule to achieve the best performance, especially with highly variable *WORKFORCE* sizes and high *BUFFER* capacities.

WHERE RULE remarks: an assessment evaluation

The information required to practically implement a WHERE RULE also poses a managerial consideration. Many other kinds of WHERE RULEs are assessed in the literature including due date, number of products in buffer, and balancing among others (Hottenstein and Bowman, 1998). These rules are of typical use in job-shop systems, in which variable product routings and different production strategies

contribute to increased levels of information needed to implement such rules. As the information needs of a rule increase it becomes increasingly difficult to implement in practice. The complexity of a rule, such as Critical Ratio or Earliest Due Date or MakeSpan, can depend both on issues of gathering, as well as processing of information required to fulfill these rules in a timely manner. In contrast, the rules tested in this study are relatively simple and can be implemented with visual information available directly on the shop floor. This “simplicity” of rules can facilitate rapid and dynamic movement of workers, which is particularly helpful when cycle times are relatively short, and the time lost, in identifying which station to go next, can have a large impact on flow-line performance.

WHEN RULE

The WHEN RULE indicates the time the worker is available to move to another workstation. In “*Decentralized*” rule worker changes station only if starving for product occur, while in “*Centralized*” rule worker changes stations after completing each product. The results show that WHEN RULE choice can affect both system and human effects. If more production is requested, the “*Decentralized*” rule is a suitable assignment even if a worker spends more time in the same station. Thus, *SWITCHING RATE* decreases and *UTILIZATION* increases reducing the rest time to recovery from fatigue which in turn affect stress and musculoskeletal disease and consequently safety issues occur (Tucker, 2003). Otherwise, the “*Centralized*” rule permits many micro-breaks during more frequent changes of station, and hence increased variety in work tasks, but at the same time causes a reduction of *FLOW TIME* and *WIP*.

Ultimately, the choice of WHEN RULE depends on the strategic objectives of management particularly if they push forward to optimizing throughput or *WIP*. When production volume is more important, then the “*Decentralized*” rule provides superior performance. On the other hand, if reduction in *WIP* costs is a priority (c.f. Yang *et al.*, 2010), then the “*Centralized*” WHEN RULE in combination with the *Downstream* WHERE RULE is superior.

Human factors in operations system design

Poor HF is a problem for workers (e.g., pain lost wages), for companies (e.g., cost for absenteeism and presenteeism, badly off quality in process and product) and for society (e.g., cost for health assistance and human well-being) (Punnett 1999; Hicks *et al.*, 2001; Birdi *et al.*, 2008; Boksem *et al.*, 2008; Williamson *et al.*, 2011). The social costs of work related sickness are enormous, with costs roughly on par with all cancers combined (Leigh *et al.*, 1997; Jason *et al.*, 1999). Managers rarely understand by improving the “value” of human asset they could gain credit side value and flexibility and innovation as well as revenues to their companies (Buzacott, 2002; Boudreau *et al.*, 2003; Buzacott, 2004; Wirojanagud *et al.*, 2007; Goggins 2008). Moreover, poor

HF can contribute to poor safety performance at the organisational level. One of the pervasive problems with system safety management is that it tends to be retroactive (aimed at fixing the previous accident) and often regresses into behavioral safety management when the real problems are within the system. Integrating HF into design is seen as a crucial step in preventing expensive problem in later operational phases. The literature suggests that controlling HF in system design phase can provide several advantages in terms of time, quality and cost (Pfeffer, 1994; Eklund, 1995; Eklund, 1997; Neumann *et al.*, 2002; Neumann *et al.*, 2006; Kazmierczak *et al.*, 2007; Neumann and Dul 2010). Specific tools exist (e.g., Digital Human Modeling) but these are limited in the Operational System (OS) design (Wilson 2000). Important HF to consider: repetitive monotonous work is associated with health disorders (Jensen 2002). Switching rate can indicate some level of work variety (assuming there are different tasks between stations) and can provide benefits similar to job rotation (Oxenbrough *et al.*, 2004). Utilization time, may be indicating overload when very high, plays the inverse of muscular recovery time if recovery becomes insufficient (Tucker, 2003). In this study utilization rates were relatively high, between 90% and 98% suggesting that worker overload might be an issue over the operational life of the system. These results are consistent with Trevelen and Eklvers 1985 indicated that DRC systems operate most efficiently with staffing level ranging from 50% to 75%)

This paper analyzes the HF issue evaluating the correlation between assembly production lines and ergonomics requirements. The factorial analysis, concerning relationship among design/sensitivity factors and workforce policies/labor flexibility, is not new in literature (Flynn and Jacobs, 1986; Downey and Leonard, 1992) even though it is rare in DRC studies. The WHERE and WHEN RULEs affect the *SWITCHING RATE* varying monotony which is also related to learning and forgetting. On the other hand, excessive *SWITCHING RATES* reduce *UTILIZATION* affecting the total production. Managing *SWITCHING RATE* and *UTILIZATION* can ease problems related to lack of recovery and work repetitiveness. However, reduction in *UTILIZATION* introduces rest allowance which in turn helps muscular recovery while affecting *FLOW TIME* and *WIP*. The comparison with a fully staffed line (fig. 7) highlighted better labor efficiency (about +9%) in the partially staffed line but lower amount of production. This study demonstrates how ABM can allow further research and development of such productivity-hazard trade-offs.

