Strutture di mondo

Il pensiero sistemico come specchio di una realtà complessa

Volume II

a cura di
Lucia Urbani Ulivi

il Mulino

I lettori che desiderano informarsi
sui libri e sull'insieme delle attività della
Società editrice il Mulino
possono consultare il sito Internet:

www.mulino.it

STRUTTURE DI MONDO

Il pensiero sistemico come specchio di una realtà complessa

Volume II

A CURA DI
LUCIA URBANI ULIVI

SOCIETÀ EDITRICE IL MULINO

Questo volume è pubblicato con il finanziamento di CSE Crescendo, con un contributo del Dipartimento di Ingegneria elettrica, gestionale e meccanica dell'Università di Udine e con un contributo della linea D1 del Dipartimento di Filosofia dell'Università Cattolica del Sacro Cuore.

ISBN 978-88-15-24636-3

Copyright © 2013 by Società editrice il Mulino, Bologna. Tutti i diritti sono riservati. Nessuna parte di questa pubblicazione può essere fotocopiata, riprodotta, archiviata, memorizzata o trasmessa in qualsiasi forma o mezzo – elettronico, meccanico, reprografico, digitale – se non nei termini previsti dalla legge che tutela il Diritto d'Autore. Per altre informazioni si veda il sito **www.mulino.it/edizioni/fotocopie**

INDICE

Prefazione, *di Michele Lenoci* p. 7

Introduzione, *di Lucia Urbani Ulivi* 13

I. Incertezza. Un approccio sistemico, *di Ignazio Licata* 35

II. Emergenza, metastrutture e sistemi gerarchici: verso una nuova teoria generale dei sistemi, *di Eliano Pessa* 73

III. Misure di complessità per orientarsi nel dilemma della complessità, *di Alberto Felice De Toni* 89

IV. Problemi (tentativamente filosofici) del controllo, *di Luca Mari* 117

V. Sull'irriducibilità della prospettiva sistemica in biologia. Un'analisi delle convergenze dei modelli interpretativi del cancro, *di Marta Bertolaso* 143

VI. La prospettiva sistemica in psichiatria, *di Pier Luigi Marconi* 171

VII. La coscienza e il linguaggio: perché e come. Congetture quantistiche, *di Fortunato Tito Arecchi* 199

VIII. Né roccia né palude. La conoscenza verso un approccio sistemico, *di Roberta Corvi* 227

IX. Architettura e sistemica: frammenti di un discorso amoroso, *di Carlotta Fontana* p. 261

X. Musica dell'emergenza. Prospettive di ricerca sistemica in musica e in musicologia, *di Emanuela Pietrocini* 289

XI. Note di sintesi: novità, contributi, prospettive di ricerca dell'approccio sistemico, *di Gianfranco Minati* 315

Postfazione. L'approccio sistemico per un'imprenditorialità aumentata, *di Cesare Sacerdoti* 337

Gli autori 351

Alberto Felice De Toni

MISURE DI COMPLESSITÀ PER ORIENTARSI NEL DILEMMA DELLA COMPLESSITÀ

1. *Il dilemma della complessità*

Karl Popper, filosofo ed epistemologo austriaco, affermava che «la consapevolezza non inizia con la cognizione o con la raccolta di dati o fatti, ma con i dilemmi». E il dilemma che si trovano ad affrontare sistematicamente i manager delle imprese è il seguente: all'aumentare della complessità esterna dei mercati sempre più competitivi, la complessità interna delle organizzazioni va aumentata o va diminuita? Come devono rispondere le imprese? Aumentando la complessità interna, come indicato da Ashby (legge della varietà necessaria [1958]) o riducendo la complessità interna (cioè semplificando) come suggerito da Luhmann [1984]?

La legge della varietà necessaria, formulata dal sociologo britannico e pioniere della cibernetica, William Ross Ashby, rappresenta uno strumento chiave per il controllo dei sistemi: «per controllare un sistema di una certa varietà è necessario un sistema di controllo avente una necessaria varietà». La legge di Ashby applicata alle scienze manageriali comporta che all'aumentare della complessità ambientale (espressa in termini di varietà esterna) deve crescere il livello di varietà interna. La complessità organizzativa interna è quindi la risposta adattativa alla complessità esterna.

Secondo il sociologo e filosofo tedesco Niklas Luhmann un sistema è delimitato da un confine tra se stesso e il proprio ambiente caratterizzato da una complessità esterna infinita o caotica. L'interno del sistema è quindi una zona di complessità ridotta. La selezione di una quantità limitata delle informazioni disponibili all'esterno è il processo chiamato «riduzione della complessità». Semplificando il sistema, il suo grado di libertà aumenta e migliora l'efficacia della risposta.

Come affrontare quindi la crescente complessità esterna? Aumentando la varietà interna o semplificando il sistema? Chi

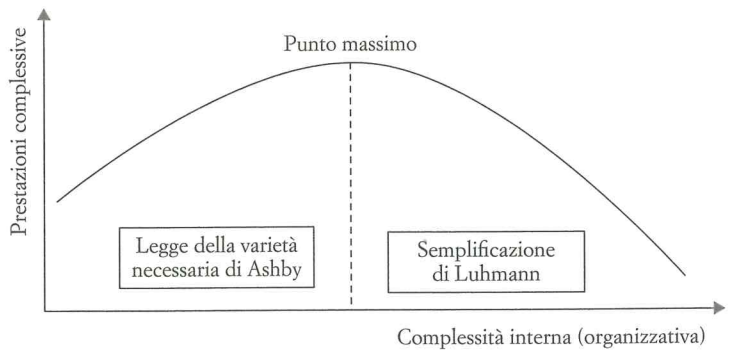

FIG. 1. Andamento delle prestazioni in funzione della complessità.

ha ragione? Ashby o Luhmann? A nostro avviso hanno ragione entrambi, ma in situazioni diverse. E per spiegarlo faremo riferimento alla figura 1, dove si è rappresentato l'andamento delle prestazioni complessive di una organizzazione all'aumentare della complessità interna. Fino ad un certo punto, per far fronte alla complessità esterna (diversi paesi, diversi mercati, diversi consumatori, ecc.) l'aumento di complessità interna (diversi prodotti, diverse tecnologie, diversi processi, ecc.) determina un aumento di prestazioni.

Ma oltre un certo limite si innesca la cosiddetta «spirale della complessità». Spesso le imprese cercano di realizzare nella stessa unità operativa prodotti diversi, per mercati diversi, con tecnologie diverse, nella convinzione di ottenere economie di scala. In realtà queste dimensioni sono tra loro in conflitto e creano problemi spesso ingestibili. Per tentare di risolverli si assume più personale in una spirale di aumento dei costi e della complessità che va fermata.

Il concetto di focalizzazione espresso da Wickham Skinner [1974], docente alla Harvard Business School, si basa sull'assunto che una unità operativa focalizzata ottiene prestazioni superiori poiché si concentra su un mix limitato di prodotti, clienti e tecnologie. La concentrazione su una sola area consente prestazioni migliori di efficienza ed efficacia.

Quando la complessità interna raggiunge valori maggiori di un limite massimo accettabile, il livello di prestazioni ottenibili è inferiore a quello che si potrebbe raggiungere con una complessità minore. Diviene allora opportuno selezionare porzioni di complessità esterna, ciascuna affrontata da sottounità focalizzate, come fece ad esempio la Zanussi negli anni settanta quando organizzò la produzione non più su un solo stabilimento, bensì su più unità produttive dedicate a specifici prodotti (lavatrici, frigoriferi, cucine, ecc.). La suddivisione in sottounità focalizzate affronta in modo «modulare» l'aumento della complessità esterna. Infatti più sottounità selezionano parti minori di complessità esterna e possono rimanere a livelli accettabili di complessità interna; ovvero aumenta la complessità totale (Ashby) e si riduce la complessità locale (Luhmann). La modularità sembra essere la via maestra per la soluzione del dilemma della complessità.

