AiIG

Associazione Italiana di Ingegneria Gestionale

XVI RIUNIONE SCIENTIFICA ANNUALE

L'IMPRESA DEL FUTURO
RETI, CLUSTERS E PIATTAFORME TECNOLOGICHE

Misure di complessità nei sistemi produttivi

De Toni A. F. (University of Udine)
Nonino F. (University of Udine)
Zanutto G. (University of Udine)

12-14 Ottobre 2005
Catania (Italia)

MISURE DI COMPLESSITÀ NEI SISTEMI PRODUTTIVI

Alberto F. De Toni[a], Fabio Nonino[b], Gianluca Zanutto[c]

Università degli Studi di Udine[+]

Sommario. Gli autori affrontano il tema della misurazione della complessità nell'ambito dei sistemi produttivi e valutano l'impiego di indici di complessità nel caso reale di un'azienda manifatturiera di tipo job shop. Il lavoro propone una revisione degli approcci esistenti in letteratura per la misurazione della complessità focalizzandosi nell'ambito del management e in particolare nei sistemi produttivi. L'utilità degli indici di complessità è stata valutata attraverso una serie di simulazioni in *System Dynamics*. I risultati del lavoro indicano che il miglior trade-off tra efficienza (intesa come saturazione) ed efficacia (intesa come velocità di attraversamento) richiede di operare ad un livello massimo di complessità (inteso come quantità di informazione da gestire).

Parole chiave: Misure di complessità, Entropia, Teoria della Complessità, Sistemi produttivi job shop, System Dynamics

1. Introduzione

Il tema della misurazione della complessità come strumento a supporto delle decisioni riguardanti la gestione dei processi operativi aziendali ha da tempo suscitato l'interesse degli studiosi di management. Un sistema complesso (Simon, 1962; De Rosnay, 1977; Prigogine, 1980) è composto da una grande numerosità e varietà di componenti o di elementi che possiedono delle funzioni specializzate, organizzati per livelli gerarchici interni, collegati da una grande varietà di legami ovvero caratterizzati da un'alta densità di interconnessioni non lineari. La non linearità delle interconnessioni rende impossibile un approccio analitico per descrivere il comportamento del sistema in tutte le sue parti, mentre è necessario un approccio sintetico, orientato dunque alla comprensione dell'intero sistema e non di ogni sua singola parte (De Toni e Comello, 2005).

Un particolare tipo di sistema complesso, detto *sistema complesso adattativo* (CAS - *Complex Adaptive System*) (Holland, 2002) possiede un'ulteriore caratteristica: si adatta ai mutamenti ed "impara", evolvendosi nel tempo verso configurazioni dette di "quasi equilibrio". Un sistema adattativo complesso è definito da Waldrop (1992) come un sistema aperto (cioè scambia con l'esterno materia, energia, informazione…) nel quale il

[a] Alberto Felice De Toni, Tel: (+39) 0432 55 83 30, e-mail: detoni@uniud.it

[b] Fabio Nonino, Tel: (+39) 0432 55 82 73, e-mail: fabiononino@uniud.it

[c] Gianluca Zanutto, Tel: (+39) 0432 55 82 96, e-mail: zanutto@uniud.it (autore corrispondente)

[+] Dipartimento di Ingegneria Elettrica, Gestionale e Meccanica, Via delle Scienze, 208 – 33100, Udine

comportamento complessivo (e complesso) del sistema emerge dall'interazione di un elevato numero di semplici componenti. In questo comportamento il sistema è in grado di adattarsi e di migliorare le proprie prestazioni nel tempo, in risposta di quanto è stato incontrato in precedenza. Diversi autori (ad esempio McCarthy *et al.*, 2000) sostengono che le organizzazioni produttive sono CAS.

Il tentativo di sviluppare una misura di complessità che riesca a considerare tutti i diversi aspetti presenti nei CAS risulta quindi particolarmente arduo (Choi *et al.*, 2001). Partendo dalla tesi che un sistema produttivo è un CAS, il presente lavoro si pone le seguenti domande di ricerca:

- E' possibile pervenire a delle misure di complessità valide in generale ed in particolare nei sistemi produttivi?
- Ammesso e concesso che si possa misurare la complessità, che indicazioni strategiche ed operative fornisce tale misura?

L'articolo è organizzato nel seguente modo. La prima parte propone una revisione della letteratura con l'obiettivo di fornire un quadro di sintesi degli:

- approcci per la misurazione della complessità (par. 2.1),
- approcci di misurazione della complessità nel management (par. 2.2)
- approcci di misurazione della complessità in ambito produttivo (par. 2.3).

La seconda parte del lavoro descrive la metodologia di ricerca utilizzata ovvero quella di un singolo caso studio esplorativo (par. 3). La terza parte descrive la selezione degli indici per misurare la complessità nei sistemi produttivi *job shop* (par. 4.1). Viene proposta la mappa causale che riproduce il comportamento dei centri di lavoro nel caso reale studiato (par. 4.2) implementata in seguito nel modello di simulazione di *System Dynamics* (par. 4.3), utilizzato per il calcolo dei valori degli indici di complessità (par. 4.4). Il lavoro si conclude dando alcune risposte rispetto ai quesiti di ricerca iniziali e proponendo futuri quesiti di ricerca.

2. Revisione della letteratura

Il fisico Larry Smarr (1985) affermò che non esiste un modo corretto per definire e misurare la complessità. Un buon punto di partenza è considerare la complessità come un aggettivo del sistema, presupponendo che il sistema abbia un elevato numero di parti e di stati. Questo significa che i sistemi con elevato livello di complessità sono difficili da descrivere e ricreare. In questo senso il termine fu utilizzato negli studi di teoria dei sistemi e teoria dell'informazione. Ad esempio nella teoria dell'informazione e nella complessità algoritmica di Shannon (1949) lo scopo era descrivere i sistemi, mentre la complessità computazionale era riferita ai problemi di ricreazione dei sistemi.

Allo scopo di fornire un quadro di sintesi sui diversi contributi presenti in letteratura sul tema della misura della complessità, è stata condotta un'analisi della letteratura pubblicata nel periodo 1948-2005 rispetto alla quale sono stati selezionati 105 contributi distribuiti in 34 articoli da riviste internazionali, 7 libri, raccolte di saggi o estratti di capitoli, 42 atti di workshop o conferenze e 22 articoli sul *web*.

L'analisi condotta si è concentrata su due aspetti principali. In una prima fase sono state approfondite le basi teoriche in riferimento alle misure di complessità presenti in ambiti quali la fisica teorica (25 articoli), teoria dell'informazione (5), scienza classica (8) e applicazioni scientifiche (8). Successivamente, con riferimento specifico al tema del management, gli ambiti approfonditi sono stati: produzione (28 articoli), supply chain (13), progettazione (3) e organizzazione aziendale (1).

2.1 Le misure di complessità in letteratura

Il primo aspetto affrontato nel corso dell'analisi della letteratura riguarda le misure di complessità in ambiti quali la fisica teorica, la teoria dell'informazione, la scienza classica e le applicazioni scientifiche. La tabella 1 fornisce un quadro di sintesi dei principali contributi analizzati, evidenziando le caratteristiche ed i sinonimi individuati in letteratura.

Sulla base di quanto emerso dall'analisi della letteratura sono state individuate due variabili di classificazione delle misure di complessità: l'oggetto della misura e l'approccio matematico utilizzato (fig. 1).

