



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

Facoltà di Ingegneria

---

Corso di Laurea magistrale in Ingegneria Gestionale

**Strumenti di System Dynamics per l'analisi di resilienza  
di impianti industriali**

---

**System Dynamics Tools for the resilience evaluation in  
Industrial Systems**

Relatore: Chiar.mo

**Prof. Maurizio Bevilacqua**

Tesi di laurea di:

**Serena Ilari**

Correlatore:

**Ing. Giulio Marcucci**

Anno accademico 2019/2020

*Ai miei genitori*

## Sommario

|   |    |
|---|----|
| Introduzione.....   | 5  |
| 1. Dalla resilienza alla SCR.....                             | 7  |
| 1.1. Fasi della resilienza .....                              | 12 |
| 1.2. Misurazione della resilienza.....                        | 14 |
| 1.3. Revisione della letteratura per la SCR .....             | 16 |
| 2. Methodology: System Dynamics.....                          | 22 |
| 2.1. System Thinking .....                                    | 22 |
| 2.2. Strumenti della System Dynamics .....                    | 24 |
| 2.2.1. Diagrammi causali .....                                | 24 |
| 2.2.2. Diagrammi stock-flussi .....                           | 28 |
| 2.3. Sistemi.....   | 31 |
| 2.4. Classificazione dei sistemi.....                         | 31 |
| 2.5. Archetipi sistemici.....                                 | 34 |
| 2.5.1. Crescita esponenziale .....                            | 35 |
| 2.5.2. Raggiungimento dell'obiettivo .....                    | 37 |
| 2.5.3. Oscillazione.....                                      | 38 |
| 2.5.4. Crescita ad S .....                                    | 40 |
| 2.5.5. Crescita con sovraoscillazione .....                   | 42 |
| 2.5.6. Sovraoscillazione e crollo .....                       | 43 |
| 2.5.7. Altri possibili comportamenti del sistema.....         | 44 |
| 2.6. Ritardi.....   | 46 |
| 2.6.1. Ritardi materiali.....                                 | 47 |
| 2.6.2. Ritardi di informazione .....                          | 52 |
| 2.7. Fasi della System Dynamics .....                         | 56 |
| 2.7.1. Identificazione del problema.....                      | 58 |
| 2.7.2. Ipotesi dinamica .....                                 | 58 |
| 2.7.3. Creazione del diagramma causale.....                   | 59 |
| 2.7.4. Creazione del diagramma stock-flussi.....              | 60 |
| 2.7.5. Stima dei parametri.....                               | 60 |
| 2.7.6. Test del modello .....                                 | 62 |
| 2.7.7. Applicazione del modello .....                         | 68 |
| 3. Literature review .....                                    | 72 |
| 3.1. Ricerca delle variabili e delle connessioni causali..... | 72 |
| 3.1.1. Pandemie.....  | 72 |

|  |     |
|--|-----|
| 3.1.2. Catastrofi naturali ed eventi meteorologici avversi ..... | 76  |
| 3.2. Modelli di simulazione .....                                | 84  |
| 3.2.1. Primo modello di simulazione .....                        | 84  |
| 3.2.2. Secondo modello di simulazione .....                      | 88  |
| 4. Case study .....  | 93  |
| 4.1. Identificazione del problema .....                          | 93  |
| 4.2. Ipotesi dinamica .....                                      | 96  |
| 4.3. Creazione del diagramma causale .....                       | 98  |
| 4.4. Creazione del diagramma stock-flussi .....                  | 100 |
| Conclusioni .....  | 104 |
| Bibliografia .....   | 105 |
| Sitografia .....   | 110 |

## Introduzione

Il presente lavoro è il frutto di un periodo di studio e di analisi della SCR per individuare i fattori che intervengono nella disponibilità di manodopera durante una disruption.

La scelta dell'argomento è dettata dalla sua grande attualità.

In un contesto come quello odierno, infatti, caratterizzato da elevata incertezza, cambiamento e complessità, le SC sono esposte a minacce provenienti sia dall'esterno che dall'interno dei confini aziendali.

Disastri naturali, attacchi terroristici, crisi economiche, malattie (*Aviso et al. (2018)*, *Santos Joost (2020)*, *Cameron MacKenzie et al. (2012)*, *Chen et al. (2019)*) sono esempi che dimostrano quanto eventi diversi ed improvvisi possano minare la stabilità e la sicurezza di una SC. Pertanto, essendo il mondo sempre più interconnesso, anche una piccola interruzione può dar luogo al cosiddetto "ripple effect", creando ripercussioni di ampia portata nel network dei vari elementi della SC.

Di conseguenza, il concetto di resilienza, applicato alla SC, intesa come capacità di una catena di approvvigionamento di ritornare alla condizione originaria o ideale, dopo il verificarsi di un evento che ne ha sconvolto lo stato (disruption), assume un'importanza fondamentale e significativa.

A questo proposito lo strumento scelto per l'analisi è stato la System Dynamics, una metodologia basata sulla comprensione e sulla simulazione del comportamento di sistemi complessi, caratterizzati da meccanismi di feedback, in cui si enfatizza il ruolo dell'intreccio tra strutture decisionali e ritardi temporali.

La tesi è strutturata come segue:

nel Capitolo 1 viene illustrato il concetto di resilienza partendo dalla sua definizione, dall'applicazione nei vari domini, dalle fasi e dalla sua misurazione per poi analizzare la SCR.

Il Capitolo 2 comincia con la presentazione della metodologia alla base della System Dynamics, ovvero la System Thinking. Successivamente si spiegano nel dettaglio gli strumenti utilizzati ovvero diagrammi causali e diagrammi stock-flussi. Si descrivono i

sistemi, in quanto fondamentali per l'applicazione della System Dynamics e sono illustrati i principali archetipi sistemici per interpretare i fenomeni dinamici che emergono dall'osservazione della realtà. Viene illustrato il concetto di ritardo e si analizzano le fasi della System Dynamics.

Nel Capitolo 3 viene effettuata un'attenta ed approfondita analisi della letteratura riguardante la manodopera ed i fattori che ne influenzano la disponibilità durante differenti tipologie di disruption e vengono presi in esame due modelli di simulazione relativi ad una pandemia.

Oggetto del Capitolo 4 è l'applicazione delle prime quattro fasi della metodologia della System Dynamics che consente di individuare i fattori che intervengono nella disponibilità di manodopera durante una disruption. Gli strumenti utilizzati sono stati il diagramma causale ed il diagramma stock-flussi, realizzati con il software di simulazione Vensim.

## 1. Dalla resilienza alla SCR

La parola resilienza deriva dal latino “resilire,” ovvero “riprendersi”. L'uso comune del termine implica la capacità di un ente o sistema di ritornare alla condizione originaria dopo il verificarsi di un evento che ne ha sconvolto il suo stato.

In riferimento alla letteratura, il concetto di resilienza è stato definito in maniera ampia ed esaustiva. Secondo Fiksel (*Timothy J. Pettit, Joseph Fiksel, Keely L. Croxton, 2006*) la resilienza è la capacità di un'impresa di sopravvivere, adattarsi e crescere in seguito a cambiamenti improvvisi (*“the capacity for an enterprise to survive, adapt, and grow in the face of turbulent change”*).

Allenby e Fink (*Hosseini S., Barker K., Ramirez-Marquez J., 2015*) sostengono che la resilienza è la capacità di un sistema di mantenere le sue funzioni e la sua struttura di fronte ai cambiamenti interni ed esterni (*“the capability of a system to maintain its functions and structure in the face of internal and external change”*); Pregenzer (*Hosseini S., Barker K., Ramirez-Marquez J., 2015*), l'ha definita come la misura della capacità di un sistema di assorbire cambiamenti continui ed imprevedibili e mantenere comunque le sue funzioni vitali (*“the measure of a system's ability to absorb continuous and unpredictable change and still maintain its vital functions”*).

Tutte le definizioni sottolineano come la resilienza sia la capacità di un sistema di mantenere inalterate o stabili le proprie attività ed assetto di fronte a continui cambiamenti interni ed esterni, caratterizzati da imprevedibilità.



Cohen et al. definiscono, inoltre, la resilienza sociale come la capacità di una comunità di funzionare correttamente durante interruzioni o crisi. (*Hosseini S., Barker K., Ramirez-Marquez J., 2015*).

Per quanto riguarda il dominio *economico* la resilienza è stata definita da Rose e Liao come "la capacità intrinseca di risposta che consente alle aziende di evitare perdite potenziali massime" ed, in maniera più specifica, come sostiene Martin "la capacità di riconfigurare la struttura di imprese, industrie, tecnologie o istituzioni e di adattarsi a nuove condizioni, in modo da mantenere crescita, occupazione e ricchezza accettabili nel tempo".

La resilienza economica può essere:

- Statica;
- Dinamica.
  - Secondo Holling (1973) e Perrings (1994) quella statica si riferisce alla capacità di un sistema di assorbire danni o perdite, mentre per Rose riguarda la capacità di un sistema di mantenere le sue funzionalità (come ad esempio la produzione) quando sottoposto ad un grave shock (*Hosseini S., Barker K., Ramirez-Marquez J., 2015*).

La resilienza dinamica è la capacità di un sistema di riprendersi da un evento disastroso e tornare, quindi, ad uno stato stazionario.

- Ross (*Serhiy Y. Ponomarov and Mary C. Holcomb, 2009*) ha identificato tre livelli in cui la resilienza può realizzarsi:
  - Livello microeconomico (individuale);
  - Livello mesoeconomico (settore, mercato o gruppo cooperativo);
  - Livello macroeconomico (tutte le singole unità e mercati combinati).