In ambito industriale la modularità non si esplica solo nel caso citato della produzione (sottofabbriche focalizzate), ma anche in quello della progettazione (struttura modulare dei prodotti) e della definizione dei cicli di produzione (famiglie di particolari secondo gli approcci della Group Technology). Più in generale il concetto di modularità può essere applicato in tutti gli ambiti dell'impresa (distributivo, commerciale, finanziario, ecc.) e non solo. Anche nella biologia evolutiva la modularità rappresenta uno schema chiave per l'evoluzione.

Per capire quando è opportuno avviare un processo di modularizzazione è necessario conoscere i livelli di complessità organizzativa. Ecco quindi che il tema della misura della complessità assume una rilevanza notevole. Oltre un certo valore di complessità è conveniente articolare la risposta dell'organizzazione in moduli.

Il presente contributo è finalizzato ad approfondire il tema della misurazione della complessità come condizione preliminare per decidere l'opportunità di una modularizzazione. Dapprima si propone una classificazione dei principali approcci esistenti in letteratura per la misurazione della complessità in ambito scientifico e successivamente, a partire da questi, viene proposta una classificazione delle misure di complessità proposte per i sistemi produttivi.

2. *La ricerca di misure di complessità*

I sistemi complessi presentano una quantità di caratteristiche e peculiarità che rendono estremamente difficile un loro studio

unitario. Ancora più arduo appare il tentativo di riuscire a sviluppare una misura di complessità che possa tenere in considerazione una grande molteplicità di aspetti.

Solow [2001] descrive con queste parole la problematica legata allo sviluppo di una teoria matematica rigorosa per la proprietà dell'emergenza nei sistemi complessi:

> L'obiettivo è sviluppare una rappresentazione assiomatica di un sistema complesso nella quale sia possibile formulare un teorema di questo tipo: Teorema 1: se un sistema complesso (qualunque esso sia) soddisfa i seguenti assiomi (qualsiasi essi siano), allora il sistema presenta la seguente proprietà emergente (qualunque essa sia).

Se di per sé è difficile descrivere in termini formali un singolo attributo della complessità quale l'emergenza (il concetto più affascinante), possiamo immaginare come possa essere arduo sviluppare una misura che tenga in considerazione tutti gli attributi pertinenti con la complessità.

Inoltre il fatto che spesso diverse discipline si siano cimentate sullo stesso argomento, ha portato a far sì che il vocabolario della complessità fosse ricco di sinonimi e che diversi ricercatori abbiano utilizzato diverse terminologie per esprimere gli stessi concetti; del resto, come fa notare ironicamente Murray Gell-Mann [1995], premio Nobel per la fisica nel 1969 per la sua fondamentale scoperta dei quark: «uno scienziato preferirebbe utilizzare lo spazzolino di qualcun altro piuttosto che la nomenclatura di un altro scienziato».

In letteratura sono presenti quindi molte definizioni sia di complessità che di misura della complessità. Un contributo che cerca di fare una prima *road-map* su questo tema è quello di Bruce Edmonds che nel 1999 produce una tesi di dottorato presso l'Università di Manchester dal titolo *Syntactic Measures of Complexity* in cui l'autore identifica ben 48 tra definizioni di complessità e di misure di complessità.

Nel 2007 l'agenzia canadese per la difesa nazionale – Defence R&D Canada – si fa promotrice di uno studio sui sistemi complessi. In un nota tecnica, intitolata *Complexity and Chaos – State-of-the-Art; Formulations and Measures of Complexity*, redatta da Mario Couture vengono censite ben 64 definizioni di complessità e misure di complessità comprensive delle 48 già individuate da Edmonds. Le definizioni proposte sono da ascrivere principalmente agli ambiti delle discipline di fisica teorica, matematica applicata, teoria dell'informazione, meccanica statistica, termodinamica, chimica e genetica.

3. *Classificazione delle principali misure di complessità in ambito scientifico*

In questo paragrafo proporremo una classificazione delle principali misure di complessità tra quelle avanzate in ambito fisico-matematico, teoria dell'informazione e teoria del calcolo. La classificazione è rappresentata dalla matrice di figura 2, ricavata dall'incrocio di due variabili utilizzate dagli studiosi del Santa Fe Institute [Gell-Mann 1995; Feldman e Crutchfield 1998]:

- l'oggetto della misura;
- l'approccio utilizzato.

Per quanto riguarda l'oggetto di studio si distingue tra misure focalizzate su:

a) struttura del sistema (misure di complessità statistica): riguarda la relazione tra i componenti di un sistema; le misure statistiche hanno il ruolo di catturare le strutture intrinseche di un processo, ossia i modelli, l'organizzazione, le regolarità, le simmetrie;

b) comportamento del sistema (misure di complessità deterministica): riguarda la casualità e l'imprevedibilità del comportamento di un sistema.

Per quanto riguarda l'approccio è importante sottolineare come 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.

Per quanto riguarda l'approccio si distingue quindi tra misure basate su:

- teoria dell'informazione (misure di complessità algoritmica): sono misure della lunghezza minima di una descrizione del sistema (la lunghezza di una descrizione è misurata in unità di informazioni); la dimensione di un messaggio che trasmette l'in-

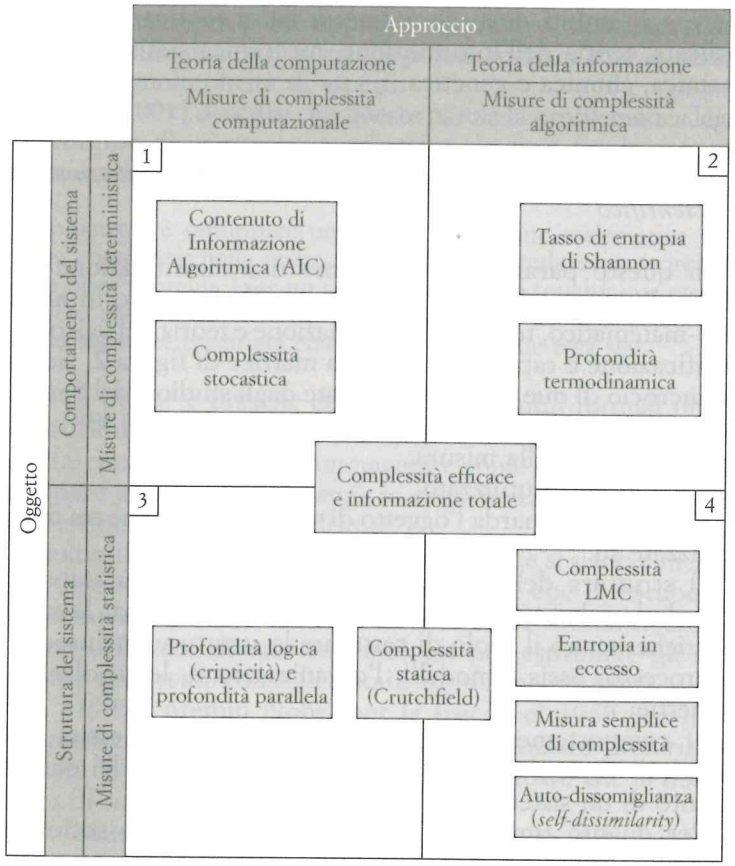

FIG. 2. Classificazione delle misure di complessità in ambito scientifico.

Fonte: Adattamento da De Toni *et al.* [2005].

formazione sul sistema è misurata in termini di memoria utilizzata; questa definizione è strettamente legata a Shannon considerato il padre della teoria dell'informazione;

– teoria della computazione (misure di complessità computazionale): sono misure di tempo (e di spazio) che si riferiscono alla quantità di tempo (e capacità) minima necessaria per effettuare un determinato calcolo per ricreare il sistema.