From modeling point of view, HF is often modeled as a Human Performance Variation (HPV) because of the intrinsically limited nature of DES models (Siebers *et al.*, 2004; Baines *et al.*, 2004; Baines *et al.*, 2005; Digiesi *et al.*, 2009, Neumann *et al.*, 2010). Siebers in 2006 proposed a worker agent framework for production systems without contextualization in manufacturing sets. ABM appears to have good potential to embed human aspects in the modeling in terms of assessing hazard levels and including how pain and fatigue may affect performance. This study presents a successful

implementation of a manufacturing assembly line simulation using agent-based modeling highlighting the potential for more advanced modeling in future work. To the best of our knowledge, this study seems to be among the first to present a modeling application with a focus on “worker” elements using ABM.

Agent-Based Modeling: technical point of view

Baines *et al.*, (1998) presented a literature review of seven modeling techniques to evaluate manufacturing strategies, including DES and SD modeling approaches. In that work, ABM was not considered. Baines’ assessment of model building and execution times of DES found they may be considerably longer than for other modeling techniques even if DES techniques are characterized by accuracy, flexibility and credibility greater than other forms of modeling. Conversely, SD is relatively flexible but can be limited by the inherent approximation of product manufacture to flows. In this context, ABM is placed between DES and SD getting over the “data hungry” characteristic of the first while taking on the 'high level' approach of the latter (Baines *et al.*, 1998). DES tools are the predominant form in DRC modeling.

Agent Based models consist of a space, framework, and environment in which interactions among agents takes place. ABM uses communicative actions, programmed rules and class representation to coordinate the actions of agents whose individual behavior in the space is thereby defined. ABM focuses on individual agents who interact on the basis of generally simple rules and a communication axiom (Wooldridge and Jennings, 1995). The communication protocol has to establish priorities and states, governed by a central communication code, which are defined for each agent. Plans of action result in a structured "conversation" taking place among agents and across the environment. They are governed by the environmental code. The system requires explicit assumptions about *processes* and *plans* for the agents to follow. Processes are organized into paths characterized by rules and governed by a goal (Siebers and Aickelin, 2008). Plans could be multifold but they imply agents adhering to programmed *rules*. Rules need to be known, tied to environment and established by observation of the real system to be modeled (Phelen, 1999). These govern the individual behavior of agents into the system. The agent action is influenced by the current situation and could change over time as new situations emerge (Siebers, Aickelin, Celia, & Clegg, 2010). This results in emergent behaviors in the overall model behavior and testing of this can allow for the identification of “leverage points” that may influence the complex aggregate conjectural behavior (Carley, 2009).

In a typical manufacturing system, an agent for characterization of production plan (i.e., “Product” Agent), an agent for execution of manufacturing process (i.e., “Station” Agent), an agent for manufacturing product (i.e., “Worker” Agent) have to co-exist under the coordination of a Dispatcher code structure. This study demonstrated the

feasibility of applying ABM to production system design problems. It also opens the door for the inclusion of more advanced human factors: learning, forgetting, fatigue, workload and injury risk prediction. Even though there are papers concerns fatigue and recovery phenomena (Digiesi *et al.*, 2009; Jaber and Neumann, 2010;) and learning and forgetting rate (McCreery *et al.*, 2004), these works deal with simple characterizations of DRC systems (e.g., two workers/two tasks) and/or they analyze few performance indices. The ABM approach appears to provide the ability to address larger, more realistic systems, with less computational complexity than other modeling forms and holds good promise for future applications.

CONCLUSIONS

This paper introduced the application of an ABM approach to characterizing the outcomes of dynamic worker-assignment rules in a DRC line. ABM, using autonomous decision making entities (i.e., agents) representing workers with specified movement rules, allowed for the observation of emergent system behaviors in varying understaffed conditions that were not specified deterministically by the programmer.

ABM forces to make assumption explicit (i.e., variables into the models, agents and their characteristics, sequence of events, communication protocol, rules and states, triggering events). ABM allows the simulation to generate rather than deduce the consequences of the processes and paths.

For complex systems, planning an ABM could be timely and logically expensive so these limit simulation strength and consistency of output. Albeit complexity is a case in issue, a measure of human and technical performance whenever system manifests non linearity could be reported.