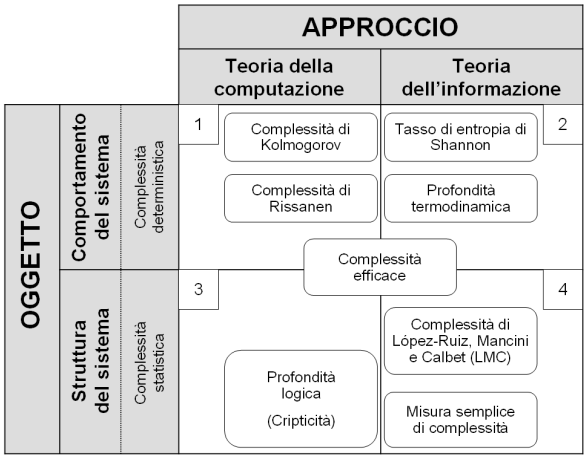

Fig. 1 - Classificazione proposta delle misure di complessità in letteratura

Con riferimento all'oggetto della misura, si possono distinguere due classi:

- Comportamento del sistema (complessità deterministica)
- Struttura del sistema (complessità statistica).

La distinzione in queste due classi è stata proposta dai ricercatori del *Santa Fe Institute* (Feldman e Crutchfield, 1998; Gell-Mann, 1995) che sottolineano come le quantità che in genere sono proposte come misure di complessità strutturale sono spesso chiamate

semplicemente misure di complessità. Per chiarezza è opportuno riferirsi ad esse come "misure di complessità statistica" distinguendole dalla complessità deterministica, legata al comportamento di tale sistema.

Per quanto riguarda l'approccio matematico seguito, si possono individuare due categorie:

- Misure basate sulla teoria della computazione;
- Misure basate sulla teoria dell'informazione.

Incrociando queste due variabili si ottiene la matrice mostrata in figura 1.

Tabella 1 - Caratteristiche delle misure della complessità e principali contributi analizzati

Denominazione - sinonimi	**Autori - Periodo**	**Caratteristiche**
Tasso di entropia di Shannon – Entropia metrica – *Shannon's entropy rate*	Shannon - fine '40, inizi '50	– Ha un massimo nel caso di stati equiprobabili e quindi per sistemi caotici. – Focus sul comportamento del sistema.
Complessità di Kolmogorov – *Algorithmic complexity* – *Algorithmic information content* – *Algorithmic information* – *Algorithmic randomness* – *Dynamical entropy* – Complessità (o entropia) di Kolmogorov – Chaitin	Kolmogorov - '50	– Richiede l'utilizzo di una UTM. – Incomputabile. – Massimizzata per stringhe casuali.
Entropia in eccesso (*Excess entropy*) – *Stored information* – *Effective measure of complexity*	Crutchfield e Packard - 1982, 1983	– La complessità di un processo dipende dalla diminuzione di capacità di prevederne il comportamento all'aumento dell'informazione disponibile. – Studia il comportamento del sistema al fine di misurarne la struttura
Profondità logica (*Logical depth*) – Cripticità (misura inversa)	Bennet - 1988	– Misura computativa temporale della struttura del sistema. – Misura della difficoltà di fare predizioni dalla teoria."
Profondità termodinamica (*Thermodynamic depth*)	Lloyd e Pagels - 1988	– La complessità è funzione del processo. – Scelta arbitraria degli stati. – Sebbene introdotta come misura della struttura, è massima per un comportamento casuale.
Complessità di Rissanen (*Rissanen complexity*) – Complessità stocastica – MDL – *Non-linear modeling*	Rissanen - 1989, 1996, 2000	– Studia il comportamento stocastico del sistema. – Distinzione tra eventi prevedibili ed accidentali. – Massimizzata per stringhe casuali.
Complessità LMC (*LMC complexity*)	López-Ruiz, Mancini e Calbet - 1995	– La complessità dipende da due termini, entropia e disequilibrio. – Semplice da calcolare. – Formalmente non corretta in quanto non estensiva.
Complessità efficace (*Effective complexity*) – *Algorithmic Information Content*	Gell-Mann - 1995	– Mira alla misurazione di struttura e comportamento. – Dipendente dalle condizioni dell'osservazione e dell'osservatore – La complessità è creata dalle connessioni tra gli elementi.
Misura semplice di complessità (*Simple measure for complexity*)	Shiner, Davison e Landsberg -1999	– Funzione di una quantità chiamata disordine (rapporto tra due entropie). – Formalmente poco corretta.
Auto-dissomiglianza (*Self – dissimilarity*)	Wolpert, Mcready - 2002	– Richiede la creazione di un modello a partire della osservazioni sperimentali. – Richiede l'osservazione del sistema su più scale. – Caso degenere di complessità efficace

Nel quadrante 1 (Complessità deterministica – Teoria della computazione) è presente una delle misure "classiche" della complessità di un sistema, cioè la complessità di Kolmogorov, nata allo scopo di adattare la teoria dell'informazione di Shannon allo studio dei sistemi dinamici. La complessità di Kolmogorov *K(x)* di un oggetto *x* è la lunghezza, in bit, del più breve programma, che quando gira su di una UTM (*Universal Turing Machine*) dà in output *x* e poi si ferma.

La misura di complessità di Kolmogorov è stata sviluppata prima della teoria della complessità (Prigogine, 1980) al fine di caratterizzare fonti deterministiche che si comportavano in maniera apparentemente casuale. Tale misura è in genere non computabile, nel senso che semplicemente non esiste alcun algoritmo in grado di computarla (Shirazi, 2003). Si può dunque affermare che, sebbene non trovi un utilizzo dal punto di vista pratico, la misura di complessità di Kolmogorov costituisce in un certo senso una capostipite delle misure di complessità.

Negli anni successivi alla nascita di questa misura, è emerso come misurare la casualità e l'imprevedibilità del sistema non sia sufficiente a cogliere tutti gli aspetti legati alla complessità dei sistemi (Feldman e Crutchfield, 1998). In modo analogo, il principale limite delle misure di complessità deterministica che utilizzano la teoria dell'informazione (quadrante 2) riguarda la natura di tali misure che coglie la casualità del comportamento, non considerando la struttura del sistema. Un esempio di complessità deterministica nell'ambito della teoria dell'informazione è costituito dal tasso di entropia di Shannon, o *entropia metrica*, che si può definire come una misura del grado di imprevedibilità a lungo termine di un sistema (Crutchfield e Shalizi, 1998).

Per quanto riguarda le misure di complessità statistiche nella teoria della computazione (quadrante 3), portiamo ad esempio la profondità logica (Bennet, 1988), definita come il tempo necessario per una macchina di Turing universale per elaborare il programma più breve che descriva la configurazione di un sistema. Nello stesso quadrante troviamo la cripticità, definita come l'inverso della profondità logica (Gell-Mann, 1995). Come nel caso delle misure di complessità deterministica basate sulla teoria della computazione, anche queste misure sono affette dal problema dell'incomputabilità.

L'interesse e gli sforzi negli ultimi anni si sono maggiormente concentrati sulle misure di complessità statistica che utilizzano la teoria dell'informazione (quadrante 4). Si tratta di misure che accanto ad un indice entropico, adatto per descrivere la casualità del comportamento del sistema, associano un termine correttivo, allo scopo di rispettare le condizioni al contorno, per le quali la misura di complessità deve diminuire per sistemi perfettamente ordinati o perfettamente casuali (López-Ruiz *et al.*, 1995; Shiner *et al.*, 1999). Come afferma Crutchfield (1990) il limite principale della teoria dell'informazione è che essa non fornisce un'indicazione diretta della struttura alla base di un processo, in quanto è una descrizione probabilistica del suo comportamento; pertanto viene identificata la quantità di

informazione, non la sua natura. E' opportuno sottolineare che le misure entropiche sono utilizzate molto più spesso di altri tipi di misure in quanto "esistono molti metodi *ad hoc* per rilevare la struttura, ma nessuno è applicabile in maniera così ampia come l'entropia lo è per indicare la casualità" (Crutchfield e Shalizi, 1998). In ultima analisi "la complessità" del sistema (il suo tessuto di interazioni tra gli elementi costituenti) genera una distribuzione di probabilità che descrive gli stati in cui si può trovare il sistema. La funzione entropia elabora tali distribuzioni di probabilità.