Le misure di complessità posizionate nella matrice di figura 2 sono di seguito brevemente descritte.

3.1. *Contenuto di Informazione Algoritmica (AIC)*

Tale metrica è stata una tra le misure di complessità che hanno avuto la maggiore influenza sulle altre, tant'è che alcune di esse ne costituiscono una variazione, quali la profondità logica. Il concetto è stato introdotto inizialmente da Kolmogorov negli anni cinquanta, nel suo studio sulle fonti deterministiche che causavano un comportamento apparentemente casuale dei sistemi complessi; per questo tale misura spesso prende il nome di *complessità di Kolmogorov*, ma considerato che anche Solomonoff [1964] e Chaitin [1977; 1987] hanno sviluppato tale concetto individualmente, tale misura è stata rinominata da Gell-Mann come *Algorithmic Information Content* (AIC).

Feldman e Crutchfield [1998] danno la seguente definizione:

> La complessità di Kolmogorov $K(x)$ di una stringa binaria x è la lunghezza in bit del più breve programma che se viene dato come input a un computer universale U [macchina di Turing] dà in output x e poi si ferma.

Tale misura quantifica in pratica quanto possa essere compressa una stringa e prende in considerazione ogni bit, sia esso casuale o meno. Secondo tale definizione le sequenze periodiche non sono complesse in quanto i percorsi ripetuti sono facilmente codificati, mentre lo sono le sequenze casuali, che non possono essere compresse in una descrizione più corta. Seguendo tale ragionamento, la complessità è associata alla difficoltà di prevedere un processo, ossia di scoprire i percorsi presenti al suo interno, e quindi di prevederne il comportamento futuro.

Questa nozione di complessità ha avuto diverse applicazioni di interesse, soprattutto nella matematica e nella scienza dei computer, ma non traduce per completo la nozione intuitiva di complessità, in termini di «quantità di struttura», ma solo in termini di casualità e imprevedibilità del sistema; infatti se la stringa x è casuale uniforme, allora la complessità $K(x)$ è massimizzata, ma la stringa non possiede alcuna struttura. Un altro problema

che presenta tale misura è la sua non computabilità, nel senso che non vi è un algoritmo in grado di calcolarla.

3.2. *Complessità stocastica*

Questa misura di complessità è stata introdotta da Rissanen [1983], conosciuta anche come *complessità di Rissanen*, si basa sul principio della *Lunghezza Minima della Descrizione* (MDL = *Minimum Description Lenght*), per cui talvolta si trova in letteratura anche con questo termine. L'autore la denomina anche come *complessità predittiva*. Rissanen propone una versione statistica della *complessità algoritmica* AIC, stimando la lunghezza del programma minimo con un modello probabilistico.

Gutierrez-Osuna e Garcia [2000] definiscono tale misura come

> un approccio intuitivo alla misurazione della complessità [...]. Immaginiamo un gioco di comunicazione in cui un mittente trasmette una sequenza di osservazioni ad un destinatario. Il principio MDL afferma che la complessità (stocastica) di un problema può essere misurata dal numero di bit usati per codificare una teoria, più il numero di bit usati per codificare le osservazioni con l'aiuto della teoria.

In questo modo il primo termine coglie le regolarità (l'inverso della complessità, se ci concentriamo sul comportamento casuale del sistema) nelle osservazioni, mentre il secondo termine misura quegli aspetti delle osservazioni non previsti dalle ipotesi.

3.3. *Tasso di entropia di Shannon*

Uno dei maggiori contributi alla teoria dell'informazione è dovuto a Claude Elwood Shannon, matematico e ingegnere statunitense, che nel 1948 pubblicò il suo famoso articolo *A Mathematical Theory of Communication*. Nell'articolo – disponibile anche come libro con un ulteriore contributo di Weaver [1949] – Shannon si concentra sul modo migliore per codificare le informazioni che un mittente vuole trasmettere, valutando e confrontando l'efficienza dei vari modi di inviare segnali. La misura di Shannon delle informazioni è una misura statistica basata sulla probabilità di ricevere un messaggio.

Anche se Shannon non l'aveva previsto, alcuni dei suoi successori hanno utilizzato la sua misura per quantificare la complessità. In fisica l'entropia misura il livello di disordine in un sistema termodinamico. Più il sistema è disordinato e maggiori sono le informazioni necessarie per descriverlo. Sistemi con entropia molto bassa sono semplici da descrivere. Così complessità ed entropia sono state associate, anche se questo non era nelle intenzioni dello scienziato statunitense.

Misure basate sull'entropia – essenzialmente probabilistiche – sono spesso usate come misure di complessità. Il principio di massima entropia [Levine e Tribus 1979] è stato usato per aiutare a formalizzare la complessità [Ferdinand 1974; Cornacchio 1977].

3.4. *Profondità termodinamica*

La profondità termodinamica è una misura di complessità introdotta da Lloyd e Pagels nel 1988. Secondo tali autori la complessità di uno stato macroscopico *s* è determinata dalla storia che ha portato ad esso, in quanto «la complessità deve essere una funzione del processo – la routine di assemblaggio – che ha portato all'esistenza l'oggetto [...]; in particolare, è una "misura di quanto è difficile mettere qualcosa insieme"» [Crutchfield e Shalizi 1998].

Gli autori forniscono la definizione per cui «la profondità termodinamica di uno stato *b* è proporzionale alla quantità di informazione (in bit) necessaria ad identificare la traiettoria che porta a *b*, data l'informazione che il sistema è in *b*» [Lloyd e Pagels 1988]; tale misura si fonda infatti sulla considerazione che se l'incertezza su come raggiungere uno stato macroscopico è bassa, e se le traiettorie sono limitate, lo stato macroscopico è facile da mettere insieme e quindi è poco profondo e il processo che porta a tale stato e che genera le traiettorie è semplice.

L'intuizione che sta dietro alla motivazione della profondità termodinamica è la seguente: se c'è poca incertezza su come ottenere uno stato macroscopico e se le traiettorie sono confinate in uno spazio ristretto, allora lo stato macroscopico è facile da mettere assieme. In questo caso il processo che porta a questo stato e che genera queste traiettorie è semplice e lo stato è poco profondo. Se l'incertezza del passato è ampia ed è stata esclusa

un'ampia gamma di alternative storiche, allora il processo è complesso e lo stato macroscopico è profondo.

3.5. *Profondità logica/criticità e profondità parallela*

La profondità logica è stata sviluppata da Bennet [1988] come misura temporale di complessità che mira a cogliere la complessità della struttura del sistema, come viene definita nell'ambito della teoria della computazione.

Gell-Mann [1995] afferma che

> per una stringa di bit [la profondità logica] è relativa al tempo richiesto ad un computer standard universale per calcolare la stringa, stamparla e poi fermarsi. Di tale tempo viene fatta la media tra i diversi programmi in grado di ultimare il compito, con una procedura che dà un peso maggiore ai programmi più brevi. Possiamo quindi considerare la profondità logica di un'entità se una descrizione di essa con un adeguato grado di dettaglio viene codificata in una stringa di bit.

Gell-Mann inoltre cita la misura di *cripticità*, spiegando che si tratta del concetto inverso rispetto alla profondità logica, in quanto

> misura il tempo necessario ad un computer per invertire il processo ed andare da una stringa di bit ad uno tra i programmi più brevi che la genererebbero. [...] approssimativamente possiamo identificare la cripticità con la difficoltà di costruire una buona teoria da un insieme di dati, mentre la profondità logica è una misura grezza della difficoltà di fare previsioni a partire dalla teoria [*ibidem*].

Tale misura si riferisce quindi alla difficoltà di trovare un'ipotesi plausibile per spiegare un oggetto ed è, al pari della profondità logica, una misura temporale di complessità.