As expected productivity varied with workforce size. With regard to the DRC model tested: the WHERE RULE had large impacts on *WIP* and *FLOW TIME*, but less impact on production rates. In understaffed conditions hourly per-worker productivity is higher than in fully staffed conditions, particularly when using the *Downstream* WHERE RULE. Results suggest that managers should choose the WHEN RULE depending on strategic objectives. If the most productive WHERE RULE is chosen (i.e., *Downstream*), then the *Centralized* WHEN RULE results in reduced *FLOW TIME* (-15%) and lower *WIP* (-10%) levels. If another WHERE RULE is chosen then the “*Decentralized*” WHEN RULE may be preferred in almost all conditions. From the operators perspective, excessive *SWITCHING* rates reduce *UTILIZATION* while affecting system performance in terms of *WIP*, *FLOW TIME* and *PRODUCTION RATE*. These aspects will have effects on operators' task variety and muscular recovery time which affects their risk of health disorders, but further research is needed to enhance the interpretation of these hazards. While *MEAN SWITCHING* was stable for varying *BUFFER CAPACITY* under the “*Centralized*” rule, the “*Decentralized*” rule

had much lower (over to 50% less) *MEAN SWITCHING* rates when *BUFFER CAPACITY* was high compared to low. Furthermore, *UTILIZATION* rates tended to be lowest under the “*Centralized*” rule, depending on *BUFFER* levels. The sensitivity terms of *COEFFICIENT OF VARIATION* in processes, as well as the tested *DISTANCE* between consecutive stations, did not have substantial *Main* or *Interaction Effects*. The ABM approach implemented here has potential to provide insights into human aspects by giving understanding of work variety (*MEAN SWITCHING* rate) and Work-rest patterns (*UTILIZATION* rates) effects, without the extensive specification and programming of system behaviors required by DES. ABM appears to be a useful tool for modeling dynamic DRC systems in which system behaviors are not deterministically specified. Further research should emphasize enhancing the human factors aspects of ABM to understand the interactions between the technical and human elements of the system in order to achieve long run performance objectives safely.

ACKNOWLEDGEMENTS

This research is supported by a grant from the Ph.D. Research Foundation of the University of Salerno (Italy) as well as the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC).

REFERENCES

- Allen, M., 1963, The efficient utilization of labor under conditions of fluctuating demand. In J. Muth and G. Thompson, ed. *Industrial Scheduling*. Englewood Cliffs, NJ: PrenticeHall, chapter 16.
- Armbruster, D., E.S. Gel. 2006. Bucket brigades revisited: Are they always effective? *European Journal of Operational Research*, 172 (1), 213-229.
- Aptel, M., Cail, F., Gerling, A., Loius, O., 2008. Proposal of parameters to implement a workstation rotation system to protect against MSDs. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 38 (11-12), 900-909.
- Baines, T. S., Harrison, D. K., Kay, J. M. and Hamblin, D. J., 1998. A consideration of modeling techniques that can be used to evaluate manufacturing strategies. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 14, 369-375.
- Baines, T., Mason, S., Siebers, P.O. and Ladbrook, J. 2004. Humans: the missing link in manufacturing simulation?. *Simulation Modeling: Practice and Theory*, 12, 515–526.
- Baines, T.S., Asch, R., Hadfield, L., Mason, J.P., Fletcher, S., Kaym J.M., 2005. Towards a theoretical framework for human performance modeling within

- manufacturing systems design. *Simulation Modeling Practice and Theory*, 13 (6), 486–504.
- Banks, J., Carson, J.S., Nelson, B.L., Nicol, D.M. 2001. *Discrete-event simulation*. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall.
- Bankes, S.C., 2002. Agent-based modeling: a revolution?. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 2002, 99 (Suppl. 3), 7199-7200.
- Bartholdi, J.J., Eisenstein, D.D., 1996. A production line that balances itself. *Operations Research* 44 (1), 21–34.
- Bartholdi, J.J., Eisenstein, D.D., Foley, R.D., 2001. Performance of bucket brigades when work is stochastic. *Operations Research*, 49 (5), 710–719.
- Beckers, D.J., van der Linden, D., Smulders, P.G.W., Kompier, M.A.J., van Veldhoven, M.J.P.M., van Yperen, N.W. 2004. Working overtime hours: relations with fatigue, work motivation, and the quality of work. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 46, 1282–1289.
- Birdi, K., Clegg, C., Patterson, M., Robinson, A., Stride, C. B., Wall, T. D., & Wood, S. J., 2008. The impact of human resource and operational management practices on company productivity: A longitudinal study. *Personnel Psychology*, 61(3), 467–501.
- Bobrowski, P.M., Park, P.S., 1993. An evaluation of labor assignment rules when workers are not perfectly interchangeable. *Journal of Operations Management*, 11, 257-268.
- Bokhorst, J.A.C., Slomp, J. and Gaalman, G.J.C., 2004. On the who-rule in dual resource constrained (DRC) manufacturing systems. *International Journal of Production Resesearch*, 42 (23), 5049–5074.
- Bokhorst, J.A.C., Nomden, G., and Slomp, J., 2008. Performance evaluation of family-based dispatching in small manufacturing cells. *International Journal of Production Research*, 46 (22), 6305–6321.
- Bokhorst, J. A. C. and Gaalman, G. J. C., 2009. Cross-training workers in Dual Resource Constrained systems with heterogeneous processing times. *International Journal of Production Research*, 47 (22), 6333- 6356.
- Boksem, M.A., Tops, M., 2008. Mental fatigue: costs and benefits. *Brain Res. Rev.* 59 (1), 125–139.
- Bonabeau, E., 2002. Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human system. *Proceedings of the National Academy of Science*, 99 (3), 7280–728.
- Borshchev, A., Filippov, A., 2004. From system dynamics and discrete event to practical agent based modeling: Reasons, techniques, tools. *Proceedings of the 22nd International Conference of the System Dynamics Society*, 2004, 25-29.
- Boudreau, J., Hopp, W., McClain, J.O. and Thomas, L.J. 2003. On the interface between operations and human resources management. *Manufacturing & Service Operations Management*, 5 (3), 179-202.