Questi livelli rispecchiano la prospettiva del sistema sociale e sono applicabili alla catena di approvvigionamento.

- L'obiettivo finale della resilienza economica secondo Hamel e Valikangas (2003) è quello di creare una società che ha la capacità di evolvere rapidamente senza effetti negativi per l'organizzazione. Essi, inoltre, sostengono che la resilienza sia legata alla flessibilità ed alla capacità di organizzarsi per far fronte ad eventuali crisi; ciò implica che vi sia una

propensione alla continua innovazione sulla base di un'analisi SWOT, cioè dei punti di forza, debolezza, opportunità e minacce (*Serhiy Y. Ponomarov and Mary C. Holcomb, 2009*).

Al fine di costruire un vantaggio decisivo, tuttavia, una società deve essere più veloce nel creare opzioni e riprendere interamente le proprie funzionalità rispetto ai suoi concorrenti.

Il concetto di resilienza nel settore dell'*ingegneria* è relativamente nuovo rispetto ad altri domini. Il campo ingegneristico comprende sistemi tecnici progettati da ingegneri che interagiscono con l'uomo e la tecnologia.

Youn et al. (*Hosseini S., Barker K., Ramirez-Marquez J., 2015*) hanno definito la resilienza ingegneristica come risultato di:

- **Affidabilità**, intesa come la probabilità di funzionamento di un sistema;
- **Ripristino**, inteso come la probabilità di recupero di un sistema.

Un'altra definizione di resilienza ingegneristica è data da Hollnagel et al. (*Hosseini S., Barker K., Ramirez-Marquez J., 2015*). Essi la descrivono come la capacità intrinseca di un sistema di regolare le sue funzionalità in presenza di disturbi o cambiamenti imprevisti. Inoltre hanno sottolineato che, per l'ingegnerizzazione della resilienza, è importante comprendere sia il funzionamento a regime sia il funzionamento in condizioni di instabilità di un sistema tecnico.

La Società Americana degli Ingegneri Meccanici (ASME) (*Hosseini S., Barker K., Ramirez-Marquez J., 2015*) ha, inoltre, definito la resilienza come la capacità di un sistema di far fronte ad interruzioni interne o esterne nell'esecuzione delle proprie attività o, nel caso in cui queste vengano interrotte, di recuperarle completamente in modo rapido.

Il concetto di resilienza *organizzativa* è emerso per affrontare la necessità delle aziende di reagire ad un ambiente imprenditoriale in rapida evoluzione. La resilienza di un'organizzazione è definita da Sheffi (*Hosseini S., Barker K., Ramirez-Marquez J., 2015*) come la sua capacità intrinseca di mantenere uno stato stazionario o di ritornare allo stato iniziale, permettendole, quindi, di continuare a funzionare normalmente dopo un evento distruttivo o in presenza di una sollecitazione continua.

Vogus e Sutcliffe (*Serhiy Y. Ponomarov and Mary C. Holcomb, 2009*) sostengono che la resilienza organizzativa sia "la capacità di un'organizzazione di assorbire le sollecitazioni e di migliorare il funzionamento nonostante la presenza di avversità". Sheffi, inoltre, ha affermato che la resilienza aziendale è la "capacità e la velocità delle società di tornare al normale livello di prestazione a seguito di un evento distruttivo". McDonald (*Hosseini S., Barker K., Ramirez-Marquez J., 2015*) ha definito la resilienza nel contesto delle organizzazioni come "la proprietà di essere in grado di adattarsi alle esigenze degli ambienti e di gestire la variabilità degli stessi". Patterson et al. (*Hosseini S., Barker K., Ramirez-Marquez J., 2015*) hanno sottolineato che il confronto incrociato può migliorare notevolmente la resilienza delle organizzazioni. Questa tecnica è una strategia di resilienza avanzata in cui almeno due gruppi o individui con punti di vista diversi esaminano l'operato degli altri per valutarne l'accuratezza o la validità. E' proprio attraverso il confronto incrociato, infatti, che azioni erranee possono essere rilevate piuttosto in fretta per limitare conseguenze negative.

Analizzando la resilienza nei vari campi di applicazione è evidente che non esiste un'unica idea su come definirla.

Dall'exkursus sul concetto di resilienza si nota, infatti, che alcune definizioni non specificano i meccanismi di acquisizione della stessa, ma concentrano l'attenzione sulla capacità del sistema di "assorbire" e di "adattarsi" ad eventi distruttivi, e successivamente, sull'attività di "recupero", considerata come aspetto cruciale della resilienza.

Allenby e Fink, Pregenzer e Adger (*Hosseini S., Barker K., Ramirez-Marquez J., 2015*) hanno definito la resilienza solo in termini di preparazione all'evento catastrofico (attività pre-disruption), mentre il NIAC (*Hosseini S., Barker K., Ramirez-Marquez J., 2015*), oltre a concentrarsi sulle attività pre-disruption, pone l'attenzione anche sulle fasi di recupero (post-disruption).

## 1.1. Fasi della resilienza

A partire dalle definizioni date è possibile far discendere una serie di dimensioni caratterizzanti la resilienza.

Per comprenderle al meglio sarà utile rifarsi allo schema di seguito proposto da Sheffi & Rice (*Yossi Sheffi, James B. Rice Jr., 2005*).

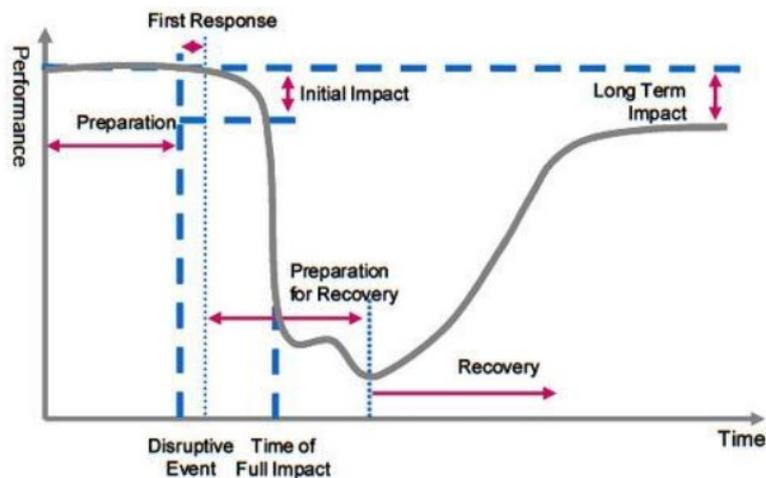


Figura 2 Fasi della resilienza (*Yossi Sheffi, James B. Rice Jr., 2005*)

Il grafico riporta l'andamento della performance in funzione del tempo di un sistema soggetto ad un evento distruttivo (disruption). Le grandezze riportate nel grafico sono tra loro correlate tramite i seguenti fattori:

- **Monitoring:** dal momento che il tema della resilienza ha a che fare principalmente con la risposta ad eventi inattesi ed a cambiamenti repentini del contesto economico, è centrale la problematica di come i soggetti responsabili siano in grado di individuare indicatori e proxy che consentano di captare l'imminenza di cambiamenti rilevanti ed eventualmente stimarne l'impatto prima che questi avvengano. Tale attributo caratterizza le fasi temporali di normale operatività prima dell'evento. (*S. McManus, E. Seville, D. Brunson e J. Vargo, 2007*).

- Preparedness: con questo termine si vuole indicare la capacità dell'infrastruttura di maturare al suo interno quelle capabilities che le consentano di essere resiliente. È, quindi, un attributo che caratterizza il tempo di normale operatività ma che viene messo in luce contestualmente al presentarsi dell'evento.
- Robustness: è la capacità del sistema di subire limitati cali di performance in corrispondenza del momento di massimo impatto dell'evento. Generalmente le azioni volte all'incremento della robustness sono dette di mitigazione.
- Responsiveness: è intesa come il livello di servizio che il sistema è in grado di mantenere nell'intervallo compreso tra il momento di massimo impatto dell'evento e quello in cui si hanno gli effetti delle azioni finalizzate a riportare il sistema ad un equilibrio stabile. Il manifestarsi di questi effetti sulla performance costituisce l'inizio della fase di recovery. Alternativamente si può intendere la responsiveness come la rapidità con cui il sistema passa dall'istante di massima degradazione a quello di inizio del processo di recovery. Il sistema avrà responsiveness tanto maggiore quanto minore è il lasso di tempo intercorso tra i due momenti. In questo intervallo temporale eventuali azioni mirate al reintegro della performance non portano alcun effetto visibile ed il livello di servizio del sistema dipende esclusivamente da proprietà intrinseche dello stesso.
- Recovery: è la fase in cui il sistema inizia ad incrementare la sua performance fino al raggiungimento di un nuovo stato di equilibrio. Questo attributo possiede due accezioni fondamentali:
  - la velocità con cui il sistema riesce a portarsi all'equilibrio;
  - il livello di servizio e performance che il sistema è in grado di fornire alla fine della fase di recovery.

Lo stato raggiunto dal sistema non è necessariamente coincidente con quello precedente l'evento. Questo potrà, infatti, essere caratterizzato da un livello di servizio anche maggiore rispetto a quello precedente l'evento distruttivo e da una migliorata capacità di far fronte ad imprevisti. (A. Z. Rose, 2009).