Infine si evidenzia che una misura simile alla profondità logica è la *profondità parallela*, introdotta recentemente come misura di complessità da Machta [2011], che la definisce come «il tempo di completamento dell'algoritmo per il calcolo parallelo più efficiente necessario per costruire gli stati di un sistema. Alternativamente, è il minimo numero di passaggi logici nel calcolo parallelo necessari per trasformare numeri casuali in stati tipici del sistema». In altre parole la profondità parallela è «una misura formale dell'irriducibile quantità di storia necessaria per creare

gli stati di un sistema da condizioni iniziali semplici e può solo crescere per sistemi con un calcolo fissato».

La misura è simile alla profondità logica di Bennett, ma l'unità di misura della profondità parallela è il numero di passaggi (*step*) nel calcolo parallelo, mentre la profondità logica è definita in base al tempo di Turing, che tiene conto dei passaggi nel calcolo sequenziale.

3.6. *Complessità statistica*

La complessità statistica è una misura di complessità introdotta da Crutchfield nel 1989, nell'ambito della teoria della computazione. Come la profondità logica richiede l'inferenza di un modello di calcolo che riproduca la configurazione di un sistema statisticamente; ma mentre la profondità logica assume l'utilizzo di una macchina universale di Turing, ossia della classe più potente nei modelli per il calcolo discreto, la misura di Crutchfield richiede di utilizzare la classe di calcolo più semplice possibile per riprodurre tale configurazione, ossia la cosiddetta macchina ε (epsilon), adottando una «definizione "bottom-up" dell'elaborazione su scala gerarchica dell'informazione» [Feldman e Crutchfield 1998].

La complessità statistica misura la quantità minima di informazione sugli stati effettivi di un sistema che è necessaria per prevedere in modo ottimale le configurazioni future. Posto che «la quantità di informazione sulla distribuzione degli stati casuali rappresenta la quantità minima di memoria necessaria per prevedere in modo ottimale le configurazioni destra-sinistra» [*ibidem*], la complessità statistica è definita come l'entropia di Shannon sulla distribuzione degli stati casuali per la macchina ε.

3.7. *Complessità LMC (López-Ruiz, Mancini e Calbet)*

Gli autori sviluppano nel 1995 una misura di complessità basata sulla descrizione statistica di un sistema μ, che prende il nome di *complessità LMC* (dalle iniziali degli autori), a partire dal presupposto che questa deve annullarsi per i sistemi completamente ordinati (quale il cristallo perfetto) e per quelli perfettamente casuali (quale il gas ideale) e deve essere diversa da zero per gli altri sistemi di particelle.

Indicando con H l'informazione, pari all'entropia di Shannon, e con D il disequilibrio, riprendendo l'esempio nell'ambito dei sistemi fisici proposto dagli autori, nel caso del cristallo si ha $H_c \sim 0$ in quanto un solo stato ha probabilità 1 e tutti gli altri nulla; nel caso del gas si ha $H_g \sim K \log N$, dove K è la costante di Boltzmann e N è il numero di stati, pertanto l'entropia di Shannon è pari all'entropia termodinamica $S = K \log N$.

Il disequilibrio D è caratterizzato da una gerarchia probabilistica in cui alcuni stati tra quelli accessibili sono privilegiati, ossia hanno una maggiore probabilità di verificarsi; nel cristallo il disequilibrio è massimo in quanto uno stato prevale su tutti, per cui $D_c \rightarrow 1$ per $N \rightarrow \infty$, mentre nel gas ideale è nullo, ossia $D_g \sim 0$, in quanto tutti gli stati sono equiprobabili. In base a queste considerazioni, oltre al fatto che D deve essere maggiore di 0 per avere una misura positiva di complessità, gli autori definiscono quindi il disequilibrio come sommatoria dei quadrati delle distanze di ciascuno stato dall'equi-probabilità; per tutti i sistemi di particelle tra i due estremi proposti il disequilibrio avrà un valore tra 0 e 1.

Risulta quindi che in un cristallo il disequilibrio è elevato ma l'informazione immagazzinata è insignificante, pertanto il prodotto tra questi dà una complessità nulla, mentre nel gas ideale l'informazione è ampia ma il disequilibrio è nullo, pertanto anche in questo caso la complessità è nulla; tutti gli altri sistemi hanno un comportamento intermedio con $C > 0$.

3.8. *Entropia in eccesso*

L'entropia in eccesso è stata proposta come misura di complessità della struttura di un processo da Crutchfield e Packard nel 1982 [1982]. La metrica definita misura la memoria spaziale apparente immagazzinata nelle configurazioni e quantifica aspetti significativi della struttura delle configurazioni spaziali quali la memorizzazione e il calcolo dell'informazione, indipendentemente dai parametri del sistema; in tal modo sistemi anche molto diversi possono essere confrontati direttamente in base all'elaborazione delle loro informazioni intrinseche.

L'entropia in eccesso può essere espressa come *mutua informazione I* tra i due vettori semi-infiniti che rappresentano una configurazione; in tal modo misura la memoria spaziale apparente interna del sistema [Feldman e Crutchfield 1998]. Per spiegare tali

concetti gli autori fanno l'esempio del tempo atmosferico come processo in cui l'entropia in eccesso può essere misurata dalla diminuzione della capacità di un osservatore (in questo caso del metereologo) di prevederne il comportamento, man mano che viene accumulata informazione, in questi termini:

> Inizialmente, prima che le misurazioni vengano realizzate, il tempo potrebbe essere qualsiasi [...]. Dopo una serie di osservazioni, tuttavia, il metereologo conosce le condizioni correnti ed ha la possibilità di notare delle regolarità: le condizioni stanno cambiando? Quanto e in che modo? L'informazione addizionale permette certamente migliori previsioni rispetto a prima che le osservazioni iniziassero. Quanta più informazione viene accumulata attraverso successive osservazioni, tanto più migliora l'accuratezza delle previsioni, fino a che non è raggiunto un limite imposto dall'intrinseca imprevedibilità. L'entropia in eccesso fu inventata per monitorare come avvenga questo miglioramento verso previsioni migliori [Crutchfield 2002].

3.9. *Misura semplice per la complessità*

La misura semplice per la complessità è una famiglia di misure di complessità a due parametri α e β introdotta da Shiner, Davison, e Landsberg nel 1999, pari a una funzione quadratica della distanza dall'equilibrio termodinamico (o disordine) definita come il rapporto tra l'entropia di Boltzmann del sistema e l'entropia massima possibile, considerata pari all'entropia di equilibrio termodinamico.

Per α, $\beta > 0$ la misura soddisfa la proprietà delle misure di complessità statistiche per cui devono essere piccole o annullarsi per i sistemi completamente ordinati e per quelli completamente disordinati. L'approccio degli autori è quindi simile a quello per la complessità LMC, in cui la misura di complessità è ottenuta moltiplicando una misura di ordine con una di disordine.

3.10. *Auto-dissomiglianza (self-dissimilarity)*

L'auto-dissomiglianza è stata introdotta come misura di complessità da Wolpert e Macready nel 1997, come approccio basato sui dati empirici e non come le misure definite in precedenza in letteratura

basate su conoscenze o esperienze acquisite in altri campi. Ad esempio, alcune delle definizioni di complessità proposte sono basate su modelli di meccanica statistica presi dalla fisica, mentre altre modellano i processi usando astrazioni come automi finiti o macchine di Turing universali, appartenenti all'informatica. Nessuna di queste scelte di modello nasce da considerazioni riguardanti qualche particolare dato sperimentale.

L'intento degli autori è quello di sviluppare un modello che fornisca una spiegazione ai dati osservati, e quindi un approccio che sia fondato sulle osservazioni degli attributi di interesse di un fenomeno, ossia che abbia inizio dai dati empirici, e non da modelli definiti a priori e per tutti i sistemi complessi.