-
- Boyle, T.A., 2006. Towards best management practices for implementing manufacturing flexibility. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 17 (1), 6–21.
- Brass, D., 1985. Technology and structuring of jobs: Employees satisfaction, performance, and influence. *Organ. Behavior and Human Decision Process*, 35 (2), 216-240.
- Buzacott, J.A. 2002. The impact of worker differences on production system output. *International Journal of Production Economics*, 78 (1), 37-44.
- Buzacott, J. A. 2004. Modeling Teams and Workgroups in Manufacturing. *Annals of Operations Research*, 126, 215-30.
- Carley, K. M. 2009. *How to validate an agent-based model. Applied agent-based modeling in management research.* Academy of Management Professional Development Workshop, August 7, Chicago, IL.
- Chang, A.-Y., 2009. An attribute approach to the measurement of machine group flexibility. *European Journal of Operational Research*, 194 (3), 774–786.
- Charteris, J. 1998. Comparison of the effects of backpack loading and of walking speed on foot-floor contact patterns. *Ergonomics*, 41 (12), 1792-1809.
- Conway R.W., Maxwell W.L., Miller L.W., 1967. *Theory of Scheduling*. Reading, Massachusetts, Addison-Wesley.
- Conway, R.W., Maxwell, W., McClain, J.O., Thomas, L.J., 1988. The role of work-in-process inventory in serial production lines. *Operations Research*, 36 (2), 229-241.
- Davis, D.J., Kher, H.V., Wagner, B.J., 2009. Influence of workload imbalances on the need for worker flexibility. *Computers & Industrial Engineering*, 57 (1), 319-329.
- De Meyer, A., Nakane J., Miller J.G., and Fellows K., 1989. Flexibility: the next competitive battle—the manufacturing futures survey. *Strategic Management Journal*, 10 (2), 135-144.
- De Treville, Suzanne, Bendahan, Samuel, Vanderhaeghe, Annelies 2007. Manufacturing flexibility and performance: bridging the gap between theory and practice. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 19 (4), 334-357.
- Digiesi, S., Kock, Ad. A. A., Mummolo, G., Rooda, J. E., 2009. The effect of dynamic worker behavior on flow line performance. *International Journal of Production Economics*, 120 (2), Special Issue on Introduction to Design and Analysis of Production Systems, 368-377.
- Downey, B. S., Leonard, M. S., 1992. Assembly line with flexible work-force. *International Journal Production Research*, 30 (3), 469-483.
- Dul, J., Neumann, W.P. 2009. Ergonomics contributions to company strategies. *Applied Ergonomics*, 40 (4), 745-52.
- Eklund, J.A.E. 1995. Relationships between ergonomics and quality in assembly work. *Applied Ergonomics*, 26 (1), 15-20.