## 1.2. Misurazione della resilienza

La resilienza può essere misurata secondo due approcci differenti:

- Approccio qualitativo;
- Approccio quantitativo.

Di seguito viene riportata la tabella che evidenzia la sottoclassificazione degli approcci appena citati. (Hosseini S., Barker K., Ramirez-Marquez J., 2015).

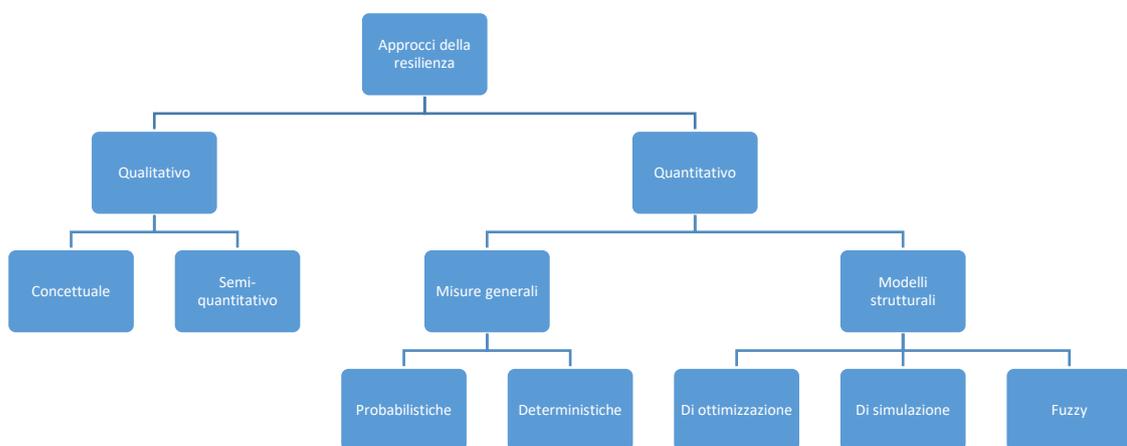


Figura 3 Classificazione degli approcci della resilienza (Seyedmohsen Hosseini, Kash Barker, Jose E. Ramirez-Marquez, 2015)

L'approccio qualitativo comprende metodi che valutano la resilienza senza descrizioni numeriche ed include due sottocategorie: quella concettuale e quella semi-quantitativa.

L'approccio quantitativo si suddivide in misure generali (probabilistiche e deterministiche) e metodi strutturali (di ottimizzazione, di simulazione e fuzzy).

Si procede ora con un accenno alla spiegazione delle sottocategorie dell'approccio qualitativo e quantitativo.

- L'approccio concettuale è il metodo qualitativo più usato per la valutazione della resilienza di un sistema e si compone di diversi principi e fasi a seconda del campo di applicazione. (Hosseini S., Barker K., Ramirez-Marquez J., 2015)

- L'approccio semi-quantitativo è di solito costruito con una serie di affermazioni progettate per valutare le diverse caratteristiche di un sistema basato sulla resilienza mediante l'utilizzo di una scala Likert (0-10) o di una scala percentuale (0-100) per arrivare ad individuare un indice di resilienza. *(Hosseini S., Barker K., Ramirez-Marquez J., 2015)*
- Le misure generali di resilienza forniscono un metodo quantitativo per valutare la resilienza misurando le prestazioni del sistema, indipendentemente dalla struttura del sistema stesso. Queste misure sono comparabili attraverso contesti differenti ma con una logica di base simile. Le misure generali di resilienza la determinano confrontando le prestazioni prima e dopo la distruzione del sistema senza concentrarsi sulle caratteristiche specifiche dello stesso.  
Le misure generali si suddividono principalmente in deterministiche e probabilistiche:  
  
Un approccio basato sulla performance deterministica non incorpora nella metrica l'incertezza (ad esempio, probabilità di perturbazione), mentre un approccio probabilistico basato sulla performance cattura la stocasticità associata al comportamento del sistema *(Hosseini S., Barker K., Ramirez-Marquez J., 2015)*.
- I modelli strutturali esaminano come la struttura di un sistema impatta sulla resilienza. Il comportamento del sistema deve essere osservato e le sue caratteristiche modellate o simulate. *(Hosseini S., Barker K., Ramirez-Marquez J., 2015)*.

### 1.3. Revisione della letteratura per la SCR

Il focus della tesi è fare un'analisi della SCR attraverso la System Dynamics. È, quindi, necessario capire cosa si intende per SCR mediante una revisione attenta ed approfondita della letteratura.

La SCR consiste nella capacità di una catena di approvvigionamento di ritornare alla condizione originaria, o ideale, dopo il verificarsi di un evento che ne ha sconvolto lo stato (disruption).

La SCR ha come obiettivo lo sviluppo della capacità di adattamento per prepararsi ad eventi imprevisti, per rispondere alle disruption e per ripristinare le condizioni precedenti ad esse (*Serhiy Y. Ponomarov and Mary C. Holcomb, 2009*). La SCR si basa sul fatto che non tutti gli eventi rischiosi possono essere evitati (*Jüttner, U., & Maklan, S., 2011*).

Le prime definizioni di SCR sono state sviluppate nel 2004 presso l'Università di Cranfield (*Christopher, M., & Peck, H., 2004*) ed in studi paralleli al MIT (*Yossi Sheffi, James B. Rice Jr., 2005*). La SCR viene definita come la capacità di una SC di tornare al suo stato originale o iniziale oppure di passare ad un nuovo stato, migliore del primo, dopo essere stata colpita da una disruption (*Christopher, M., & Peck, H. 2004*). Sheffi e Rice (*Yossi Sheffi, James B. Rice Jr., 2005*) interpretano, invece, la resilienza come la capacità di adattamento della SC ad una disruption, sintetizzandola in tre fasi principali:

- Prontezza;
- Reattività;
- Recupero.

Una definizione alternativa di SCR è quella di Ponomarov e Holcomb (2009), che la presentano come la capacità di adattamento della SC a prepararsi ad eventi imprevisti, reagire alle interruzioni e recuperare da esse per mantenere la continuità delle attività ad un livello desiderato di connessione e di controllo sulle strutture e sulle funzioni (*Ponomarov e Holcomb, 2009*).

Attualmente nell'ambiente di business, la resilienza è ampiamente utilizzata per caratterizzare la capacità di un'organizzazione di reagire ad una perturbazione inattesa, come, ad esempio, quella causata da un attacco terroristico o da una calamità naturale, e di ripristinare poi le normali operazioni (Rice, J. B., & Caniato, F., 2003).

I sistemi resilienti riducono la probabilità e le conseguenze del fallimento come pure il tempo di recupero. Ad esempio considerando il triangolo della resilienza di Tierney e Bruneau (Tierney, K., & Bruneau, M., 2007) si definisce sistema resiliente quello con area minima del triangolo che corrisponde ad una perdita di funzionalità altrettanto minima.

Soni et al. (2014) (Soni, U., Jain, V., & Kumar, S., 2014) affermano che il concetto di SCR è quello che permette di comprendere il motivo per cui alcune organizzazioni crollano quando sottoposte a livelli di tensione continua, mentre altre prosperano e crescono più intraprendenti e dinamiche, diventando pronte ad affrontare le sfide del futuro. Costruire una SC resiliente può contribuire a ridurre e superare l'esposizione (vulnerabilità) ai rischi (Peck, H., 2005; Svensson, G., 2000; Tang, C.S., 2006; Wagner, S. M., & Bode, C., 2006) attraverso lo sviluppo di strategie che consentano alla SC di recuperare (o perfino migliorare) il proprio stato funzionale a seguito di una perturbazione (Jüttner, U., & Maklan, S., 2011).

Riassumendo, la SCR può essere distinta in due principali prospettive o filoni letterari:

- La maggior parte dei modelli si focalizza sulle capacità proattive (proactive capabilities) per mitigare la vulnerabilità della SC e per costruire e misurare la SCR (Pettit et al., 2013; Christopher e Peck 2004). Infatti, per Ponomarov e Holcomb (2009) è fondamentale capire gli elementi formativi e le capacità che caratterizzano la SCR. La costruzione della resilienza deve essere un'iniziativa strategica di un'organizzazione o sistema (Sheffi e Rice, 2005). I supply chain managers hanno bisogno di capacità proattive per prevedere in anticipo le disruption e per sviluppare la resilienza e, quindi, contrastarle. (Peck 2005; Pettit et al., 2010; Christopher e Peck 2004).
- Altri modelli sottolineano l'importanza di combinare le cause scatenanti degli eventi distruttivi con la configurazione della SC (Heckmann et al. 2015). Questi studi misurano la SCR sulla base dei fattori di progettazione della catena di

approvvigionamento stessa (SC design factors) e propongono modelli per aiutare i managers ad implementare strategie di riprogettazione della SC (Falasca, Zoble e Cook, 2008; Craighead et al., 2007). La resilienza deve essere progettata e disegnata all'interno della SC: ciò significa che ci sono alcune caratteristiche che, se costruite in una catena di approvvigionamento, consentono di migliorare la sua capacità di affrontare le disruption (Soni et al. 2014). L'obiettivo di questi modelli è far comprendere come i fattori di progettazione della SC influenzino l'esposizione al rischio; ciò consentirebbe ai manager di strutturare la SC in modo tale da essere in linea con la propensione al rischio dell'organizzazione permettendo, quindi, di compiere una scelta ottimale per quanto concerne la progettazione della filiera produttiva (Wagner e Bode 2006).