Infine, la complessità efficace (Gell-Mann, 1995), posizionata all'intersezione dei quattro quadranti, è una misura delle regolarità di un sistema e può essere definita come la lunghezza di una descrizione altamente compressa delle sue regolarità.

2.2 *Misure di complessità nel management*

Riferendosi solamente alle misure di complessità nell'ambito del management, in letteratura sono state individuate due classificazioni delle misure di complessità di un sistema produttivo (tabella 2): quelle di Gaio *et al*., (2002) e Calinescu *et al.* (2000).

Tabella 2 - Classificazioni di misure entropiche della complessità nel management

Classificazioni	Tipo di misura	Varianti	Obiettivi
Gaio *et al.*, 2002	*Fitness*		
	Misure entropiche (teoria dell'informazione)	Complessità statica	Studio della struttura delle operazioni produttive
		Complessità dinamica	Studio del comportamento delle operazioni produttive
Calinescu *et al.*, 2000	Misure entropiche (teoria dell'informazione)	Approccio di Deshmukh (1998)	Valutazione della complessità in base alla struttura del sistema
		Approccio di Frizelle (1995)	Valutazione della complessità strutturale e dinamica
		Approccio di Karp e Ronen (1992)	Valutazione della quantità di informazioni prodotte dai lotti
		Approccio di Yao (1990)	Valutazione flessibilità di instradamento dei componenti nei FMS

Gaio *et al.* (2002) individuano due principali famiglie di misure di complessità:

- le misure di fitness;
- le misure di entropia (complessità statica e dinamica).

Per *fitness* s'intende il grado di adattamento di un organismo all'ambiente (Darwin nel 1859 parlava di "*survival of the fittest*"). In un contesto evolutivo la complessità genera vantaggi e possibilità nell'adattamento (Schuster, 1996). Da qui il parallelismo tra il concetto di *fitness* ed il concetto di complessità. Negli anni successivi il concetto di fitness è stato declinato nell'ambito gestionale ed organizzativo nello studio di:

- Sviluppi e cambiamenti organizzativi (Teece *et al.*, 1997)
- Evoluzione delle strutture organizzative (Westhoff *et al.*, 1996)

– Selezione delle tecnologie (Kauffman, 1995)

In merito alle misure di tipo entropico Gaio *et al.* (2002) distinguono tra complessità statica e dinamica. Le misure di complessità statica riguardano la struttura delle operazioni produttive. La complessità dinamica (o operativa) viceversa fa riferimento all'analisi dei sistemi nel tempo, ovvero studia l'andamento degli stati effettivi che il processo assume nel tempo considerato.

Calinescu *et al.* (2000) distinguono quattro approcci di misura della complessità attraverso misure entropiche sviluppate da Deshmukh (1998), Frizelle (1995), Karp e Ronen (1992) e Yao e Pei (1990). In aggiunta ai quattro approcci riportati, con l'analisi della letteratura sono stati individuati ulteriori studi che considerano delle misure entropiche per la misurazione della complessità. La figura 2 illustra il numero di lavori analizzati in riferimento ai diversi ambiti del management.

		Autore – Scuola di riferimento								
		Scuola Oxford - Cambridge 1995	A. Deshmukh 1998	A. Karp e R. Ronen 1992	D. D. Yao 1990	V. Kumar 1985	Allon, Kroese, Raviv, Rubinstein 2004	R. Janow 2004	Nam P. Suh 2004	R. Johnston 1998
Ambito	Supply chain	13								
	Produzione (Prodotto-Processo)	16	2							
	Produzione (Produzione a lotti)			2						
	Flexible Manufacturing Systems				1					
	Flessibilità in produzione					2				
	Localizzazione buffer						1			
	Organizzazione produzione	1								
	Organizzazione aziendale							1		
	Progettazione	1							1	
	Mercato									1

Fig. 2 – Mappatura dei casi di misurazione entropica nel management in letteratura

In particolare si possono distinguere i seguenti approcci:

– Scuola di Cambridge – Oxford: il punto di partenza del progetto di ricerca coordinato delle due università è costituito da un primo lavoro di Frizelle (1995). Vengono utilizzati due tipi di misure, entrambe entropiche, per definire:
  – Complessità strutturale (funzione della struttura delle operazioni produttive);
  – Complessità operativa (funzione del comportamento delle operazioni produttive).

  Le misure definiscono il livello d'incertezza (e quindi la quantità di informazione necessaria) nella descrizione di un sistema.
– Deshmukh (1998): l'approccio di Deshmukh mira ad analizzare la complessità statica in un sistema produttivo utilizzando una misura di tipo entropico.
– Karp e Ronen (1992): l'obiettivo dello studio è dimostrare, tramite l'utilizzo di una formula entropica, che lotti di produzione di dimensioni minori implicano una maggiore

facilità di gestione del sistema produttivo in quanto richiedono una ridotta quantità di informazione.

- Yao e Pei (1990): lo studio riguarda l'instradamento dinamico dei componenti (*dynamic parts routing*) all'interno degli FMS (*flexible manufacturing systems*) al fine di quantificare la flessibilità. Gli autori sviluppano una misura basata sull'entropia che incorpora le caratteristiche dei macchinari e del sistema che contribuiscono alla flessibilità dell'instradamento.
- V. Kumar (1987): la ricerca riguarda lo sviluppo di misure di flessibilità; tra queste viene creata anche una misura entropica di flessibilità.
- G. Allon, D. P. Kroese, T. Raviv, R. Y. Rubinstein (2004): In questo lavoro è stato proposto un algoritmo di ottimizzazione basato su una formula entropica per la risoluzione del problema dell'allocazione dei buffer all'interno di un sistema produttivo.
- Nam P. Suh (2004): l'approccio mira a stabilire la complessità della progettazione. Il lavoro è basato sulla tecnica dell'*axiomatic design* come mezzo per arrivare a definire le probabilità che una funzionalità del prodotto sia soddisfatta in maniera soddisfacente dai parametri di progettazione; in particolare è stata usata una misura entropica per definire un indice di complessità.
- Janow (2004): l'autore si propone di estendere l'utilizzo di elementi della teoria dell'informazione (come la massima capacità trasmissiva di un canale) in aggiunta alla misura entropica di Shannon per spiegare il comportamento delle grandi organizzazioni, in cui i nodi (persone) attraverso cui passano le informazioni sono numerosi.
- R. Johnston (1998): l'autore utilizza una formula entropica per dimostrare che l'impossibilità di soddisfare il mercato mediante il ricorso a lotti unitari di produzione genera un livello minimo di costi che non sono eliminabili.

2.3 Misure di complessità in ambito produttivo

A conclusione dell'analisi della letteratura si propone una classificazione delle misure entropiche di complessità che si riferiscono ad un contesto produttivo (tabella 3). Le variabili di classificazione selezionate sono gli obiettivi degli studi ed i parametri della formulazione matematica.