-
- Eklund, J., 1997. Ergonomics, quality and continuous improvement -Conceptual and empirical relationships in an industrial context. *Ergonomics*, 40 (10), 982-1001.
- Elsayed, E.A. and Boucher, T.O., 1994. *Analysis and Control of Production Systems*. NJ, Prentice Hall.
- Forrester, J.W., 1961. *Industrial Dynamics*, Waltham, MA, Pegasus Communications,
- Flynn, B. B. and Jacobs, F. R., 1986. A simulation comparison of group technology with traditional job shop manufacturing. *International Journal of Production Research*, 24 (5), 1171-1192.
- Fry, T. D., Kher, H. V. and Malhotra, M. K., 1995. Managing worker flexibility and attrition in dual resource constrained job shops. *International Journal of Production Research*, 33 (8), 2136-2179.
- Fryer, J.S., 1973. Operating policies in multi-echelon dual-constraint job shop. *Management Science*, 19 (9), 1001-1012.
- Gel, E.S., Hopp, W.J. Van Oyen, M.P., 2002. Factor affecting opportunity of worksharing as dynamic line balancing mechanism. *IIE Transactions*, 34(10), 847-863
- Garey, M.R., Johnson, D.S., Seithi R. 1976. The complexity Flowshop and Jobshop Scheduling. *Mathematics of Operations Research*, 1 (2), 117-129.
- Gerwin D., 1993. Manufacturing Flexibility: A strategic Perspective, *Management Science*, 39 (4), 395-410.
- Goggins, R.W., Spielholz, P., & Nothstein, G.L. 2008. Estimating the effectiveness of ergonomics interventions through case studies: Implications for predictive cost-benefit analysis. *Journal of Safety Research*, 39 (3), 339-344.
- Goyal, M. and Netessine, S., 2009. *Volume flexibility with multiple products and the tradeoff with product flexibility*. Working paper. University of Maryland.
- Gunther, R.E., 1979. Server transfer delays in dual resource constrained parallel queueing system. *Management Science*, 25 (12), 1245-1257.
- Heidelberger, P., Welch, P.W., 1983. Simulation run length control in the presence of an initial transient. *Operations Research*, 31 (6), 1109-1144.
- Hicks, A.L, Kent-Braun, J. & Ditor, D.S. 2001. Sex differences in human skeletal muscle fatigue. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 29 (3), 109-112.
- Hopp, W.J. and Van Oyen, M.P., 2004a. Agile workforce evaluation: a framework for cross-training and coordination. *IIE Transactions*, 36 (10), 919-940.
- Hopp, W.J., Tekin, E., and Van Oyen, M.P., 2004b. Benefits of skill chaining in serial production lines with cross-trained workers. *Management Science*, 50 (1), 83-98.
- Hottenstein, M.P. and Bowman, S.A., 1998. Cross-training and worker flexibility: a review of DRC system research. *The Journal of High Technology Management Research*, 9 (2), 157-174.
- Iravani, S.M., Van Oyen, M.P., and Sims, K.T., 2005. Structural flexibility: a new perspective on the design of manufacturing and service operations. *Management Science*, 51 (2), 151-166.

-
- Jaber, M.Y., Neumann, W.P., 2010 Modeling worker fatigue and recovery in dual-resource constrained systems. *Computers & Industrial Engineering*, 59 (1), 75-84.
- Jason, L. A., Richman, J. A., Rademaker, A. W., Jordan, K. M., Plioplys, A. V., Taylor, R., McCready W., Huang C.F., Plioplys S. 1999. A community-based study of chronic fatigue syndrome. *Archives of Internal Medicine*, 159 (18), 2129-2137.
- Jayaram, J., Vickery, S.K., Droge, C., 1999. An empirical study of time-based competition in the North American automotive supplier industry. *International Journal of Operations and Production Management*, 19 (10), 1010-1033.
- Jensen, P.L. 2002. Human factors and ergonomics in the planning of production. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 29 (3): 121 – 131.
- Julka, N., Karimi, I., Srinivasan, R., 2002. Agent- Based Supply Chain Management: Framework and a Refinery Application. *Computers and Chemical Engineering*, 26 (12),1755-1769.
- Kannan, V.R. and Jensen, J.B., 2004. Learning and labour assignment in a dual resource constrained cellular shop. *International Journal of Production Research*, 42 (7), 1455-1470.
- Kara, S., Kayis, B. and O’Kane, S. 2002. The role of human factors in flexibility management: a survey. *International Journal of Human Factors and Ergonomics in Manufacturing*, 12 (1), 75-119.
- Kara, S. and Kayis, B. 2004. Manufacturing flexibility and variability: an overview. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 15 (6), 466-78.
- Kazmierczak, K., Neumann, W.P. and Winkel, J. 2007. A case study of serial-flow car disassembly: ergonomics, productivity, and potential system performance. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing*, 17 (4). 331-51.
- Kher, H. V. 2000. Examination of flexibility acquisition policies in dual resource constrained job shops with simultaneous worker learning and forgetting effects. *Journal of the Operational Research Society*, 51 (5), 592-601.
- Koste, L.L., and Malhotra, M.K. 1999. A theoretical framework for analyzing the dimensions of manufacturing flexibility. *Journal of Operations Management*, 18 (1), 75-93.
- Koste. L.L. Malhotra, M.K., Sharma s., 2004. Measuring Dimensions of Manufacturing Flexibility. *Journal of Operations Management*, 22 (2), 171-196.
- Lau, R.S.M., 1996. Strategic Flexibility: A New Reality for World-Class Manufacturing. *SAM Advanced Management Journal*, 61 (2), 11-15,
- Law, A.M., and Kelton, W.D., 2000. *Simulation Modeling and Analysis*. New York: McGraw-Hill.
- Leigh, J. P., Markowitz, S. B., Fahs, M., Shin, C. and Landrigan, P. J. 1997 Occupational injury and illness in the United States. Estimates of costs, morbidity, and mortality. *Archives of Internal Medicine*, 157 (14),1557-68