L'auto-dissomiglianza può essere infatti misurata empiricamente su quasi tutti gli insiemi di dati sul mondo reale riguardanti densità temporali che vengono definite come attributi di interesse, quali densità di massa (ad esempio nel corpo umano), densità di specie (ad esempio in una foresta), densità di simboli e informazioni (ad esempio in un computer digitale), o densità di capitale (ad esempio in un sistema economico). I sistemi complessi sono definiti densi in funzione della quantità di informazione da elaborare in una data regione; i sistemi in cui l'informazione viene elaborata in modo simile su diverse dimensioni (nel senso di scale di osservazione) o non prevedono diverse dimensioni, vengono definiti dagli autori «inefficienti nella capacità di elaborazione dell'informazione».

Considerando l'auto-dissomiglianza di un sistema misurabile su diverse dimensioni come una caratteristica peculiare del sistema, è possibile confrontare diversi tipi di sistemi che presentano tratti organizzativi condivisi.

La misura di dissomiglianza su una dimensione è definita pari all'«ammontare di informazione aggiuntiva rispetto a quella che esiste su un'altra dimensione», quantificata come «l'inferenza della massima entropia del campione nella seconda dimensione, in base al campione fornito per la prima dimensione». Essa può quindi essere considerata un «attributo di interesse» in quanto rispetta la condizione per cui «su diverse dimensioni spaziali e temporali i modelli esibiti da un sistema complesso variano grandemente, ed in modi che sono inattesi, dati i modelli sulle altre dimensioni».

A partire dalla considerazione che ogni sistema fisico è la realizzazione di un processo stocastico, gli autori adottano un

approccio probabilistico per stimare l'auto-dissomiglianza, considerando la «struttura alla dimensione *s*» come «la distribuzione di probabilità dei diversi modelli che il processo può generare alla dimensione *s*» e misurando la quantità di dissomiglianza tra due dimensioni con l'*entropia di Kullback-Leibler*.

Caratterizzando la complessità del sistema in termini di inferenza tra una dimensione e l'altra, la misura definita consente di definire la struttura a una data dimensione, di valutare la differenza tra due strutture alla stessa dimensione e di stimare la struttura su una dimensione a partire da quella su un'altra dimensione.

Si evidenzia infine che una misura che richiama lo stesso concetto dell'auto-dissomiglianza nell'ambito dei sistemi fisici è la *dimensione frattale*, che «quantifica il numero di copie di un oggetto auto-somigliante a ciascun livello di ingrandimento di un oggetto. Allo stesso modo, la dimensione frattale quantifica come la dimensione totale (o l'area o il volume) di un oggetto cambia al variare del livello di ingrandimento» [Mitchell 2009], dove il livello di ingrandimento indica lo stesso concetto di dimensione utilizzato nella definizione dell'auto-dissomiglianza.

3.11. *Complessità efficace e informazione totale*

Gell-Mann ha introdotto nel 1995 il concetto di *complessità efficace* allo scopo di trovare una nozione che corrispondesse il più possibile a ciò che si intende normalmente nell'ambito scientifico per complessità, secondo cui i processi casuali e deterministici – ma facili da spiegare – sono effettivamente semplici, mentre i processi, quale l'evoluzione, che combinano il comportamento deterministico con un elevato numero di eventi accidentali sono effettivamente complessi; «in un linguaggio non tecnico», Gell-Mann definisce la complessità efficace

> di una entità come la lunghezza di una descrizione altamente compressa delle sue regolarità. Per una definizione più tecnica è necessario un approccio formale sia per la nozione di minima lunghezza della descrizione che per la distinzione tra regolarità e le caratteristiche che sono trattate come casuali o accidentali [Gell-Mann e Lloyd 2003].

La complessità effettiva è rappresentata quindi dalla lunghezza minima della descrizione delle regolarità di un'entità, distinguen-

dola dalle stringhe che rappresentano le caratteristiche trattate come casuali o accidentali.

Per poter confrontare la complessità effettiva dei dati osservati secondo diversi modelli o diversi osservatori, gli autori introducono un'ulteriore misura di complessità, ossia l'*informazione totale* [Gell-Mann e Lloyd 1996], che è pari alla complessità effettiva più un termine entropico che misura l'informazione richiesta per descrivere le caratteristiche casuali dell'entità; tale metrica misura l'informazione totale richiesta per descrivere come vengono percepite sia le caratteristiche regolari che quelle probabilistiche dell'entità.

Infine si evidenzia che gli autori ritengono che la complessità efficace sia espressione di tutte le misure di complessità sviluppate in letteratura, essendo quella che maggiormente si avvicina alla nozione di complessità, e che tutte queste rappresentino a loro volta diverse espressioni della stessa.

4. *Misure di complessità in ambito produttivo*

Le tre classi di complessità definite in letteratura, che catturano i diversi aspetti significativi della produzione, sono:

- la complessità statica o strutturale;
- la complessità dinamica o operativa;
- la complessità legata al processo decisionale di schedulazione.

Esse sono strettamente connesse tra loro e consentono di ottenere una rappresentazione globale della complessità dell'ambiente manifatturiero. Di seguito si riporta la classificazione delle principali misure della complessità produttiva proposte in letteratura; le misure sono basate sulla teoria dell'informazione (fig. 2, quadranti 2 e 4) e quindi sono focalizzate sul problema della difficoltà di descrivere un sistema al crescere del livello di complessità.

La matrice di classificazione di figura 3 è stata ottenuta mediante l'incrocio delle seguenti variabili:

- l'oggetto della misura;
- i processi produttivi di riferimento.

Per quanto riguarda l'oggetto di studio, come già visto per le misure di complessità mappate in ambito scientifico, si distingue tra:

- struttura del sistema produttivo (misure di complessità statica o strutturale): riguarda la relazione tra gli elementi fondamentali di un sistema produttivo, ossia risorse, componenti e processi, e la definizione degli stati delle risorse secondo quanto previsto nel piano di schedulazione;
- comportamento del sistema produttivo (misure di complessità dinamica o operativa): riguarda la casualità e l'imprevedibilità del comportamento di un sistema produttivo che comporta uno scostamento degli stati delle risorse rispetto a quanto previsto nel piano di schedulazione.

Per quanto riguarda i processi si distingue tra misure focalizzate su una o più fasi di:

- lavorazione;
- assemblaggio;
- immagazzinamento e movimentazione materiali; le misure considerano anche i buffer (con relativi capacità e requisiti) e i processi di movimentazione dei materiali tra una stazione di lavoro e l'altra (o tra centri di lavoro).

Per quanto riguarda la complessità decisionale relativa alla schedulazione, si è scelto di riportarla anch'essa nella matrice di figura 3, in quanto è strettamente connessa sia alla complessità statica che alla complessità dinamica. La complessità legata al processo decisionale di schedulazione (*Scheduling-related Decision-Making Complexity*) si articola infatti in complessità off-line e complessità on-line [Calinescu 2002].

La componente off-line è relativa alla complessità nel definire una schedulazione che rispetti un dato insieme di vincoli, descritti dalla complessità strutturale. Le decisioni sono prese prima dell'avvio del processo di produzione (schedulazione *batch*).

La componente on-line è relativa alla complessità di rischedulare in tempo reale un sistema quando questo devia dal comportamento atteso. La componente dinamica del sistema è appunto descritta dalla complessità dinamica. Le decisioni sono prese per gestire la variabilità e l'incertezza (schedulazione *real-time*).

Nell'ambito della schedulazione, la complessità decisionale tiene conto della complessità statica e della complessità dinamica rispettivamente nell'off-line e nell'on-line.

Le misure di complessità produttiva rappresentate nella matrice di figura 3 sono di seguito sinteticamente discusse.