Tabella 3 - Misure entropiche in ambito produttivo

Autori	**Obiettivi degli studi**	**Parametri della formulazione matematica**
Frizelle, 1995 Desmukh, 1998	Complessità (quantità di informazione necessaria a descrivere il sistema)	Stato delle risorse
Karp & Ronen, 1992	Dimensionamento lotti	Numero di prodotti Tempi di lavorazione
Kumar, 1987 Yao & Pei, 1990	Flessibilità	Struttura delle operazioni produttive
Allon et al., 2004	Allocazione buffer	Prestazioni richieste Stato macchinari

Gli obiettivi considerati sono:

- Complessità, intesa come la quantità di informazione necessaria a descrivere il sistema. L'interesse di Frizelle (1995) e Deshmukh (1998) riguarda esplicitamente lo studio della complessità di un sistema produttivo.
- Dimensionamento dei lotti: l'obiettivo della ricerca di Karp e Ronen (1992) è dimostrare che lotti di produzione di dimensioni minori implicano una maggiore facilità di gestione del sistema produttivo in quanto richiedono una ridotta quantità di informazione per essere gestiti.
- Flessibilità: si possono distinguere due principali misure entropiche di complessità in riferimento alla flessibilità:
  - Kumar (1987) intende fornire semplicemente una misura in grado di quantificare la flessibilità di un sistema di produzione.
  - Yao e Pei (1990) inseriscono la propria misura di flessibilità all'interno di una metodologia che possa essere utilizzata sul piano di produzione per prendere decisioni in tempo reale.
- Allocazione dei buffer: la misura sviluppata da Allon *et al.* (2004) ricorrre ad una formula entropica all'interno di un algoritmo di ottimizzazione per l'allocazione dei *buffer*.

Per parametri della formulazione matematica si intende la natura delle variabili che compaiono nelle formulazioni proposte. In particolare si possono distinguere:

- Stato delle risorse:
  - Frizelle (1998) riconosce che l'aspetto più importante per un sistema produttivo è la complessità operativa (o dinamica) e considera come risorsa il sistema formato dal macchinario e dalla sua coda. Lo stato studiato è determinato dal livello di coda presente rispetto ad un livello di riferimento.
  - Deshmukh (1998) definisce una misura di complessità statica che è funzione dei requisiti di processo dei componenti da produrre e delle caratteristiche dei macchinari.
- Karp e Ronen (1992) definiscono una misura entropica che è funzione di parametri quali numero di stazioni della linea di produzione, il numero di codici che devono essere realizzati per un dato prodotto, il numero di codici per lotto, il numero di lotti ed il rapporto tra il tempo lordo di produzione (calcolato come tempo di lavorazione + tempo speso nel buffer dei prodotti finiti) ed il tempo netto (solo il lead time di processo) nel caso in cui l'intera quantità sia prodotta in un singolo lotto.
- Struttura delle operazioni produttive:
  - Kumar (1987) considera la probabilità che una lavorazione sia realizzata in una determinata stazione di lavoro.
  - Yao e Pei (1990) considera la probabilità che una lavorazione sia realizzata in una determinata stazione di lavoro considerando anche le probabilità che i macchinari adibiti all'operazione successiva siano guasti.

- G. Allon *et al.* (2004) elaborano una formula entropica funzione di una sequenza di campionamento casuale (degli stati degli n macchinari) e della distribuzione di probabilità di un campionamento casuale (sugli stati degli n macchinari) in funzione di un parametro di prestazione.

Sulla base dell'analisi condotta, nei prossimi paragrafi ci si propone di valutare le indicazioni che si possono trarre dall'utilizzo delle misure di complessità individuate, con riferimento ad un sistema produttivo del tipo *job shop.*

3. Metodologia di ricerca

L'analisi della letteratura ha evidenziato lacune nell'utilizzo strategico ed operativo degli indici entropici di complessità e il singolo caso studio è particolarmente appropriato per investigazioni completamente nuove ed esplorative (Meredith, 1998). Il presente lavoro utilizza un "caso studio strumentale" (Stake, 1998), la cui funzione è sia di facilitare la comprensione di concetti più generali che di testare ipotesi in situazioni specifiche e ben descritte (Eisenhardt, 1989). Utilizzando lo schema di classificazione proposto da Yin (2003) il presente lavoro utilizza un singolo caso studio esplorativo (rispetto all'obiettivo di ricerca) con multiplo procedimento di raccolta dati (rispetto al metodo di raccolta dati).

L'obiettivo è stato quello di esplorare in profondità la relazione fra il valore della misura di complessità ed efficacia (in termini di coda media della macchina), efficienza (in termini di saturazione della macchina) e incertezza della domanda in un sistema produttivo *job shop*. Lo scopo ultimo è, infatti, di comprendere e spiegare il significato operativo di una relazione che è stata poco studiata sia in teoria che in pratica.

I casi studio tipicamente combinano metodi di raccolta dei dati come l'utilizzo di archivi, interviste, questionari ed osservazioni sul campo. Sono stati utilizzate diverse fonti nella fase di raccolta dei dati per la presente ricerca durata 10 mesi; ciò al fine di innalzare la validità sia dei costrutti che dei contenuti. I dati utilizzati sono stati ottenuti da una combinazione di fonti primarie e secondarie. I dati provenienti da fonti secondarie includono la documentazione interna e il *database* dell'azienda con i dati storici circa la quantità di codici in input nelle macchine, i livelli di coda e la capacità produttiva dei centri di lavoro. La raccolta dei dati da fonte primaria è avvenuta dopo quella da fonti secondarie tramite osservazioni del processo produttivo. Abbiamo osservato le operazioni produttive in differenti occasioni lungo un periodo di tempo di due mesi e presso differenti centri di lavoro. Questo è stato fatto per perfezionare e correggere le informazioni ottenute dai dati storici e accrescere la robustezza della ricerca tramite triangolazione con differenti strumenti di raccolta dati (Voss *et al.*, 2002). Inoltre, sono state condotte alcune interviste con il *management* aziendale per aumentare la comprensione delle scelte interne legate alle regole di priorità delle macchine.

Le metodologie all'interno di un caso studio possono essere sia qualitative che quantitative o entrambe (Eisenhardt, 1989; Yin, 2003). Nella nostra ricerca abbiamo utilizzato la simulazione tramite *System Dynamics*, un metodo quantitativo per descrivere e spiegare (Meredith, 1998) il comportamento di un centro di lavoro in un sistema produttivo *job shop* nel periodo futuro di due anni. I processi all'interno dei sistemi produttivi, che come affermato sono CAS, tipicamente non sono lineari ed indeterminati, ma si manifestano come un sistema a ciclo chiuso a retroazione (*closed loop feedback system*) che impatta su un evento come conseguenza stessa di una variazione di tale evento nel tempo, variando il comportamento originale del sistema o creando un nuovo comportamento. In tale contesto la simulazione gioca un ruolo fondamentale come mezzo esplicativo (Fowler, 2003) ed in particolare la *System Dynamics* (Sterman, 2000). Inoltre una recente ricerca (Shafer e Smunt, 2004) ha evidenziato l'importanza della simulazione tramite calcolatore come metodologia di ricerca utilizzata nel campo dell'*operations management*; in particolare, i modelli simulativi negli studi relativi alla gestione delle code e dei magazzini certamente riproducono bene la realtà ed hanno utilità nel mondo reale (Meredith, 1998).

4. Misurazione della complessità in un sistema produttivo job-shop

Tra le misure di complessità produttive mappate, gli indici di complessità proposti da Frizelle (1998) e ripresi da Calinescu *et al.* (2000) sono risultati a nostro avviso i più adatti ai fini dell'applicazione al modello produttivo job shop. In particolare, gli autori citati hanno sviluppato due indici: l'indice di complessità statica e l'indice di complessità dinamica.