-
- Little, J. D. C. 1961, A Proof of the Queueing Formula $L = \lambda W$. *Journal of Operations Research*, 9 (3), 383-387.
- McCreery, John. K. and Krajewski, Lee. J. 1999. Improving performance using workforce flexibility in an assembly environment with learning and forgetting effects. *International Journal of Production Research*, 37 (9), 2031-2058.
- McCreery, J., Krajewski, L., Leong, G. and Ward, P. 2004. Performance implications of assembly work teams, *Journal of Operations Management*, 22 (4), p387-412.
- Merengo, C. , Nava, F. and Pozzetti, A. 1999. Balancing and sequencing manual mixed-model assembly lines. *International Journal of Production Research*, 37 (12), 2835-2860.
- Meyers, F., Stewart J., 2002,. *Motion and Time Study for lean manufacturing*, 3rd Edition. Upper Saddle River, NJ. :Prentice Hall.
- Molleman, E. and Van den Beukel, A., 2007. Worker flexibility and its perceived contribution to performance: the moderating role of task characteristics. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing*, 17 (2), 117–135.
- Monostori, L., Váncza, J., Kumara, S. R. T., 2006. Agent-based systems for manufacturing. *Annals of the CIRP*, 55 (2), 672-720.
- Montgomery, D.C., 2004. *Design and analysis of Experiments*. Sixth Edition. NY: John Wiley & Sons, Inc.
- Montoya-Torres, J.R., 2006. Manufacturing performance evaluation in wafer semiconductor factories. *International Journal Productivity Performance Management*, 55 (3/4), 300–310.
- Nelson, R.T., 1967. Labor and Machine limited production system. *Management Science*, 13 (9), 648-671.
- Nelson, R. T., 1968. Dual-resource constrained series service systems. *Operations Research*, 16 (2), 324-341.
- Neumann, W.P., Kihlberg, S., Medbo, P., Mathiassen, S.E. and Winkel, J. 2002. A case study evaluating the ergonomic and productivity impacts of partial automation strategies in the electronics industry, *International Journal of Production Research*, 40 (16), 4059-75.
- Neumann, W.P. 2004. *Production ergonomics: identifying and managing risk in the design of high performance work systems*. Design Sciences, PhD thesis, Lund Technical University, Lund.
- Neumann, W.P., Winkel, J., Medbo, L., Magneberg, R. and Mathiassen, S.E. 2006. Production system design elements influencing productivity and ergonomics – a case study of parallel and serial flow strategies. *International Journal of Operations & Production Management*, 26 (8), 904-23.
- Neumann, W. P. and Medbo, P., 2009. Integrating human factors into discrete event simulations of parallel flow strategies. *Production Planning & Control*, 20 (1), 3-16.

-
- Neumann, W.P., Dul, J., 2010. Human factors: spanning the gap between OM and HRM. *International Journal of Operations & Production Management*, 30 (9), 923-950.
- Ohno, T. 1988. *Toyota Production System: Beyond Large-scale Production*. Portland: Productivity Inc.
- Oxenburgh, M., Marlow, P., Oxenburgh, A. 2004. *Increasing Productivity and Profit through Health and Safety: The Financial Returns from a Safe Working Environment*. CTC Press. Taylor & Francis.
- Park, P.S., Bobrowski, P.M., 1989. Job release and labor flexibility in a dual resource constrained job shop. *Journal of Operations Management*, 8 (3), 230-249.
- Park, P.S., 1990. A study of labor assignment rules with bottlenecks. *Omega*, 18 (3), p. 247.
- Park, P.S., 2003. The Examination of Worker Cross-training in Dual Resource Constrained Job Shop. *European Journal of Operational Research*, 52 (3), 291-299.
- Pfeffer, J. 1994. Competitive advantage through people. *California Management Review*, 36 (2), 9-28.
- Ping He, Xiaoyan Xu & Zhongsheng Hua, 2012: A new method for guiding process flexibility investment: flexibility fit index, *International Journal of Production Research*, 50 (14), 3718-3737.
- Punnett, L., 1999. The costs of work-related musculoskeletal disorders in automotive manufacturing. *New Solutions: A Journal of Environmental and Occupational Health Policy*, 9 (4), 403-426.
- Quinzi, A.J., 2004. A Sequential Stopping Rule For Determining The Number Of Replications Necessary When Several Measures Of Effectiveness Are Of Interest. *Proceedings of Tenth U.S. Army Conference on Applied Statistics*.
- Safizadeh, M., Ritzman, L., and Mallick, D., 2000. Revisiting alternative theoretical paradigms in manufacturing strategy. *Production and Operations Management*, 9 (2), 111-127.
- Salum, Latif and Araz, Özlem Uzun 2009. Using the when/where rules in dual resource constrained systems for a hybrid push-pull control. *International Journal of Production Research*, 47 (6), 1661- 1677.
- Santos, E., & Resnick, M. L. 1999. *The effects of fatigue on quality and productivity in repetitive tasks*. Florida International University.
- Sethi, A. K., & Sethi, S. P. 1990. Flexibility in manufacturing: A survey. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 2 (3), 289-238.
- Siebers P.O. 2004. *The Impact of Human Performance Variation on The Accuracy of Manufacturing System Simulation Models*. PhD Thesis, School of Industrial and Manufacturing Science, Cranfield University.
- Siebers, P.O. 2006. *Worker performance modeling in manufacturing systems simulation: proposal for an agent-based approach*. In Handbook of Research on