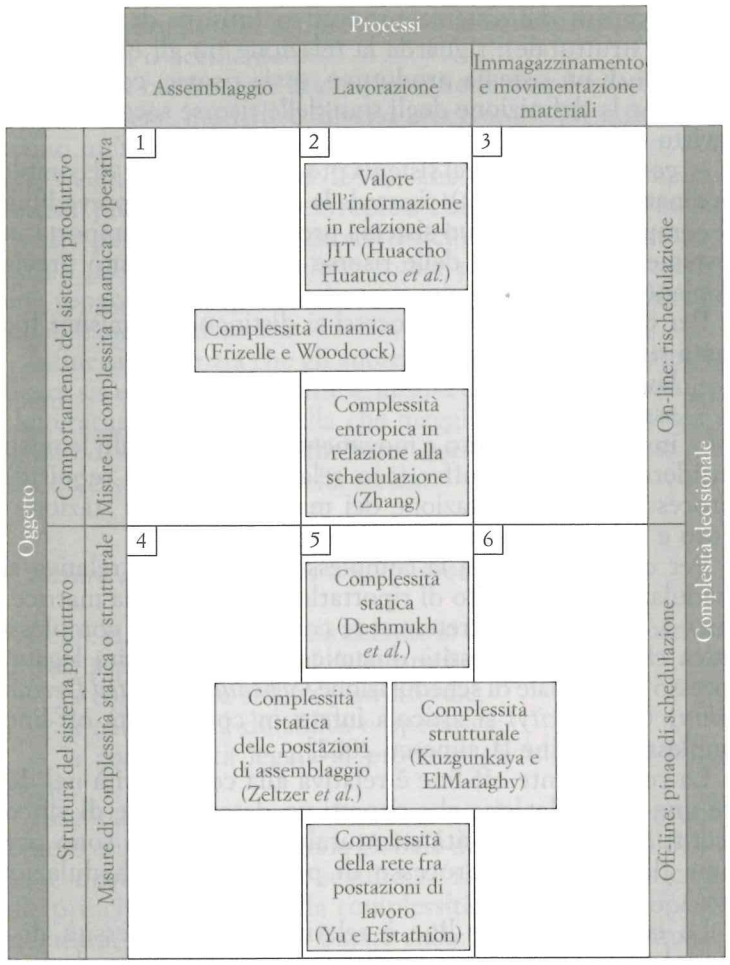

FIG. 3. Classificazione delle principali misure di complessità in ambito produttivo.

4.1. *Complessità statica*

Deshmukh *et al.* [1998] definiscono una misura di complessità statica in termini di requisiti di lavorazione delle parti che devono essere prodotte e di capacità delle macchine; tali informazioni

sono rese disponibili dagli ordini e dai cicli di produzione. La metrica definita soddisfa le seguenti condizioni:

– la complessità statica cresce all'aumentare del numero di componenti, del numero di macchinari e del numero di operazioni necessarie alla lavorazione del mix di componenti;

– la complessità statica cresce all'aumentare della flessibilità nella sequenza di lavorazione dei componenti nel lotto di produzione;

– la complessità statica cresce all'aumentare del numero di componenti che condividono le stesse risorse;

– se il mix di componenti originale è suddiviso in due o più gruppi, la complessità della produzione rimane costante.

La misura considera le sole interazioni tra le macchine e i componenti per determinare la struttura del sistema. La misura inoltre è limitata alle operazioni di lavorazione dove non vi sono aggregazioni o disaggregazioni.delle parti processate nel sistema (operazioni di assemblaggio o smontaggio).

Gli autori studiano quindi le variazioni nella complessità dovuti a cambiamenti nella matrice dei requisiti di produzione rispetto a:

– la somiglianza/dissomiglianza tra i requisiti di processo: la dissomiglianza è definita come «la deviazione degli elementi della matrice dal valore medio» a causa di cambiamenti nei prodotti, nei processi o nella domanda dei clienti. Data la misura di dissomiglianza δ_P, allora la complessità statica della produzione di un mix di componenti è direttamente proporzionale alla somiglianza dei requisiti di processo, ossia è minima quando la somiglianza dei requisiti di processo è minima o la dissomiglianza è massima. Allo stesso modo la complessità statica è massima quando la somiglianza dei requisiti di processo è massima o la dissomiglianza è minima;

– l'ampiezza del sistema: la grandezza della matrice è definita come «il numero di componenti, macchinari e operazioni associate al mix di componenti»; pertanto l'aggiunta di un prodotto, processo o operazione comporta un cambiamento nel numero di colonne e/o righe. L'incremento di numero di componenti, operazioni o macchinari ha un maggiore effetto sulla complessità del sistema quando questo ha dimensioni minori. Tale affermazione trova applicazione, ad esempio, nel decidere se integrare due o più celle di produzione in un sistema unico o al contrario scomporle in celle più piccole;

– i cambiamenti nella progettazione del prodotto: questi sono motivati da variazione nei disegni progettuali, nelle materie prime o miglioramenti nei processi. Le variazioni nei requisiti di produzione (quali appunto modifiche nella progettazione del prodotto) avranno un maggiore effetto quando il sistema è caratterizzato da un minore livello di complessità statica.

4.2. *Complessità strutturale*

Kuzgunkaya e ElMaraghy [2006] considerano la complessità statica come la risultante della combinazione delle complessità strutturali dei blocchi fondamentali di un sistema manifatturiero, rappresentati dai macchinari, dai mezzi utilizzati per la movimentazione dei materiali e dai buffer. Questi elementi di complessità sono particolarmente importanti per i primi stadi di pianificazione dove è necessario valutare le attrezzature e le tecnologie alternative in base all'impatto sui costi.

La complessità del sistema produttivo «è determinata dal livello di incertezza del proprio stato» e una struttura viene definita più o meno complessa a seconda se ha maggiore o minore probabilità di generare «disturbi» quali rotture o maggiori *work in progress*; l'indice di complessità statica deve quindi fornire una descrizione completa della complessità interna secondo i suoi componenti (per tipo e numero), le relazioni e l'influenza tra questi e i loro possibili stati.

Le tre componenti di complessità che gli autori considerano nel calcolo della complessità statica sono le seguenti:

– complessità legata ai macchinari: nella definizione di tale metrica si suppone che ciascun macchinario sia costituito da diversi moduli, che possono essere aggiunti o rimossi a seconda della configurazione scelta, e che ciascun macchinario possa assumere solo gli stati operativo e fallimento;

– complessità legata al tipo di buffer: supposto che in un sistema manifatturiero siano presenti M fasi, il numero massimo di locazioni per i buffer è pari a $M - 1$. Questa misura di complessità è calcolata come somma della complessità legata allo stato del buffer (vuoto o no) e della complessità legata alle varianti di prodotti realizzate in un lotto;

– complessità legata al sistema di movimentazione materiali: componente che tiene conto del tipo di mezzo utilizzato per la movimentazione e quindi del diverso grado di flessibilità; ad esempio, un trasportatore unidirezionale effettua un percorso unico fisso, mentre un Automated Vehicle Guide può effettuare diverse opzioni di percorso.

4.3. *Complessità della rete tra postazioni di lavoro*

Yu e Efstathiou [2002] forniscono una misura della complessità statica definendola come la complessità della rete costituita dalle connessioni tra le stazioni di lavoro all'interno del sistema; pertanto, a differenza delle misure entropiche in cui gli elementi del sistema sono indipendenti, vengono considerati gli effetti dei collegamenti per cui gli eventi di una data stazione influenzano le altre. La definizione del modello ha inizio dalle seguenti assunzioni:

– la linea di produzione ha un input di materiali costante e uno specifico ritmo di lavoro costante;

– la linea di produzione produce un unico tipo di prodotto;

– supposto che non vi siano meccanismi per creare o distruggere materiali all'interno della linea di produzione, il flusso di produzione viene conservato, quindi il ritmo di produzione di tutte le stazioni di lavoro è uguale se queste sono connesse in serie senza buffer intermedi;

– la grandezza dei buffer viene assunta pari a zero.