| AUTORI   | DEFINIZIONI DI SCR   |
|--|--|
| Ates e Bititci (2011), Fiksel (2006), Knemeyer et al. (2009) | Capacità di un'impresa di sopravvivere, adattarsi e crescere di fronte al cambiamento turbolento.  |
| Azevedo et al. (2010)  | Capacità di far fronte ad una perturbazione imprevista nella SC.   |
| Briano et al. (2009)   | Capacità di adattamento per poter affrontare eventi distruttivi.   |
| Chowdurry e Quaddus, 2014                                    | Capacità di una SC di ridurre l'impatto delle interruzioni attraverso lo sviluppo di un livello necessario di preparazione, di risposta rapida e di capacità di recupero.                                    |
| Christopher e Peck (2004)                                    | Capacità di una SC di affrontare le conseguenze degli eventi inevitabili di rischio, tornando al suo stato originale o passando ad uno nuovo, più desiderabile, dopo essere stata colpita da una disruption. |

|                                       |  |
|---------------------------------------|--|
| Peck (2005), Mitroff e Alpasan (2003) | Possibilità della SC di recuperare dopo le interruzioni causate dalle disruption.  |
| Pereira et al. (2014)                 | Capacità di una SC di reagire rapidamente ad eventi imprevisti al fine di ripristinare le attività ad un livello precedente di prestazioni o addirittura ad uno nuovo e migliore.  |
| Pettit et al. (2010)                  | Insieme di due costrutti: la vulnerabilità, delineata da quei fattori che rendono un'impresa suscettibile alle disruption e le capabilities, cioè gli attributi che consentono alle imprese di anticipare e superare le interruzioni.            |
| Ponomarov e Holcomb (2009)            | Capacità di adattamento della SC nel prepararsi ad eventi imprevisti, reagire alle disruption e recuperare da esse per mantenere la continuità delle attività ad un livello desiderato di connessione e controllo sulla struttura e le funzioni. |
| Rice e Caniato (2003)                 | Capacità di un'organizzazione di reagire ad una perturbazione inattesa.  |
| Sheffi e Rice (2005)                  | Capacità della SC di assorbire le interruzioni, che vanno ad impattare, quindi, positivamente sulle performances aziendali, permettendo alla SC di tornare rapidamente alle condizioni iniziali.   |
| Soni e Jain (2011)                    | Caratteristica fondamentale di una filiera di incorporare la prontezza agli eventi, fornire una risposta efficiente ed efficace ed essere in grado di recuperare lo stato  |

|                          |  |
|--------------------------|--|
|                          | originale o uno stato ancora migliore dopo l'interruzione.   |
| Tierney e Bruneau (2007) | Capacità di ridurre le probabilità di un disastro, le sue conseguenze ed il tempo per il recupero. |

Figura 4 Definizioni di resilienza della SC

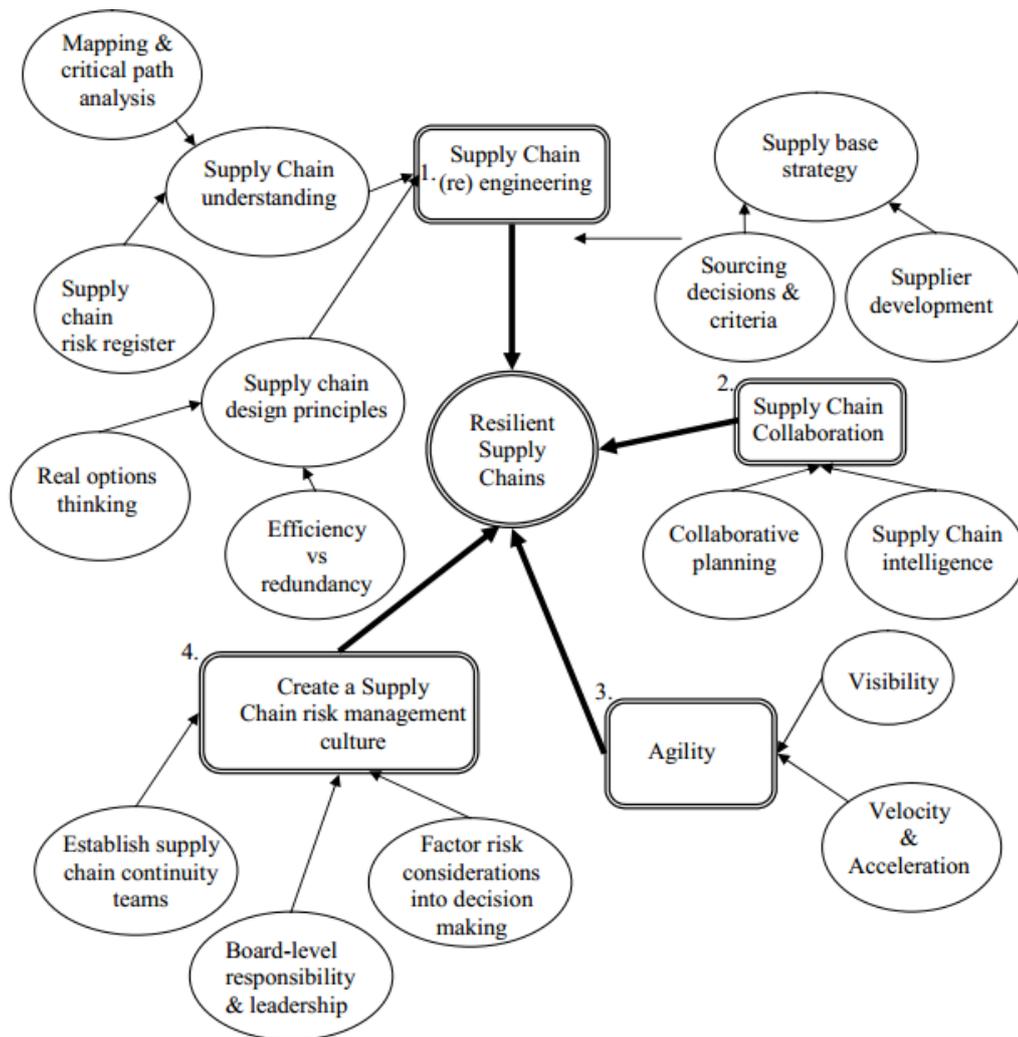


Figura 5 Creazione di una SC resiliente (Martin Christopher and Helen Peck, 2004)

Uno studio attento e approfondito sul concetto di SCR è stato propedeutico nonché necessario per passare all'analisi della resilienza eseguita con la System Dynamics, metodologia che effettua uno screening minuzioso del sistema (nella trattazione è la SC), consentendo nel caso esaminato di individuare i fattori che influenzano la mancanza di manodopera durante una disruption. Tali fattori verranno trattati nel dettaglio nel Capitolo 4.

## 2. Methodology: System Dynamics

La costante più significativa dei tempi moderni è il cambiamento, *(BAYER, Steffen, 2004)* che sta rivoluzionando la nostra realtà tanto da far emergere la necessità di comprendere e gestire complessi problemi agricoli, biologici, ambientali, tecnologici e socioeconomici *(Bala et al., 2017)*.

A tale scopo si utilizza la System Dynamics (SD): essa è un approccio allo studio del comportamento dei sistemi complessi caratterizzati da meccanismi di feedback, in cui si enfatizza il ruolo dell'intreccio tra politiche, strutture decisionali e ritardi temporali.

Infatti, tale metodologia permette di comprendere la logica con cui le variabili rilevanti interagiscono, il ruolo che ciascuna di essa gioca, i punti in cui il sistema è sensibile agli interventi e gli scenari che emergono come conseguenza di ipotesi alternative circa lo stato iniziale del sistema. *(Santillo, Gallo, Di Nardo, Monica, Giacobbe, 2014)*

### 2.1. System Thinking

La System Dynamics si basa sulla System Thinking (ST) o pensiero sistemico. Esso è un modo di pensare volto alla risoluzione di problemi complessi e legati all'incertezza del mondo reale. Parte dal principio base che il mondo è un insieme di entità tecniche e sociali altamente interconnesse, gerarchicamente organizzate a produrre comportamenti osservabili dagli stakeholders, soggetti direttamente interessati o influenzati da tali comportamenti.

Peter Senge *(Springer Science & Business Media, 2012)* identifica cinque regole logiche fondamentali che sono alla base del pensiero sistemico:

1. Essere capaci di “vedere gli alberi e la foresta”, di zoomare tra tutto e parti;
2. Ricercare ciò che varia osservando il mondo in termini di variabili e di loro variazioni nel tempo;
3. Sforzarsi di capire la causa delle variazioni nelle variabili osservate;

4. Abituarsi a concatenare le variabili in modo circolare fino a specificare i loop tra le loro variazioni e formare sistemi di variabili;
5. Abituarsi a specificare sempre i confini che si vogliono indagare del sistema.

### **Prima regola**

La prima regola del System Thinking evidenzia che la realtà è una compenetrazione di sistemi e, quindi, “se vogliamo ampliare la nostra intelligenza, dobbiamo sviluppare l’attitudine a zoomare tra parti e tutto, tra unità e componenti, tra micro e macrodinamiche”.

### **Seconda regola**

La seconda regola afferma che è necessario soffermarsi non sugli oggetti, ma sulle variabili che connotano gli oggetti stessi. Quindi “non dobbiamo fermare la nostra osservazione su ciò che appare costante, ma ricercare ciò che varia”.