4.1 Gli indici di complessità

La complessità statica (o strutturale) è definita come la quantità attesa di informazione richiesta per descrivere lo stato di un sistema quando esso si trova nello stato atteso. L'indice di complessità statica (Frizelle, 1998) è associato alla varietà del sistema in riferimento allo stato pianificato o atteso. La formulazione matematica è la seguente:

$$H_{static}(S) = -\sum_{j=1}^{M}\sum_{i=1}^{N} p_{ij} \cdot \log_2 p_{ij} \quad [1]$$

dove M è il numero di risorse (ovvero il numero di macchinari), N rappresenta il numero di stati possibili in cui si può trovare la risorsa j e p_{ij} è la probabilità che la risorsa j si trovi nello stato i (Calinescu *et al*., 2000). L'indice di complessità statica può essere interpretato come una rappresentazione della contesa delle risorse produttive da parte dei diversi prodotti. In conformità con quanto affermato dagli autori, le risorse con indice di complessità statica più elevato, sono quelle potenzialmente più problematiche da gestire.

La complessità dinamica si riferisce al comportamento delle operazioni produttive e rappresenta la quantità di informazione necessaria per descrivere lo stato del sistema quando esso devia rispetto alla condizione pianificata, detta stato di controllo. Tale complessità si può calcolare esaminando il comportamento delle code (Calinescu *et al*., 2000) mediante la formula:

$$H_D = -P\log P - (1-P)\log(1-P) - (1-P)\sum_{i=1}^{M}\sum_{j\in NS_i} p_{ij}\log p_{ij} \qquad [2]$$

dove P è la probabilità che il sistema si trovi in uno stato pianificato (determinato dalla schedulazione della produzione), mentre p_{ij} è la probabilità che la risorsa *j* si trovi nello stato "fuori controllo" *i*.

4.2 Modellizzazione del caso C-Blade

Lo studio empirico è stato condotto presso la C-Blade S.p.A. di Spilimbergo (UD), una società manifatturiera che adotta un sistema produttivo di tipo *job shop*. La figura 3, attraverso una mappa causale (*causal loop diagram*), rappresenta il comportamento dei centri di lavoro nel tempo secondo un approccio "*System Dynamics*" (Forrester, 1961; Sterman, 2000), particolarmente adatto nel caso di modellizzazione di sistemi CAS (Anderson, 1999). In seguito è stato implementato il modello di simulazione (figura 4) utilizzando il software *Powersim*® ed alimentandolo con i dati consuntivi raccolti nel corso dell'anno 2004 integrati da osservazioni ripetute casuali.

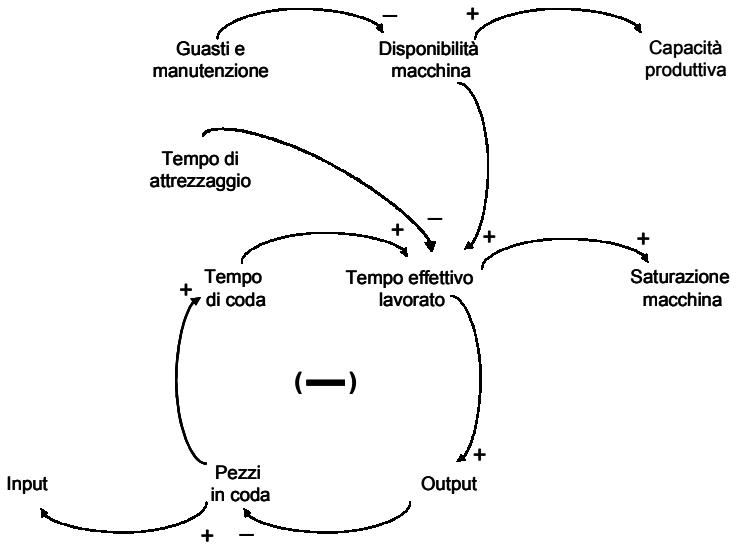

Fig. 3 – Mappa causale (*causal loop diagram*) del comportamento dei centri di lavoro

L'azienda non schedula la produzione. Il criterio di assegnazione dei lotti ad un centro di lavoro non dipende quindi da una "logica di sistema", ma solamente da ciò che è presente nel buffer a monte della macchina e risulta identico per tutti i centri. In assenza di schedulazione,

lo stato di controllo è definibile dunque a livello di singolo centro di lavoro. E' sufficiente quindi studiare il comportamento delle code per ogni centro di lavoro al fine di misurare la complessità coerentemente con la seconda domanda di ricerca (che indicazioni strategiche ed operative fornisce la misura di complessità).

La mappa causale proposta (vedi fig. 3) si riferisce dunque all'analisi delle variabili che influenzano il livello di coda medio e di saturazione della macchina, ovvero il rapporto fra tempo effettivo lavorato e la disponibilità di macchina. L'obiettivo è di calcolare i due livelli tramite un modello di simulazione che replichi correttamente la realtà dei centri di lavoro studiati. Il numero di pezzi in input alla macchina aumenta necessariamente il numero di pezzi in coda e quindi il tempo di coda. Il tempo di coda è correlato positivamente con il tempo effettivo lavorato che diminuisce all'aumentare del tempo di attrezzaggio. L'incremento del tempo effettivo lavorato aumenta il *flusso* dei pezzi in uscita dal centro di lavoro. Tale flusso riduce necessariamente il livello di coda creando un circolo a retroazione negativa o "bilanciante" (in figura evidenziato da un segno negativo). Il tempo effettivo lavorato inoltre è positivamente correlato alla disponibilità di macchina che aumenta all'aumentare della capacità produttiva e diminuisce per la presenza di guasti o per la necessità di manutenzione.

4.3 Il modello di simulazione

Dopo aver chiarito gli obiettivi dell'indagine ed il legame fra le variabili che descrivono il comportamento di un centro di lavoro, si è provveduto a sviluppare il modello di simulazione di Business Dynamics con l'utilizzo del software *Powersim*® (figura 4).

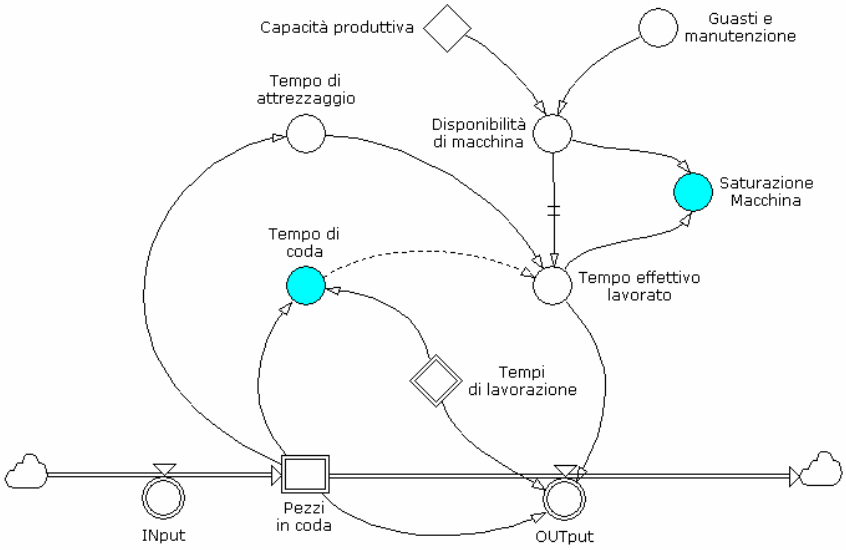

Fig. 4 - Il modello di simulazione Business Dynamics utilizzato

Il modello che rappresenta il centro di lavoro, per ogni codice lavorabile, è caratterizzato da variabili il cui valore varia attorno ad un livello prestabilito all'interno di un range ricavato sulla base dei dati consuntivi per l'anno 2004 e dalle osservazioni presso i centri di lavoro:

- Livello di input medio (I) ovvero il numero medio di pezzi in ingresso nell'unità di tempo sottoposto ad una varianza dell'input (σ_I) dovuta all'incertezza nel numero di pezzi provenienti dal centro di lavoro di monte.
- Capacità produttiva media (C) ovvero il numero medio di ore al giorno per cui la macchina è in grado di lavorare.
- Varianza della capacità produttiva media (σ_C) causata, ad esempio, da guasti, rotture e manutenzioni della macchina; è stata introdotta una componente casuale che varia all'interno dei range determinati dai dati storici.