Pertanto la misura tiene conto solo degli effetti della forma della rete di processi e della disponibilità e dei ritmi di lavoro delle stazioni. Nel caso in cui il sistema sia composto da un numero elevato di macchinari, è possibile calcolare la complessità totale considerando la somma di piccoli gruppi connessi in serie o in parallelo. Tale misura fornisce una traccia per valutare gli effetti di eventuali cambiamenti nella rete, quale una riallocazione delle risorse, e nel settaggio dei parametri.

4.4. *Complessità statica delle postazioni di assemblaggio*

Zeltzer *et al.* [2012] definiscono una misura della complessità statica a livello delle stazioni di lavoro, a partire dall'individuazione delle variabili driver della complessità e dalla valutazione di questi secondo una scala Likert, la quale consente di classi-

ficare le stazioni di lavoro in più o meno complesse. I driver della complessità individuati sono: la tecnologia di prelievo dei materiali (*picking*); volume/sequenza delle parti da assemblare nel kit; i tipi di package; il numero di strumentazioni per stazione; il numero di macchinari per stazione e il tipo; le fasi di lavoro; le distanze tra le parti, intese rispetto alla posizione dell'operatore; le varianti di prodotto; il numero di varianti realizzate a una data stazione di lavoro; i componenti diversi in una data stazione di lavoro; direzioni di assemblaggio: indicano il numero di diverse posizioni che deve tenere l'operatore per completare il ciclo di lavorazione in una data stazione di lavoro.

4.5. *Valore dell'informazione in relazione al JIT*

Huaccho Huatuco *et al.* [2001] – i quali partono dalla teoria dell'informazione di Shannon [1948] e dal contributo di Frizelle [1998] – collegano il valore dell'informazione alla nozione di complessità dinamica. La complessità dinamica è calcolata da un punto di vista teorico, considerando gli scostamenti della produzione reale rispetto alla schedulazione, classificandoli in stati d'interesse e associando a tali stati le rispettive probabilità condizionate.

Il modello proposto si concentra sul problema della misurazione del valore dell'informazione in relazione ai principi del *Just In Time* e alla soddisfazione del cliente, distinguendo tra informazioni a valore aggiunto (VA = *Value-Adding*) e informazioni a non valore aggiunto (NVA = *Non Value-Adding*), assumendo che non ci siano gradi intermedi.

Gli stati *In Control* (IC) e *Out of Control* (OC), definiti come la parte dell'indice di complessità dinamica relativa rispettivamente all'aderenza e alla deviazione dalla schedulazione, sono quindi combinati con gli stati VA e NVA, definiti in relazione alla soddisfazione del cliente, in termini di consegna del prodotto giusto, nella giusta quantità e al momento giusto.

4.6. *Complessità dinamica*

Frizelle e Woodcock [1995] hanno proposto un valido approccio per valutare quanto un sistema produttivo sia complesso.

Il contributo di ciascun elemento alla complessità totale del sistema è pesato con la relativa importanza. Secondo il modello sviluppato la gestione della complessità produttiva consiste nell'analizzare il comportamento delle code (in termini di lunghezza, variabilità e composizione), ossia l'avanzamento dei componenti attraverso le operazioni di lavorazione, e nel misurare l'entità degli ostacoli incontrati, ossia i macchinari che allungano il *lead time* di produzione. Il modello viene sviluppato a partire dalle seguenti assunzioni:

- il sistema misurato è stazionario;
- ciascun sottosistema è un processo «immigrazione-emigrazione»;
- al crescere della complessità del sistema, diminuisce l'affidabilità e aumenta il tempo in cui le parti vengono completate;
- i processi più complessi hanno maggiore probabilità di diventare colli di bottiglia.

Altri assunti sono quelli della complessità algoritmica (definita come il «minimo numero di passaggi necessari per raggiungere un desiderato grado di accuratezza nell'esecuzione di un algoritmo»); cioè la misurazione delle variabili produttive segue la stessa logica della complessità algoritmica (ad esempio, un processo di controllo qualità statistico richiede campioni ripetitivi per raggiungere il grado di accuratezza richiesto). Supposto di osservare a intervalli discreti il sistema produttivo in esame e la sua evoluzione da uno stato all'altro, esso viene modellato come un sistema con un input, un processo e un output, i cui stati sono rappresentati in funzione del numero di prodotti processati in un dato istante di tempo.

Gli stati che può assumere il sistema vengono distinti in programmabili (ossia possono essere presenti nella programmazione della produzione) e non programmabili (rotture, scarti e rilavorazioni, che hanno l'effetto di ridurre il tempo disponibile per le lavorazioni utili, creando, ad esempio, colli di bottiglia).

In base a queste assunzioni gli autori ricavano una formula per la complessità dinamica, in cui si distingue il contributo degli stati programmabili e quelli non programmabili, e i primi sono suddivisi ulteriormente in attività sulle stazioni di lavoro e prodotti che attendono in coda.

Le probabilità degli stati vengono calcolate in termini di occupazione delle risorse negli intervalli di tempo di osservazione. L'indipendenza delle code e degli stati consente di effettuare la

misurazione su ogni risorsa indipendentemente, per tutte le M risorse. In questo senso la misura viene calcolata assegnando a ogni risorsa un peso che può essere visto come una misura dell'ostacolo al flusso rappresentato dalla presenza delle operazioni, dovuta all'effetto incrementale di aggiungere più prodotti al processo. Quando la risorsa è nello stato *idle*, ossia non viene svolta alcuna operazione (e pertanto la lunghezza della coda è nulla), non vi è alcuna resistenza al flusso e il peso è nullo; quando è nello stato sotto controllo allora vi è almeno un elemento in ciascuna coda, lavorato in almeno una risorsa.

Supposto che il tempo di osservazione sia infinito (nei sistemi produttivi corrisponde, ad esempio, a un anno) si ottiene una formula della complessità statica che rappresenta un caso particolare di complessità dinamica, e riflette la complessità della struttura delle operazioni e la difficoltà per un processo di produrre il numero e il tipo di prodotti richiesti; pertanto può essere derivata direttamente dai dati presenti nel database aziendale, relativi alle distinte materiali, sequenze di operazioni, centri di lavoro, carichi delle risorse.

Il modo in cui viene costruita la misura consente di dimostrare che controllo e complessità sono due facce della stessa medaglia, in quanto al crescere della probabilità P (e quindi con un maggiore controllo) si riduce la complessità totale. La riduzione della complessità può essere quindi ottenuta mediante un migliore controllo, ma questo è limitato dalla presenza di stati non programmabili e non tollerati; altri approcci sono una migliore schedulazione, la supervisione delle code, l'introduzione di tecniche JIT, oppure azioni indirette che vadano a intervenire indirettamente sulle cause della complessità, quali la semplificazione, con minori processi e prodotti.

4.7. *Complessità entropica in relazione alla schedulazione*

Zhang [2012] parte dalle misure di complessità entropiche e le rivede in funzione dell'intervallo di tempo definito per il piano di schedulazione. Supposto che i dati monitorati nella schedulazione siano rilevati a ogni intervallo di tempo Δt, e dato l'intervallo di schedulazione T, la complessità statica viene definita come l'entropia sommata in $T/\Delta t$ intervalli di tempo nell'orizzonte di schedulazione.

La complessità dinamica viene definita come complessità dinamica media prodotta dalla deviazione dello stato del sistema dalla schedulazione e indica la velocità a cui la complessità statica viene trasformata in complessità dinamica.