### **Terza regola**

La terza regola impone di specificare i processi che interessano la dinamica delle variabili e le strutture sistemiche che fanno sì che quei processi avvengano come pure le variabili (causali o input) che attivano i processi e quelle che ne derivano (effetti o output). Il processo va inteso, quindi, come una black box, di cui sono oggetto di interesse soltanto le variabili causa ed effetto, il collegamento fra esse e le regole secondo le quali variazioni di input causano variazioni di output.

### **Quarta regola**

La quarta regola afferma che bisogna abbandonare il pensiero lineare, formato da catene di cause ed effetti per abituarsi al pensiero circolare costituito da loop.

### **Quinta regola**

La quinta regola sostiene che si devono sempre individuare le variabili che formano il sistema (entro il confine) e quelle le cui interconnessioni sono troppo deboli per essere ritenute in grado di influire significativamente sulle altre (oltre il confine). I confini sono due: quello esterno, che delimita il sistema quando si zooma dalle parti al tutto e quello interno, che definisce il sistema quando si zooma dal tutto alle parti.

## 2.2. Strumenti della System Dynamics

Uno dei principi cardine della teoria della System Dynamics è il concetto di feedback o retroazione. Esso può essere definito come una catena di due o più variabili che si influenzano reciprocamente.

Per comprendere la struttura di un sistema si utilizzano generalmente due strumenti principali:

- I diagrammi causali;
- I diagrammi stock-flussi.

### 2.2.1. Diagrammi causali

Il diagramma causale è utile per rappresentare la struttura di feedback del sistema. Esso consente di:

- ottenere le ipotesi sulle cause della dinamica;
- estrapolare i modelli mentali di singoli individui o team;
- comunicare i feedback importanti responsabili del problema in esame. (*Sterman, John. 2000*).

Il diagramma causale rappresenta gli elementi chiave del sistema e le relazioni esistenti tra essi. Graficamente ciò viene espresso da variabili unite da collegamenti causali, indicati da frecce. Esse sono contrassegnate da una polarità, ovvero un segno (+ o -) che indica il tipo di influenza che una variabile esercita sull'altra. Una catena chiusa di relazioni, ovvero due variabili collegate in doppia direzione, è chiamata loop.

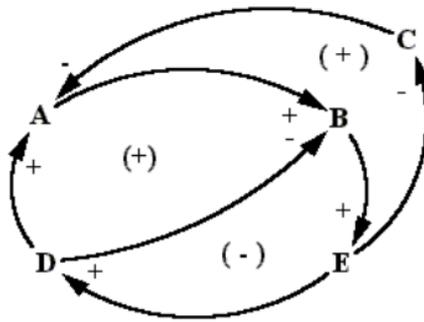


Figura 6 Esempi di loop (Martin Garcia, Juan e John Sterman, 2006)

Se è presente il segno +, il loop sarà rinforzante (reinforcing), cioè un cambiamento nella variabile influenzante produrrà un cambiamento nella stessa direzione nella variabile bersaglio, quindi se la causa aumenta, l'effetto aumenta al di sopra di quello che altrimenti sarebbe stato e se la causa diminuisce, l'effetto diminuisce al di sotto di ciò che altrimenti sarebbe stato.

Se è presente il segno -, il loop sarà controbilanciante (balancing), cioè un cambiamento nella variabile influenzante produrrà un cambiamento nella direzione opposta nella variabile bersaglio, quindi se la causa aumenta, l'effetto diminuisce al di sotto di quello che altrimenti sarebbe stato e se la causa diminuisce, l'effetto aumenta al di sopra di ciò che altrimenti sarebbe stato.

Nell'esempio della figura sottostante si rileva una relazione rinforzante tra il tasso di natalità frazionario ed il tasso di natalità. Un aumento del tasso di natalità frazionario implica che il tasso di natalità aumenterà al di sopra di ciò che altrimenti sarebbe stato, mentre una diminuzione del tasso di natalità frazionario comporta che il tasso di natalità scenderà al di sotto di quanto altrimenti sarebbe stato. Quindi, se la fertilità media aumenta, il tasso di natalità, data una determinata popolazione, aumenterà; se la fertilità media diminuisce, il numero delle nascite diminuirà. Poiché c'è una relazione controbilanciante tra l'aspettativa di vita ed il tasso di mortalità, un aumento dell'aspettativa di vita della popolazione implica che il tasso di mortalità scenderà al di sotto di quello che altrimenti sarebbe stato ed una diminuzione dell'aspettativa di vita significa che il tasso di mortalità salirà al di sopra di quanto altrimenti sarebbe stato. Pertanto, se l'aspettativa di vita aumenta, il numero di morti diminuirà e se l'aspettativa

di vita diminuisce, il tasso di mortalità aumenterà. Inoltre, il legame rinforzante tra il tasso di natalità e la popolazione comporta che il tasso di natalità si aggiunga alla popolazione e, quindi, un aumento del tasso di natalità aumenta la popolazione al di sopra di ciò che altrimenti sarebbe stato e una diminuzione del tasso di natalità fa diminuire la popolazione al di sotto di ciò che sarebbe stato. Si può notare anche una relazione controbilanciante tra il tasso di mortalità e la popolazione e ciò implica che il tasso di mortalità si sottragga alla popolazione per cui un calo del tasso di mortalità comporta che la popolazione sarà più numerosa di quanto sarebbe stata altrimenti.

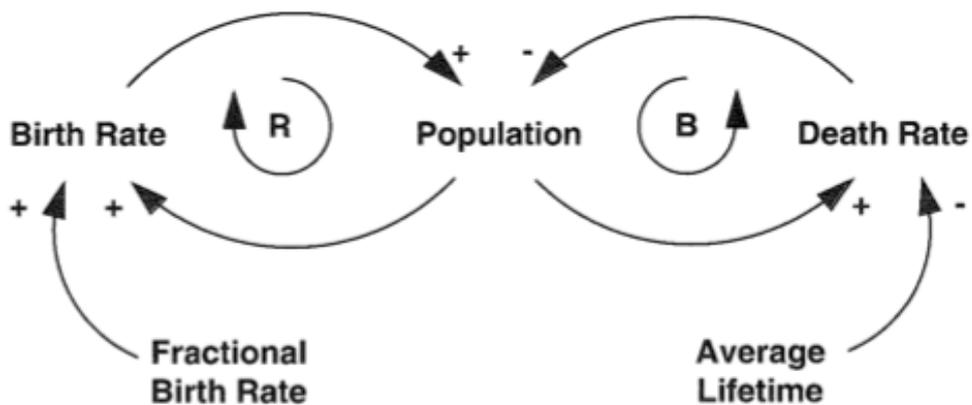


Figura 7 Esempio di diagramma causale (Sterman, John, 2000)

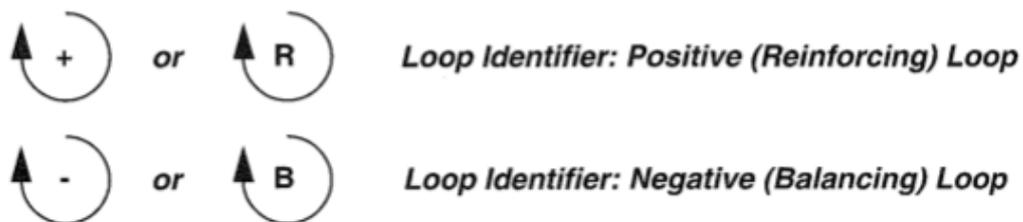


Figura 8 Notazione loop positivo (reinforcing) e loop negativo (balancing) (Sterman, John, 2000)

Le polarità dei collegamenti descrivono la struttura del sistema e non il comportamento delle variabili. Esse si occupano, infatti, di ciò che sarebbe successo se ci fosse stato un cambiamento e non illustrano ciò che accade veramente.

I loop controbilancianti tendono a stabilizzare il modello, mentre i loop rinforzanti tendono a renderlo instabile, indipendentemente dal problema di base (Sterman, John, 2000).

Ci sono due metodi per determinare se un loop è rinforzante o controbilanciante:

- Il metodo veloce;
- Il metodo corretto.

### **Metodo veloce**

Il metodo veloce per determinare se un loop è rinforzante o controbilanciante consiste nel contare il numero di collegamenti controbilancianti (-) nel loop. Se quest'ultimo è pari, il loop sarà rinforzante, se, invece, il numero di collegamenti controbilancianti (-) nel loop è dispari, il loop sarà controbilanciante. La regola si basa sul fatto che i loop rinforzanti consolidano il cambiamento, mentre i loop controbilancianti si autocorreggono. Questo metodo, però, può fallire perché in un diagramma complesso è davvero facile sbagliare il calcolo del numero di collegamenti negativi come pure etichettare correttamente la polarità dei link all'inizio della rappresentazione del diagramma.

### **Metodo corretto**

Il metodo corretto di determinare la polarità di un loop è tracciare l'effetto di una piccola modifica in una delle variabili mentre si propaga lungo il loop. Se l'effetto del feedback rinforza il cambiamento iniziale, il loop è rinforzante; se, invece, si oppone al cambiamento iniziale, il loop è controbilanciante. Questo metodo funziona indipendentemente da quante variabili ci sono nel loop e da quella da cui si inizia l'analisi.

Il concetto di loop è molto utile, perché evidenzia come la struttura dei sistemi influenzi il loro comportamento dinamico.