Il software esegue il calcolo delle seguenti variabili:

- Disponibilità della macchina (D): la capacità produttiva della macchina a seguito della variazione dovuta a guasti e manutenzione (σ_C) (espressa in ore al giorno).
- Pezzi in coda (P): la quantità di pezzi che in qualsiasi momento risiede fisicamente a monte del centro di lavoro in attesa di essere lavorata
- Tempo di coda (T_C): pari alla sommatoria per tutti i codici del numero di pezzi in coda moltiplicati per i tempi di lavorazione (espresso in ore)
- Tempo di attrezzaggio (T_A) (espresso in ore)
- Tempo effettivo lavorato (T_E): disponibilità della macchina tenuto conto dei tempi di attrezzaggio e ritardata del tempo di attesa in coda (espressa in ore al giorno).
- Saturazione della macchina: corrisponde al rapporto tra il tempo effettivamente lavorato dalla macchina e la disponibilità di macchina (percentuale)

La simulazione è stata eseguita utilizzando la regola di priorità realmente utilizzata in C-Blade, cioè l'accorpamento dei lotti: i pezzi sono lavorati solo nel momento in cui la coda raggiunge una dimensione pari al lotto minimo di lavorazione stabilito per ogni centro di lavoro.

4.4 Calcolo degli indici di complessità ed analisi dei risultati

Come suggerito da Sivadasan *et al.* (2001), l'indice di complessità statica per ogni risorsa è stato calcolato utilizzando la [1] dove le p_{ij} sono pari al rapporto tra il tempo in cui il prodotto i ha impegnato la risorsa j diviso il tempo totale in cui la risorsa ha lavorato nell'arco dell'anno. Il calcolo dell'indice di complessità statica ha permesso di individuare i centri di lavoro caratterizzati da alta varietà e variabilità nel tempo di codici lavorati. Questo indice non si è dimostrato particolarmente significativo perché non ha fornito informazioni ulteriori rispetto ad un indice "tradizionale".

Per quanto riguarda il calcolo dell'indice di complessità dinamica, l'approccio di Frizelle (1998) utilizza il confronto fra gli ordini di lavoro schedulati con gli ordini consuntivi per

definire gli stati di controllo o non controllo del sistema. Lo stato in cui una risorsa si trova dipende dunque dallo scostamento tra quanto schedulato e il consuntivo. Nel caso studio in esame l'azienda non schedala; quindi risulta difficile stabilire in che misura una risorsa si trovi in uno stato di controllo o fuori controllo. Allo scopo di effettuare il calcolo dell'indice di complessità dinamica sono stati eseguiti degli adattamenti all'approccio citato.

Il sistema produttivo job shop presenta il tipico problema del *trade-off* tra un livello di saturazione che permetta di sfruttare le macchine il più possibile ed un livello di code che non dilati eccessivamente il lead time del centro di lavoro. La funzione principale delle code è, infatti, quella di consentire comunque l'alimentazione delle macchine anche in presenza di variazioni di quantità e mix dei flussi in ingresso al sistema. Come noto, la ricerca del trade-off tra tempo di coda e saturazione si pone l'obiettivo di ridurre la coda il più possibile senza diminuire la produttività. La riduzione delle code determina tempi di attraversamento più brevi e quindi una maggiore flessibilità dell'azienda nel reagire rapidamente alla domanda di mercato.

L'adattamento dell'approccio consiste nel definire lo stato di controllo come un intorno del livello di coda ottimo per il centro di lavoro. Allo scopo di determinare tale livello, è stata effettuata una serie di simulazioni per ricavare, per ogni centro di lavoro, le curve che descrivono il numero di pezzi in coda ed il livello di saturazione in funzione dell'input del sistema. Le curve ottenute sono state discusse e condivise con i responsabili di produzione.

La figura 5 mostra il livello di coda ottimale (equivalente a 13 ore) e gli intervalli per i quali sono stati definiti lo stato di controllo e gli stati di non controllo in riferimento al centro di lavoro caratterizzato dall'indice di complessità statica maggiore.

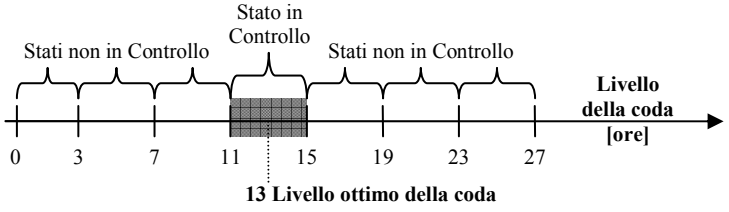

Fig. 5: Stati di controllo e non controllo del centro di lavoro

Le probabilità P che la risorsa sia sotto controllo, cioè che abbia una coda compresa nel range stabilito, e le probabilità p_i (i = 1, 2, 3) degli stati fuori controllo sono state ricavate registrando il livello di coda per ogni giorno di simulazione. Di conseguenza è stato possibile contare il numero di giorni in cui la risorsa si trovava in un determinato stato e ottenere la probabilità per ogni stato come il rapporto tra il numero di giorni rilevato ed il numero complessivo di giorni della simulazione.

A differenza degli studi presenti in letteratura, per i quali gli indici di complessità sono calcolati solamente in base ai dati consuntivi, nella presente ricerca, attraverso la simulazione, è stato possibile effettuare uno studio parametrico con il quale si è valutato il comportamento degli indici, al crescere dell'input medio I, per diversi valori di varianza

dell'input σ_I. Il vantaggio derivante dall'utilizzo della simulazione risiede nella possibilità di studiare situazioni determinate da condizioni che nella realtà non sono state raggiunte. Le simulazioni sono state condotte su un arco temporale di due anni. Le simulazioni sono state ripetute per ogni livello di input allo scopo di ridurre la dipendenza dalle oscillazioni casuali dell'input e della disponibilità di macchina. In aggiunta all'indice di complessità dinamica, per ogni periodo di simulazione e per ogni giorno dell'anno sono state registrate le seguenti grandezze, evidenziate in fig. 4:

- Livello di coda.
- Saturazione della macchina.

Queste grandezze sono state rappresentate in funzione dell'input al centro di lavoro (fig. 6 – linea ② per il livello di coda e linea ③ per la saturazione della macchina). L'intento del modello è osservare l'andamento delle due curve così tracciate e dell'indice di complessità dinamica, al variare dell'input al centro di lavoro. I risultati più interessanti riguardano il punto di massimo dell'indice di complessità dinamica (fig. 6 – linea ①).