- Nature Inspired Computing for Economics and Management, ed. J. P. Rennard. Hershey, PA: Idea Group Publishing.
- Siebers, P. O., & Aickelin, U. 2008. Introduction to multi-agent simulation. In F. Adam & P. Humphreys (Eds.), *Encyclopedia of decision making and decision support technologies* 554–564. Pennsylvania: Idea Group Publishing.
- Siebers, P. O., Aickelin, U., Celia, H., & Clegg, C. W. 2010. Simulating customer experience and word-of-mouth in retail – A case study. *Simulation: Transactions of the Society for Modeling and Simulation International*, 86, 5-30.
- Slomp, Jannes and Molleman, Eric 2002. Cross-training policies and team performance. *International Journal of Production Research*, 40(5), 1193-1219.
- Stanton, N.A., & Baber, C. 2003. On the cost-effectiveness of ergonomics. *Applied Ergonomics*, 34 (5), 407-411.
- Studenmund, A. H. 2010. *Using Econometrics: A Practical Guide*. Sixth edition. Lebanon, Indiana, U.S.A.: Prentice Hall.
- Treleven, M.D., Elvers, D.A., 1985. An investigation of labor assignment rules in a dual-constrained job shop. *Journal of Operations Management*, 6 (1), 51-68.
- Treleven, M.D., 1989. A review of dual resource constrained system research. *IIE Transactions*, 21(3), 279-287.
- Tucker P., 2003. The Impact Of Rest Break upon accident risk, fatigue and performance: A review. *Work&Stress*, 12(2), 123-137.
- Tukey, J.W., 1977. *Exploratory Data Analysis*. Reading, Massachusetts: Addison-Wesley.
- Volberda, H.M. 1998. *Building The Flexible Firm: How To Remain Competitive*. London: Oxford University Press.
- Weeks, J.K., Fryer, J.S., 1976. A simulation study of operating policies in a hypothetical dual-constrained job shop. *Management Science*, 22 (12), 1362-1371.
- Wernerfelt, B., Karnani. A., 1987. Competitive Strategy Under Uncertainty. *Strategic Management Journal*, 8 (2), 187-194.
- Wild, R., 1975. On the selection of mass production systems. *International Journal of Production Research*, 13 (5), 443–461.
- Williamson, A., Lombardi, D.A., Folkard, S., Stutts, J., Courtney, T.K., Connor, J., 2011. The links between fatigue and safety. *Accident Analysis and Preventions*, 43, 498–515.
- Wilke, H., Meertens, H., 1994. *Group performance*. London: Routledge.
- Wilson, J.R. 2000. Fundamentals of ergonomics in theory and practice. *Applied Ergonomics*, 31 (6), 557-567.
- Wirojanagud, P., Gel, E.S., Fowler J.W., Cardy R., 2007. Modeling inherent worker differences for workforce planning. *International Journal of Production Research*, 45 (3), 525–553.

-
- Wooldridge, M., & Jennings, N. 1995. Intelligent agents: Theory and Practice. *Knowledge Engineering Review*, 10, 115–152.
- Yang, J., Posner M. F., 2010. Flow Shops with WIP and Value Added Costs. *Journal of Scheduling*, 13 (1), 3-16.
- Zamiska, J. R., Jaber, M. Y., & Kher, H. V. 2007. Worker deployment in dual resource constrained systems with a task-type factor. *European Journal of Operational Research*, 177 (3), 1507–1519.

Capitolo 4

Conclusioni

Il mio percorso di studi svolto durante il Dottorato in Ingegneria ed Economia dell'Innovazione è stato per la quasi totalità concentrato sull'utilizzo di strumenti di simulazione per lo studio e l'ottimizzazione dei sistemi di produzione.