### 2.2.2. Diagrammi stock-flussi

Il concetto di stock e flussi, insieme a quello dei feedback, è centrale nella System Dynamics, ma non è contemplato dai diagrammi causali ed è proprio per questo che si passa ai diagrammi stock-flussi.

Gli stock sono entità che vengono accumulate e che caratterizzano lo stato del sistema generando le informazioni su cui si basano le decisioni e le azioni. Gli stock creano ritardo accumulando la differenza tra i flussi che entrano in un processo e quelli che escono.

I flussi sono elementi che possono essere definiti come funzioni temporali. Sono rappresentativi delle decisioni prese nel sistema che determinano le variazioni degli stock. *(Martín García, Juan, and John Sterman. 2006).*

Esempi di stock sono: il magazzino di un'azienda manifatturiera, il numero di impiegati in un'azienda, il saldo nel conto corrente. Gli stock sono modificati dai flussi entranti ed uscenti. Infatti il livello di magazzino di un'azienda aumenta grazie al flusso di produzione e diminuisce con il flusso di spedizioni; la forza lavoro aumenta con il tasso di assunzione e diminuisce con il tasso di dimissioni, licenziamenti e pensionamenti; il saldo del conto corrente aumenta con i versamenti e diminuisce con le spese. *(Sterman, John. 2000).*

La System Dynamics usa una particolare notazione per rappresentare nei diagrammi gli stock ed i flussi:

- Gli stock sono indicati con dei rettangoli, al cui interno deve essere scritto il nome dello stock in questione;
- I flussi entranti o afflussi sono rappresentati da una freccia che punta verso lo stock, mentre i flussi uscenti o deflussi sono rappresentati da frecce uscenti dallo stock;
- Le valvole controllano i flussi;
- Le nuvole rappresentano le fonti e lo scarico dei flussi.

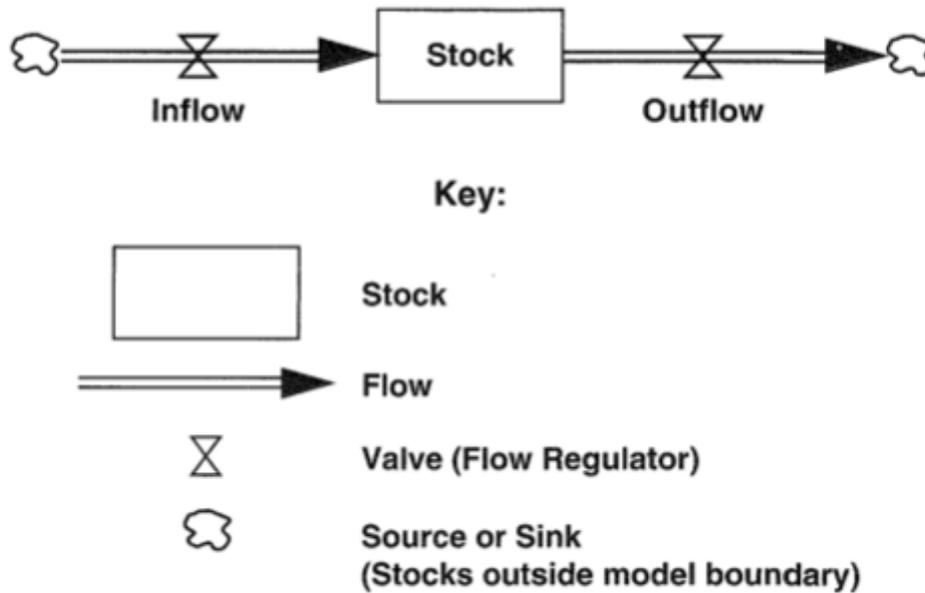


Figura 9 Notazione nei diagrammi stock-flussi (Sterman, John, 2000)

Le convenzioni sui diagrammi stock-flussi realizzate da Forrester nel 1961 sono basate su una metafora idraulica: il flusso dell'acqua all'interno e all'esterno dei serbatoi. Per rendere l'idea, si pensi agli stock come vasche da bagno. La quantità di acqua nella vasca è uguale in ogni momento all'accumulo della differenza tra l'acqua che fluisce attraverso il rubinetto e l'acqua che scorre attraverso lo scarico. Allo stesso modo la quantità di materiale in ogni stock è l'accumulo della differenza tra il flusso dei materiali entranti e il flusso dei materiali uscenti.

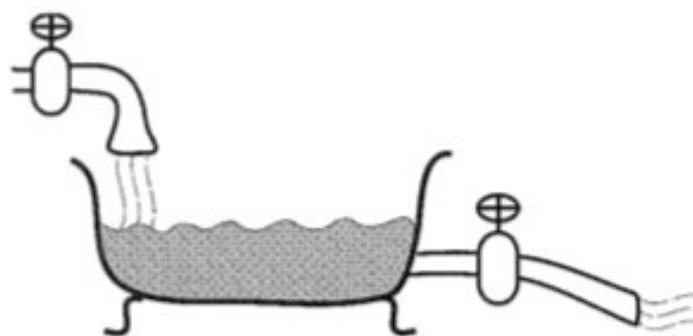


Figura 10 Metafora idraulica per i diagrammi stock-flussi (Sterman, John, 2000)

La metafora degli stock come vasca da bagno è utile a livello matematico, infatti gli stock integrano i loro flussi ed il flusso netto nello stock è il tasso di variazione dello stock e ciò corrisponde alla seguente struttura matematica:

$$Stock(t) = \int_{t_0}^t [Flusso\ entrante(s) - Flusso\ uscente(s)] ds + Stock(t_0)$$

*Equazione 1 Calcolo dello stock (Sterman, John, 2000)*

In cui il Flusso entrante (s) rappresenta il valore del flusso entrante al tempo s compreso tra il tempo iniziale  $t_0$  e il tempo attuale t.

In maniera speculare il tasso di variazione dello stock definito come la derivata dello stock nel tempo si calcola come la differenza tra il flusso entrante ed il flusso uscente al tempo t, secondo la seguente equazione differenziale:

$$\frac{d(Stock)}{dt} = Flusso\ entrante(t) - Flusso\ uscente(t)$$

*Equazione 2 Calcolo del tasso di variazione dello stock (Sterman, John, 2000)*

Gli stock sono fondamentali nella generazione della dinamica del sistema per i seguenti motivi (Mass, 1980):

- Essi caratterizzano lo stato del sistema e forniscono le basi per agire;
- Essi forniscono ai sistemi inerzia e memoria, in quanto gli stock accumulano eventi passati ed il contenuto di uno stock può essere modificato soltanto attraverso flussi entranti ed uscenti. Senza cambiamenti in questi flussi, però, l'accumulo passato persiste nello stock e, quindi, genererà nel sistema inerzia e continuità nel suo comportamento.
- Essi sono fonti di ritardo, infatti tutti i ritardi riguardano le scorte. Il ritardo è un processo il cui l'output è in ritardo rispetto all'input. La differenza tra l'input e l'output si accumula, quindi, nello stock.
- Essi disaccoppiano i tassi di flusso e creano dinamiche di disequilibrio. Gli stocks, assorbendo la differenza tra flussi entranti ed uscenti, permettono loro di differire in un processo, creando così una situazione di disequilibrio, in cui il flusso totale entrante in uno stock è diverso da quello totale uscente dallo stesso.

## 2.3. Sistemi

La metodologia scelta per il progetto di tesi è la System Dynamics, che studia la realtà come un sistema ed il cui obiettivo fondamentale è arrivare a comprendere le cause strutturali che provocano il comportamento dello stesso. È, quindi, essenziale capire cosa si intende per sistema.

Si definisce sistema un insieme di elementi in relazione tra loro, in modo tale che un cambiamento in un elemento influisce sull'insieme di tutti gli altri. (*Martín García, Juan, and John Sterman., 2006*).

Per studiare un sistema, quindi, si devono conoscere gli elementi che lo formano e le relazioni che esistono tra essi. (*Martín García, Juan, and John Sterman., 2006*).

## 2.4. Classificazione dei sistemi

### **Sistema stabile ed instabile**

Un sistema è stabile quando è costituito o dominato da un loop controbilanciante ed è instabile quando il loop è rinforzante.

La struttura di base di un sistema stabile è la seguente:

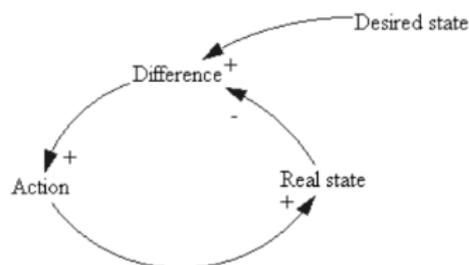


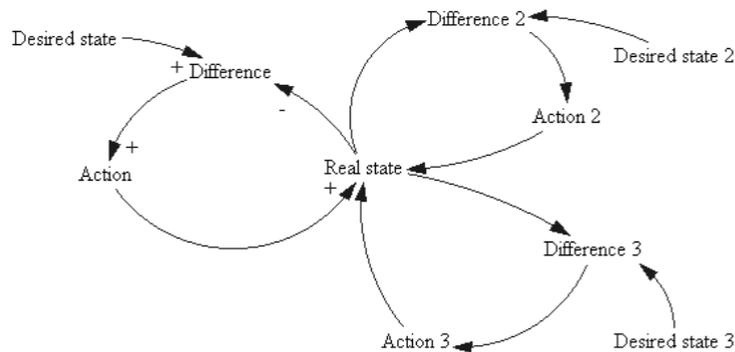
Figura 11 Struttura di base dei sistemi stabili (*Martin Garcia, Juan e John Sterman, 2006*)

Dalla figura sopra è evidente che il sistema confronta il suo stato reale con lo stato desiderato e, quando c'è una differenza, agisce per avvicinare il suo stato reale a quello desiderato. Una volta che questi due stati coincidono, qualsiasi cambiamento nello stato reale comporterà un'azione proporzionale alla differenza per ritornare allo stato desiderato (*Martin Garcia, Juan and John Sterman, 2006*).