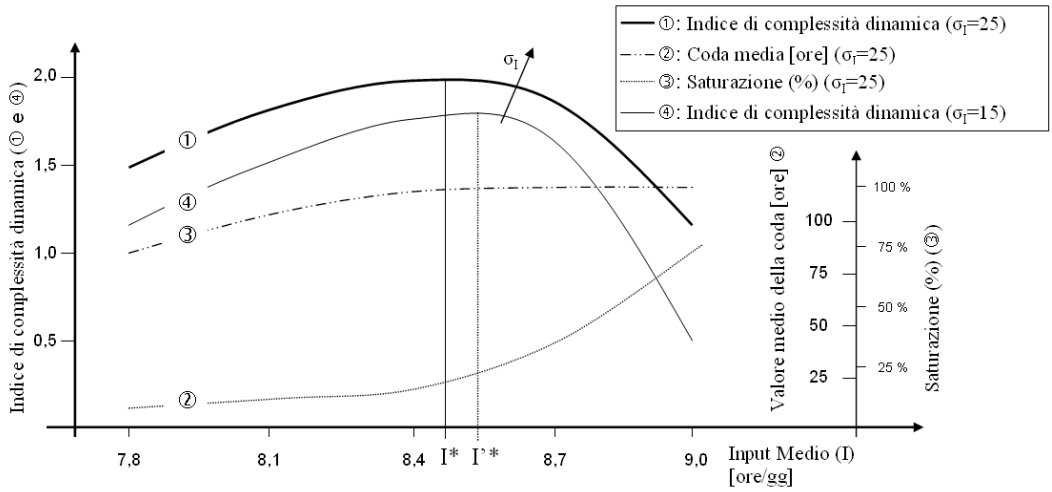

Fig. 6 - Indici di complessità dinamica totale, coda media e saturazione in funzione dell'input medio

Il primo risultato dello studio attesta che il livello medio di input *I**, a cui corrisponde il massimo dell'indice di complessità, coincide con il *trade-off* tra livello di coda e la percentuale di saturazione del centro di lavoro. In corrispondenza dell'input medio *I** si presenta un netto cambiamento di pendenza della curva che rappresenta la quantità media di coda (fig. 6 – linea ②) a fronte di un basso incremento della percentuale di saturazione del centro di lavoro (fig. 6 – linea ③). Questo risultato potrebbe apparire contro-intuitivo in quanto si potrebbe pensare che il punto di ottimo per un centro di lavoro debba corrispondere a bassi livelli di complessità.

In termini gestionali, si può descrivere l'andamento dell'indice di complessità dinamica come segue: l'azienda che si sposta sul versante di sinistra (Input < *I**) ottiene un'insaturazione delle macchine e l'azienda che si sposta verso destra (Input > *I**) tende a saturare le macchine, ma le code aumentano significativamente. In corrispondenza del livello

medio di input *I**, l'azienda coniuga l'efficacia (in termini di coda media) con l'efficienza (in termini di saturazione) a fronte della massima quantità di informazioni richieste per descrivere il sistema (massimo indice di complessità). In questa situazione di massima complessità, il sistema si trova in una condizione di "quasi equilibrio" altrimenti detta "orlo del caos" (Choi *et al.*, 2001). Tale condizione rappresenta il compromesso tra "struttura e sorpresa" (Kaufmann, 1995) ovvero la fase di transizione tra eccessiva rigidità e flessibilità del sistema.

Il secondo risultato ottenuto riguarda lo studio del comportamento dell'indice di complessità in funzione del livello medio dell'input *I* al diminuire della varianza dell'input σ_I ed a parità di capacità produttiva *C*. Dai risultati delle simulazioni (fig. 6 – linea ① e ④) la curva che rappresenta l'indice di complessità dinamica si sposta verso il basso. Inoltre, si nota che l'indice di complessità continua a presentare un massimo in corrispondenza ad un livello di input *I'** il cui valore massimo è inferiore rispetto a quello ottenuto con varianza dell'input maggiore.

Da un punto di vista gestionale, la riduzione della varianza corrisponde ad esempio ad un maggiore controllo sui flussi produttivi in ingresso al centro di lavoro studiato. Come conseguenza di un controllo maggiore, la quantità di informazioni richieste per descrivere il sistema diminuisce. Si può concludere che questo indice, attraverso la misurazione della riduzione della complessità dinamica che consegue ad un maggiore controllo sui flussi produttivi, permette di valutare l'efficacia degli interventi volti a ridurre l'incertezza sulla varietà degli input.

5. Conclusioni ed indicazioni per sviluppi futuri

La revisione della letteratura ha evidenziato la possibilità di utilizzo di alcuni indicatori entropici per la misura della complessità nei sistemi produttivi sviluppati da Frizelle (1995, 1998). Gli indicatori selezionati sono adatti all'utilizzo all'interno di sistemi adattativi complessi identificabili nei sistemi produttivi ed in particolare in un sistema del tipo *job shop.*

Il principale risultato riguarda l'indice di complessità dinamica che rappresenta una misura relativa della maggiore o minore quantità di informazione da trattare sotto diverse configurazioni impiantistiche e gestionali. Si è dimostrato utile per valutare l'efficacia degli interventi alternativi volti a diminuire l'incertezza dell'input dei centri di lavoro in un sistema produttivo job-shop.

Quanto emerso dallo studio può essere quindi sintetizzato come segue:

- E' conveniente operare in un intorno della zona a massima complessità, che consente il *trade off* tra efficacia (in termini di livello di coda media) ed efficienza (in termini di saturazione) per il centro di lavoro. In tali condizioni di lavoro (orlo del caos) la quantità di informazioni necessarie per gestire il sistema è massima;

– Se l'impresa esercita un maggior controllo sul sistema, riduce l'incertezza dell'input che si traduce in un abbassamento della curva di complessità. Ciò significa che la quantità di informazioni necessarie per gestire il sistema si riduce.

Il limite di questa ricerca riguarda lo studio di un solo centro di lavoro per volta e non dell'intero sistema produttivo. Infatti, l'indice di complessità dinamica utilizzato è un indice relativo e non assoluto e non consente confronti tra centri di lavoro a causa della diversa scala. Una direzione di sviluppo futuro potrebbe individuare una misura di complessità *normalizzata* per consentire il confronto tra gli indici di centri di lavoro diversi. La normalizzazione potrebbe derivare dal massimo livello di complessità che ogni centro di lavoro è in grado di sostenere che, in conformità alla definizione di Frizelle (1998), corrisponde alla massima quantità di informazioni che il sistema è in grado di gestire.

6. Riferimenti bibliografici

Allon G., Kroese D.P., Raviv T., Rubinstein R.Y., (2004), "Application of the cross-entropy method to the Buffer Allocation Problem in a Simulation-Based Enviroment", *Annals of Operations Research*.

Anderson P., (1999), "Complexity Theory and Organization Science", *Organization Science*, Vol. 10, n. 3, pp. 216-232.

Bennett C.H., (1988), "Logical Depth and Physical Complexity", in Herken R., (editore), *The Universal Turing Machine-- a Half-Century Survey*, Oxford University Press, pp. 227-257.

Calinescu A., Efstathiou J., Sivadasan S., Schirn J., Huaccho Huatuco L., (2000), "Complexity in Manufacturing: An Information Theoretic Approach", *Proceedings of the International Conference on Complex Systems and Complexity in Manufacturing*, Warwick, pp. 30-44.

Celestino R., (2002), *Il manager in tempo di crisi*, in Idee diade, www.diadenet.it.

Choi T.Y., Dooley K.J., Rungtusanatham M., (2001), "Supply networks and complex adaptive systems: control versus emergence", *Journal of Operations Management*, Vol. 19, pp. 351–366.

Crutchfield J.P., (1990), "Chaos and Complexity", in Burkhardt, H., Smith, B., (editori), *Handbook of Metaphysics and Ontology*, Philosophia Verlag, Monaco, Germania, pp. 139-144.

Crutchfield J.P., Packard N.H., (1982), "Symbolic Dynamics of One-Dimensional Maps: Entropies, Finite Precision, and Noise", *Intl. J. Theo. Phys.*, Vol. 21 pp. 433-466.