Durante il primo anno, la naturale prosecuzione della tesi di laurea specialistica ha portato al completamento del Progetto Piano Industriale di Confidunstria nel quale il caso Confalone è stato presentato.

L'esperienza maturata nella modellazione DES ha permesso di apprezzare i vantaggi di questo tipo di approccio ma anche di individuare i suoi punti deboli.

Dal punto di vista della modellazione, DES propone la costruzione del modello attraverso la combinazione di blocchi logici standard predefiniti che riproducono lo schema di flusso del processo. Questo tipo di approccio si adatta bene alla simulazione di sistemi manifatturieri soprattutto se i fattori umani non sono considerati. Lo studio su un caso reale ha evidenziato l'approfondito livello di dettaglio che questo approccio richiede. Dal punto di vista dell'utilizzatore, questo rappresenta un vantaggio perché aumenta l'accuratezza e la credibilità dei modelli realizzati e quindi delle soluzioni migliorative proposte. Dall'altro però rappresenta un ostacolo poiché rispetto ad altri approcci, DES è decisamente una metodologia "data hungry".

Un altro aspetto importante riguarda la complessità di utilizzo: sebbene negli ultimi anni, alcune società fanno uso di questi tool, quasi sempre si avvalgono di consulenza esterna perché mancano le risorse specializzate per realizzare questo tipo di studio. Inoltre i costi di training sono elevati così come i costi di sviluppo dei modelli. In particolare, questi ultimi sono causati da lunghi tempi di sviluppo dei modelli sia per la complessità computazionale che per procedure di modellazione lunghe e ripetitive.

Un'applicazione basata su ACCESS è stata sviluppata per accelerare la fase di costruzione dei modelli e facilitare l'utilizzo agli utenti meno esperti. I risultati, valutati in termini di tempo di modellazione e numero di operazioni elementari realizzate sono stati comparati con la procedura tradizionale del software DES di QUEST. La verifica è stata effettuata attraverso la costruzione di numerosi modelli di

impianti produttivi e infine è stato ricostruito il modello della linea rotoli della cartotecnica Confalone. I risultati hanno evidenziato una riduzione del 50% dei tempi di costruzione del modello evidenziando come è possibile facilitare l'utilizzo di tool DES attraverso questo tipo di applicazione.

Infine, la tesi ha presentato uno studio di simulazione basato su metodologia ABM per l'analisi di un sistema DRC configurato come una linea di assemblaggio con layout flow-shop. Regole di assegnazione degli operatori sono state implementate per modellare la cosiddetta "workforce flexibility". L'approccio di modellazione non convenzionale di ABM, seppur non sviluppato specificatamente per sistema produttivi, ha comunque permesso di realizzare un modello ad agenti per una linea di assemblaggio costituita da 8 stazioni di assemblaggio e buffer intermedi. La complessità di modellare le regole di assegnazione degli operatori è venuta meno grazie alla tipologia di costruzione dei sistemi ad agenti. Nel modello infatti sono stati definiti tre tipologie di agenti: agente "Macchina", agente "Prodotto" e agente "Operatore". Gli agenti così definiti e inseriti in un ambiente possono scambiare informazioni tra di loro e mostrare un comportamento che scaturisce da regole definite per ognuno di essi.

Una campagna di esperimenti (DOE) e un'analisi ANOVA hanno permesso di valutare i risultati del sistema produttivo in termini di prestazioni del sistema e "human effects". Il modello ABM sviluppato ha permesso di comparare i risultati ottenuti sul sistema di produzione in configurazione DRC con quelli presenti in letteratura.

La metodologia ABM ha inoltre mostrato grandi potenzialità nell'integrazione di fattori umani nei processi di ottimizzazione dei sistemi produttivi superando la complessità di programmazione dell'approccio DES. Future applicazioni proveranno ad implementare fattori di fatica nel modello.

Bibliografia

La bibliografia analizzata e utilizzata per sviluppare questa tesi viene qui omessa poiché riportata in maniera esaustiva negli articoli riportati nella tesi.

Ringraziamenti

Questo percorso di studi mi ha dato la possibilità di collaborare con molti ricercatori e professori sia dell'Università di Salerno che di altre università.

Oltre a ringraziare il prof. Lambiase, il prof. Miranda e il prof. Iannone, devo dire un grazie speciale all'ing. Fabio Fruggiero dell'Università della Basilicata e al prof. Patrick Neumann che ha ispirato la seconda parte della tesi e mi ha ospitato alla RYERSON University - Toronto. A questi ultimi il ringraziamento per merito avermi sostenuto durante tutta la collaborazione.

Infine, senza di lei tutto sarebbe stato più difficile. Grazie Carmen.