## Sistema iperstabile

Quando un sistema è costituito da più loop controbilanciati, si dice iperstabile. In questo caso qualsiasi azione intrapresa per modificare uno dei suoi elementi è compensata non solo dal loop in cui si trova quell'elemento, ma anche dall'intera serie di loop controbilanciati che agiscono per supportarlo, rendendo il sistema ancora più stabile.

Un esempio di struttura di sistema iperstabile è la seguente:



*Figura 12 Esempio di struttura di sistema iperstabile (Martin Garcia, Juan e John Sterman, 2006)*

Dalla figura si evince che ogni elemento del sistema è collegato solo ad un numero limitato di variabili, che sono importanti per esso e che confronta in maniera continua con i suoi obiettivi (stati desiderati). Se c'è una discrepanza tra lo stato di queste variabili ed i suoi stati desiderati, l'elemento agisce in un modo particolare per modificare il sistema. Maggiore è la discrepanza, più forte sarà l'azione intrapresa dall'elemento sul sistema. L'azione combinata di tutti gli elementi che tentano di adattarsi ai propri obiettivi il sistema, porta quest'ultimo ad una posizione che nessuno degli elementi vuole realmente, ma in cui tutti trovano il più piccolo divario tra i parametri che sono significativi per loro ed i rispettivi obiettivi.

Questo è il motivo per cui molti problemi persistono nonostante continui sforzi per risolverli. Ogni sistema di questa tipologia, infatti, basa la sua stabilità sulle azioni di tutti i suoi elementi nel perseguire obiettivi diversi, cercando di avvicinare il più possibile il resto del sistema alla posizione desiderata. Da questo momento in poi se un elemento del sistema o un agente esterno tenta di modificare la stabilità del sistema, gli altri

elementi agiranno per tornare alla situazione iniziale, neutralizzando così l'azione che ne ha alterato la stabilità.

Il sistema, pertanto, resiste a qualsiasi cambiamento che si cerca di introdurre, perché la sua configurazione attuale è il risultato di molti tentativi precedenti di modifica e di una struttura interna che lo rende stabile e capace di neutralizzare i cambiamenti nei suoi dintorni. Il sistema raggiunge questa condizione nella sua interezza, adeguando rapidamente le relazioni interne tra i suoi elementi in modo tale che ciascuno di essi continui a perseguire il proprio obiettivo e tutti insieme neutralizzino l'azione esercitata su di essi dall'esterno (Martin Garcia, Juan e John Sterman, 2006).

### **Sistema oscillante**

Un sistema oscillante deve avere almeno due stock, in quanto essi sono elementi del sistema che producono accumuli di entità. Il suo comportamento consiste in ripetute oscillazioni di una variabile di riferimento attorno ad una situazione desiderata o di equilibrio (Martin Garcia, Juan e John Sterman, 2006).

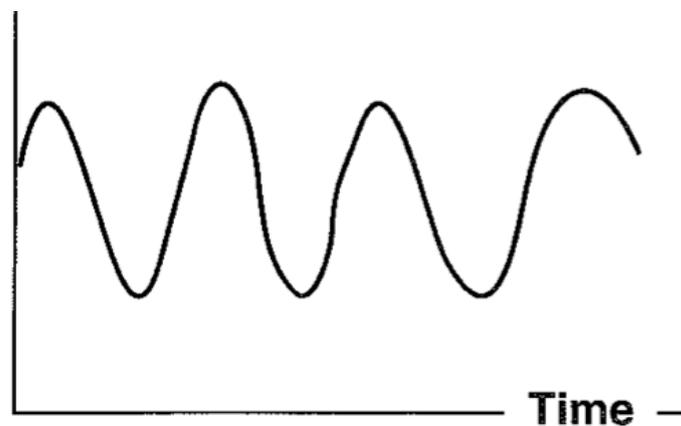


Figura 13 Esempio di sistema oscillante (Sterman, 2000)

### **Sistema sigmoideale**

I sistemi sigmoideali sono sistemi che inizialmente contengono un loop rinforzante che funge da caratteristica dominante, causando un andamento di crescita esponenziale del sistema. Successivamente il controllo del sistema viene assunto da un loop controbilanciante che annulla gli effetti del precedente loop rinforzante e fornisce stabilità al sistema, facendolo tendere asintoticamente ad un determinato valore. In questo caso è importante tener presente che si lavora sempre con lo stesso sistema che,

però, è dominato da una parte di esso (loop rinforzante) in un periodo e da una parte differente (loop controbilanciante) del sistema in seguito. Al fine di regolare, quindi, il suo comportamento è necessario trovare un modo per riprodurre la parte del sistema di interesse. Inoltre è importante essere consapevoli che nel medio termine il circuito controbilanciante stabilizzerà il sistema al suo valore target e, quindi, tutto ciò che si può fare è regolare la scala temporale ed il modo in cui il sistema raggiunge il suo obiettivo (Martin Garcia, Juan e John Sterman, 2006).

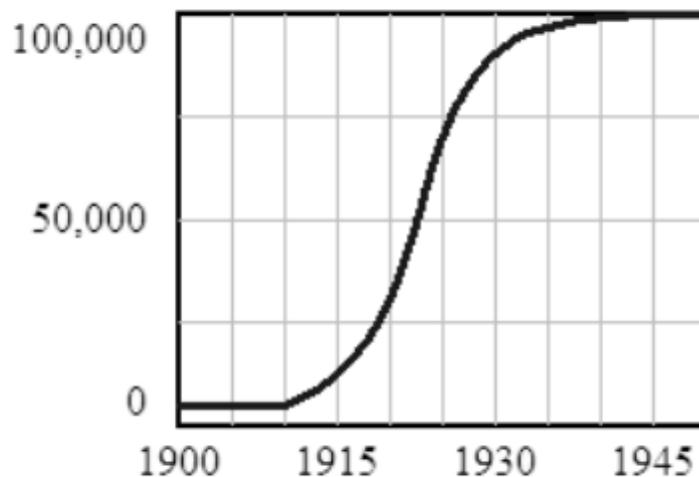


Figura 14 Esempio di sistema sigmoideale (Martin Garcia, Juan e John Sterman, 2006)

## 2.5. Archetipi sistemici

Il comportamento di un sistema deriva dalla sua struttura, costituita da circuiti di retroazione, stock e flussi. Gli archetipi sistemici sono paradigmi, modelli mentali, schemi di riferimento che possono essere utilizzati per interpretare i fenomeni dinamici che emergono dall'osservazione della realtà (Senge, 1990).

Gli elementi fondamentali di un archetipo sistemico sono:

- La descrizione di una situazione o di un comportamento problematico osservato nella realtà;
- La descrizione del sistema tramite diagramma causale che ha generato il comportamento osservato;
- Un insegnamento o principio che è evidente dall'interpretazione in chiave sistemica del fenomeno osservato.

Gli archetipi sistemici sono finalizzati a spiegare perché i sistemi generino un effetto controintuitivo tra azione esercitata sul sistema e risposta di quest'ultimo. In tal modo essi suggeriscono azioni alternative efficaci per raggiungere gli obiettivi prefissati. Sono vantaggiosi in quanto utilizzano conoscenze emerse da una particolare situazione e le trasferiscono a circostanze e fenomeni diversi da interpretare.

Gli archetipi sistemici fondamentali sono di sei tipologie (*Sterman, John, 2000*):

- Crescita esponenziale (Exponential Growth);
- Raggiungimento dell'obiettivo (Goal Seeking);
- Oscillazione (Oscillation);
- Crescita ad S (S-shaped Growth);
- Crescita con sovraoscillazione (Growth with Overshoot);
- Sovraoscillazione e crollo (Overshoot and Collapse).

#### 2.5.1. Crescita esponenziale

La crescita esponenziale deriva da un loop rinforzante. Maggiore è la quantità, più grande sarà il suo aumento netto e ciò comporterà un ulteriore aumento della quantità, con la conseguenza di una crescita sempre più rapida. (*Sterman, John, 2000*)

Esempi dell'archetipo sistemico crescita esponenziale sono l'interesse composto e la crescita delle popolazioni.

Nel primo caso più soldi si investono, più si guadagna, quindi maggiore sarà il saldo e maggiore sarà il pagamento degli interessi successivi.

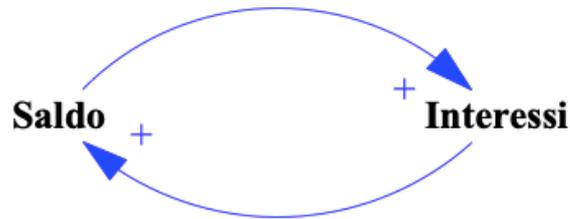


Figura 15 Esempio archetipo crescita esponenziale: interesse composto

Nel secondo caso maggiore è la popolazione, maggiore è il tasso di natalità, che si aggiunge alla popolazione e comporta ancora più nascite, quindi aumento di popolazione.