Crutchfield J.P., Packard N.H., (1982), "Noise scaling of symbolic dynamics entropies", in Haken H., (editore), *Evolution of Order and Chaos*, Springer-Verlag, Berlino, Germania, pp. 215-227.

Crutchfield J.P., Packard N.H., (1983), "Symbolic dynamics of noisy chaos". *Physica D*, Vol. 7, pp. 201-223.

Crutchfield, J.P., Shalizi, C.R., (1998), "Thermodynamic depth of causal states: objective complexity via minimal representation", *Phys. Rev. E*, Vol. 59, pp. 275-283.

Darwin C., (1859), *The origin of the species by means of natural selection*, John Murray, London.

Deshmukh A., Talavage J., Barash M., (1998), "Complexity in manufacturing systems, Part 1: Analysis of static complexity", *IIE Transactions*, Vol. 30, pp. 645-655.

De Rosnay J., (1977), *Il macroscopio. Verso una visione globale*, Dedalo, Bari.

De Toni A.F. e Comello L., (2005), *Prede o Ragni. Uomini ed organizzazioni nella ragnatela della complessità*, UTET, Torino.

Eisenhardt. K.M., (1989), "Building theories from case study research", *Academy of Management Review*, Vol. 14, pp. 532-550.

Feldman D.P., Crutchfield J.P., (1998), "Measures of Statistical Complexity: Why?", *Phys. Lett. A*, Vol. 238, pp. 244-252.

Forrester J.W., (1961), *Industrial Dynamics*, Pegasus Communication, Waltham, MA.

Fowler A., (2003), "Systems modelling, simulation, and the dynamics of strategy", *Journal of Business Research*, Vol. 56, pp. 135-144.

Frizelle G., (1998), *The Management of Complexity in Manufacturing, Business Intelligence*, Londra.

Frizelle G., Woodcock E., (1995), "Measuring complexity as an aid to developing operational strategy", *International Journal of Operations and Production Management*, Vol. 15, n. 5, pp. 26-39.

Gaio L., Gino F., Zaninotto E., (2002), *I sistemi di produzione*, Edizioni Carocci, Roma.

Gell-Mann M., (1995), "What is complexity?" , *Complexity*, Vol. 1, n. 1, pp. 16-19.

Holland J., (2002), "Sistemi adattativi complessi ed emergenza spontanea", in Quadrio Curzio A. e Fortis M., *Complessità e distretti industriali. Dinamiche, modelli, casi reali*, Il Mulino, Bologna,.

Lloyd S., Pagels H., (1988), "Complexity as Thermodynamic Depth", *Ann. Phys.*, Vol. 188, pp. 186-213.

Janow R., (2004), *Shannon Entropy and Productivity: Why Big Organizations Can Seem Stupid*, The Analytic Solutions Group, LLC.

Johnston, R.B., (1996), "From Efficiency to Flexibility: Entropic Measures of Market Complexity and Production Flexibility." *Proceedings of conference Complex 96: From Local Interactions to Global Phenomena*, Charles Sturt University, Albury, NSW, IOS Press, Amsterdam, pp. 130-140.

Karp A., Ronen B., (1992), "Improving shop floor control: an entropy model approach", *International Journal of Production Research*, Vol. 30, n. 4, pp. 923-938.

Kauffman S., (1995), "Escaping the Red Queen effect", *The McKinsey Quarterly*, Vol. 1, pp. 118-129.

Kauffman, S., (1995), *At Home in the Universe*, Oxford University Press, Oxford.

Kumar V., (1987), "Entropic measures of manufacturing flexibility", *International Journal of Operational Research*, Vol. 24, n. 4, pp. 957-966.

López-Ruiz R., Mancini H.L., Calbet X., (1995), "A statistical measure of complexity". *Physics Letters A*, Vol. 209, pp. 321-326.

McCarthy, I.P., Rakotobe-Joel T., (2000), *Complexity and Complex Systems in Industry*, University of Warwick, Coventry, UK.

McCarthy, I.P., Rakotobe-Joel, T., Frizelle, G., (2000), "Complex systems theory: implications and promises for manufacturing organizations", *International Journal of Manufacturing Technology and Management*, Vol. 2, n. 1–7, pp.559-579.

McCutcheon, D.M., Meredith, J.R., (1993), "Conducting case study research in operations management", *Journal of Operations Management,* Vol. 3, pp. 239-256.

Meredith J.R., (1998), "Building operations management theory through case and field research", *Journal of Operations Management*, Vol. 16 , pp. 441-454.

Nam P.S., (2004), *Complexity: Theory and Applications*, Oxford University Press.

Prigogine I., (1980), *From Being to Becoming: time and complexity in the physical sciences*, Freeman, San Francisco.

Rissanen J., (1989), *Stochastic Complexity in Statistical Inquiry*, World Scientific Publishing Company.

Rissanen J., (1996), "Fisher information and stochastic complexity", *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol. 42, n.1, pp. 40-47.

Rissanen J., (2000), "MDL denoising", *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol. 46, n. 7, pp. 2537-2543.

Schuster P., (1996), "How does complexity arise in evolution?" , *Complexity*, Vol. 2, pp. 22-30.

Shafer S.M. , Smunt T. L., (2004) "Empirical simulation studies in operations management: context, trends, and research opportunities" *Journal of Operations Management*, Vol. 22, pp. 345-354.

Shannon, C.E., (1949), *The Mathematical Theory of Communication*, University of Illinois Press Urbana, IL.

Shiner J.S., Davison M., Landsberg P.T., (1999), "Simple measure for complexity", *Phys. Rev. E*, Vol. 59, pp. 1459-1464.

Simon H., (1996), *The Sciences of the Artificial*, 3rd ed., MIT Press, Cambridge, MA.

Sivadasan S., Efstathiou J., Calinescu A., Huaccho Huatuco L. , (2001), "A discussion of the issues of state definition in the entropy-based measure of operational complexity across supplier-customer systems", *Proceedings of the 5th World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics*, Orlando.

Smarr, L., (1985), "An approach to complexity: numerical computations", *Science*, Vol. 228, pp.403-408.

Stake, R., (1998), "Case studies", in Denzin, N., Lincoln, Y. (a cura di), *Strategies of Qualitative Inquiry*, Sage, California, pp. 88-90.

Sterman J.D., (2000), *Business Dynamics. System Thinking and modelling for a Complex world*, Mc Graw-Hill.

Teece, D.J., Pisano, G., Shuen, A., (1997), "Dynamic capabilities and strategic management", *Strategic Management Journal*, Vol. 18, n. 7, pp. 509-33.

Voss C., Tsikriktsis N., Frohlich M., (2002), "Case research in operations management", *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 22, pp. 195-219.

Waldrop, M., (1992), *Complexity*, Viking-Penguin, London.

Westhoff F., Yarbrough B., Yarbrough R., (1996), "Complexity, Organisation and Stuart Kauffman 's "The Origins of Order" ", *Journal of Economic Behaviour and Organisation*, Vol. 29, n. 1, pp. 1-25.

Wolpert, D.H., Macready W.G., (2002), "Self-Dissimmilarity: An Empirically Observable Measure of Complexity", *proceedings of the First NECSI International Conference:Unifying Themes in Complex Systems*, Perseus, Cambridge, pp. 626-643.

Yin, R.K., (2003), *Case Study Research: Design and Methods*, 3rd Edition, Sage, Thousand Oaks, CA.

Yao D.D., Pei F.F., (1990), "Flexible Parts Routing in Manufacturing Systems", *IEEE Transactions*, Vol. 22, n. 1, pp. 48-55.