L'autore definisce quindi due parametri:

– il massimo orizzonte di schedulazione possibile: è calcolato come il rapporto tra le due misure entropiche definite e indica il tempo massimo oltre al quale il piano schedulato non coinciderà mai con lo stato attuale, e pertanto è necessaria la rischedulazione;

– l'aderenza della schedulazione: definisce il grado di aderenza tra il comportamento effettivo attuale e il piano di schedulazione originale. Il grado di aderenza può essere descritto come la parte di complessità statica rimanente, avendo considerato la deviazione nel sistema operativo come la parte di complessità statica trasformata in complessità dinamica.

L'autore conclude evidenziando l'importanza di individuare l'intervallo di tempo in cui viene definito il piano di schedulazione in base al *trade-off* tra la frequenza di rilevamento, che consente una maggiore accuratezza dei dati, e i costi della misurazione.

Riferimenti bibliografici

Ashby, W.R.
1958 *Requiste Variety and its Implications for the Control of Complex Systems*, in «Cybernetica», 1, 2, pp. 83-99.

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

Calinescu, A.
2002 *Manufacturing Complexity: An Integrative Information-Theoretic Approach*, PhD dissertation, Oxford, University of Oxford.

Chaitin, G.J.
1977 *Algorithmic Information Theory*, in «IBM Journal of Research and Development», 21, 4, pp. 350-359.
1987 *Algorithmic Information Theory*, Cambridge, Cambridge University Press.

Cornacchio, J.
1977 *Maximum Entropy Complexity Measures*, in «International Journal of General Systems», 3, pp. 215-225.

Couture, M.
2007 *Complexity and Chaos. State-of-the-Art; Formulations and Mea-*

sures of Complexity, DRDC Valcartier, Defence R&D Canada-Valcartier, Technical Note, DRDC Valcartier TN 2006-451, September.
Crutchfield, J.P.
2002 *What Lies Between Order and Chaos?*, in *Art and Complexity*, a cura di J. Casti, Oxford, Oxford University Press.
1982 *Symbolic Dynamics of One-Dimensional Maps: Entropies, Finite Precision, and Noise*, in «International Journal of Theoretical Physics», 21, pp. 433-466.
Crutchfield, J.P. e Feldman, D.P.
1997 *Statistical Complexity of Simple 1D Spin Systems*, in «Physical Review E», 55, pp. 1239-1242.
Crutchfield, J.P. e Shalizi, C.R.
1998 *Thermodynamic Depth of Causal States: Objective Complexity via Minimal Representation*, in «Physical Review E», 59, pp. 275-283.
De Toni, A.F., Nardini, A., Nonino, F. e Zanutto, G.
2005 *Complexity Measures in Manufacturing Systems*, in *Proceedings of the European Conference on Complex Systems: «Towards a Science of Complex Systems»*, a cura di P. Bourgine, F. Kepes e M. Schoenauer, 14-18 November, Paris, Cité Internationale Universitaire.
Deshmukh, A., Talavage, J. e Barash, M.
1998 *Complexity in Manufacturing Systems*, parte 1, *Analysis of Static Complexity*, in «IIE Transactions», 30, pp. 645-655.
Edmonds, B.
1999 *Syntactic Measures of Complexity*, PhD dissertation, Manchester, University of Manchester.
Feldman, D.P. e Crutchfield, J.P.
1998 *Measures of Statistical Complexity: Why?*, in «Physics Letters A», 238, pp. 244-252.
Ferdinand, A.E.
1974 *Complex Systems are those that Work even with Maximum Entropy*, in «International Journal of General Systems», 1, pp. 19-33.
Frizelle, G.
1998 *The Management of Complexity in Manufacturing*, London, Business Intelligence.
Frizelle, G. e Woodcock, E.
1995 *Measuring Complexity as an Aid to Developing Operational Strategy*, in «International Journal of Operations and Production Management», 15, 5, pp. 26-39.
Gell-Mann, M.
1995 *What is Complexity?*, in «Complexity», 1, 1, pp. 16-19.

Gell-Mann, M. e Lloyd, S.
1996 *Information Measures, Effective Complexity, and Total Information*, in «Complexity», 2, pp. 44-52.
2003 *Effective Complexity*, in *Nonextensive Entropy. Inter-disciplinary Applications*, a cura di M. Gell-Mann e C. Tsallis, Oxford, Oxford University Press, pp. 387-398.
Gutierrez-Osuna, R. e Garcia, O.
2000 *An Application of Rissanen's Complexity Measure to Optimizing Abstraction Levels*, in *Proceedings of the Fifth Annual Conference on Human Interaction with Complex Systems*, Illinois, UIUC.
Huaccho Huatuco, L., Efstathiou, J., Sivadasan, S. e Calinescu, A.
2001 *The Value of Dynamic Complexity in Manufacturing Systems*, in *Proceedings of IV SIMPOI/POMS 2001*, Guarujá/SP-Brazil, August 11-14.
Kuzgunkaya, O. e ElMaraghy, H.A.
2006 *Assessing the Structural Complexity of Manufacturing Systems Configurations*, in «International Journal of Flexible Manufacturing Systems», 18, pp. 145-171.
Levine, R.D. e Tribus, M. (a cura di)
1979 *The Maximum Entropy Principle*, Cambridge, MA, The MIT Press.
Lloyd, S. e Pagels, H.
1988 *Complexity as Thermodynamic Depth*, in «Annals of Physics», 188, pp. 186-213.
López-Ruiz, R., Mancini, H.L. e Calbet, X.
1995 *A Statistical Measure of Complexity*, in «Physics Letters A», 209, pp. 321-326.
Luhmann, N.
1984 *Soziale Systeme. Grundriss einer allgemeinen Theorie*, Suhrkamp, Frankfurt a.M.; trad. it. *Sistemi sociali. Fondamenti di una teoria generale*, Bologna, Il Mulino, 2001.
Machta, J.
2011 *Natural Complexity, Computational Complexity and Depth*, http://arxiv.org/abs/1111.2845.
Mitchell, M.
2009 *Complexity: A Guided Tour*, Oxford, Oxford University Press.
Rissanen, J.
1983 *A Universal Prior for Integers and Estimation by Minimum Description Length*, in «Annals of Statistics», 11, 2, pp. 416-431.
Shannon, C.E.
1948 *A Mathematical Theory of Communication*, in «The Bell System Technical Journal», 27, pp. 379-423 e 623-656, July-October.
Shannon, C.E. e Weaver, W.
1949 *The Mathematical Theory of Communication*, Urbana, IL, University of Illinois Press.

Shiner, J.S., Davison, M. e Landsberg, P.T.
1999 *Simple Measure for Complexity*, in «Phisical Review E», 59, 2, pp. 1459-1464.
Skinner, W.
1974 *The Focused Factory*, in «Harvard Business Review», maggio-giugno, pp. 113-121.
Smarr, L.
1985 *An Approach to Complexity: Numerical Computations*, in «Science», 228, pp. 403-408.
Solomonoff, R.J.
1964 *A Formal Theory of Inductive Inference*, part I, in «Information and Control», 7, 1, pp. 1-22.
Solow, R.
2001 *A Native Informant Speaks*, in «Journal of Economic Methodology», 8, 1, pp. 111-112.
Wolpert, D.H. e Macready, W.G.
1997 *Self-Dissimilarity. An Empirical Measure of Complexity*, Santa Fe Insitute, Working Paper 97-12-087.
Yu, S.B. e Efstathiou, J.
2002 *An Introduction of Network Complexity*, in *Proceedings of the Manufacturing Complexity Network Conference*, Cambridge, 9-10 April.
Zeltzer, L., Limère, V., Aghezzaf, E. e Van Landeghem, H.
2012 *Measuring the Objective Complexity of Assembly Workstations*, in ICCGI, *Proceeding of the Seventh International Multi-Conference on Computing in the Global Information Technology*, IARIA, pp. 341-346.
Zhang, Z.
2012 *Manufacturing Complexity and its Measurement Based on Entropy Models*, in «International Journal of Advanced Manufacturing Technology», 62, pp. 867-873.