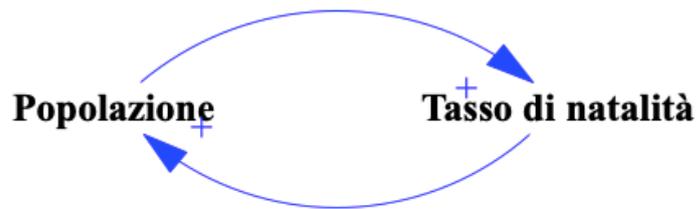


Figura 16 Esempio archetipo crescita esponenziale: popolazione

La proprietà della crescita esponenziale è che il tempo di raddoppio è costante, per cui lo stato del sistema raddoppia in un periodo di tempo fisso indipendentemente dalla sua grandezza (Sterman, John, 2000).

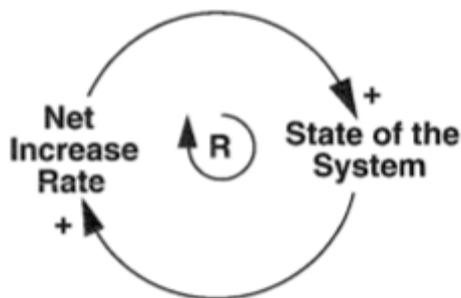


Figura 17 Struttura dell'archetipo crescita esponenziale (Sterman, John, 2000)

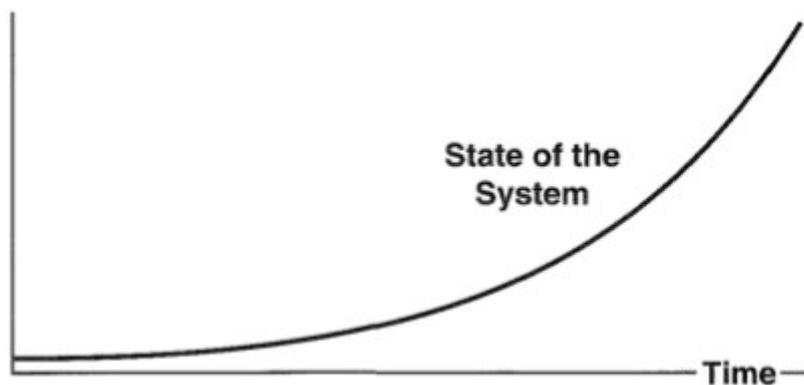


Figura 18 Comportamento dell'archetipo crescita esponenziale (Sterman, John, 2000)

### 2.5.2. Raggiungimento dell'obiettivo

L'archetipo sistemico raggiungimento dell'obiettivo è caratterizzato da loop controbilanciati che portano ad equilibrio e stasi. Essi agiscono per allineare lo stato del sistema con lo stato obiettivo o desiderato, contrastando eventuali disturbi che possono allontanare lo stato del sistema da quello obiettivo. Lo stato del sistema, quindi, viene confrontato con lo stato obiettivo e se c'è discrepanza tra lo stato desiderato e quello effettivo viene avviata un'azione correttiva per riportare lo stato del sistema allo stato obiettivo.

Un esempio di archetipo raggiungimento dell'obiettivo è relativo al livello di magazzino di un'azienda. Quando quest'ultimo scende al di sotto delle scorte necessarie per fornire un buon servizio al cliente, la produzione aumenta fino a quando l'inventario non è di nuovo sufficiente.

Ogni loop controbilanciante include un processo per confrontare lo stato desiderato e quello effettivo ed intraprendere azioni correttive ed è importante ricordare che a volte lo stato desiderato è esplicito e sotto il controllo di un decisore, mentre altre volte è implicito e non sotto il controllo cosciente o del libero arbitrio umano.

Nella maggior parte dei casi la velocità con cui lo stato del sistema si avvicina al suo obiettivo diminuisce man mano che la discrepanza diventa più piccola. L'approccio graduale è presente perché grandi discrepanze tra stati desiderati e quelli attuali generano grandi risposte, mentre piccoli divari portano a piccole risposte del sistema (Sterman, John, 2000).

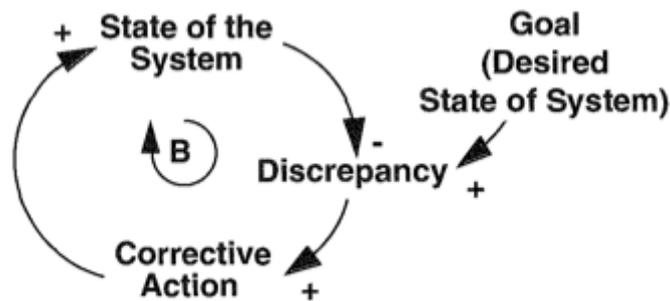


Figura 19 Struttura dell'architettura di raggiungimento dell'obiettivo (Sterman, John, 2000)

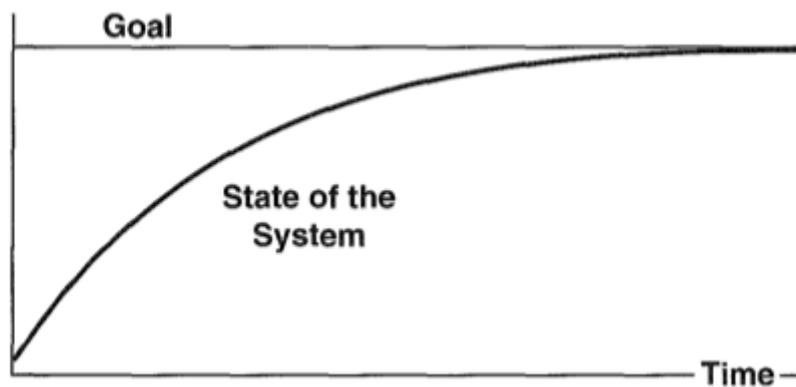


Figura 20 Comportamento dell'architettura di raggiungimento dell'obiettivo (Sterman, John, 2000)

### 2.5.3. Oscillazione

Le oscillazioni, così come l'architettura sistemica di raggiungimento degli obiettivi, sono causate da loop controbilanciati. Lo stato del sistema viene confrontato con lo stato obiettivo e vengono intraprese azioni correttive per eliminare eventuali discrepanze. In un sistema che presenta oscillazioni, lo stato del sistema supera periodicamente il suo stato obiettivo o stato di equilibrio e poi la situazione viene invertita per cui lo stato del sistema si trova al di sotto dello stato obiettivo e così via. Sistemi di questo tipo sono caratterizzati da ritardi temporali che fanno sì che le azioni correttive continuino anche

dopo che lo stato del sistema ha raggiunto il suo obiettivo, costringendo il sistema a regolarsi in maniera eccessiva innescando una nuova correzione nella direzione opposta.

Le oscillazioni sono tra le modalità di comportamento più frequenti nei sistemi dinamici ed esse possono essere di diverse tipologie: oscillazioni smorzate, cicli limite e caos (Sterman, John, 2000).

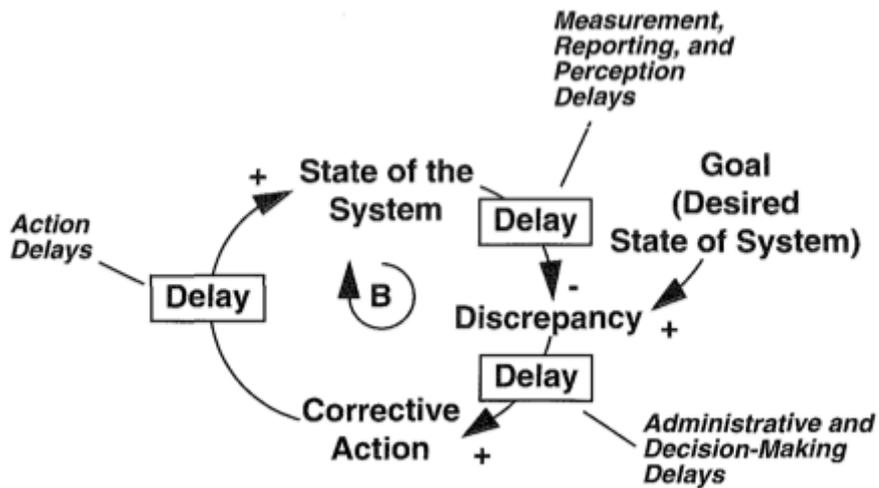


Figura 21 Struttura dell'archetipo oscillazione (Sterman, John, 2000)

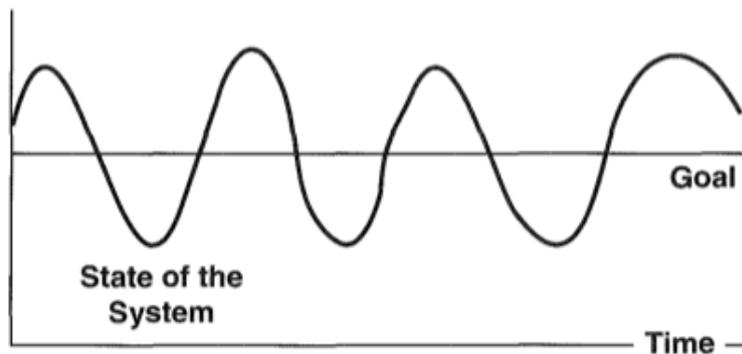


Figura 22 Comportamento dell'archetipo oscillazione (Sterman, John, 2000)

#### 2.5.4. Crescita ad S

L'archetipo sistemico crescita ad S è caratterizzato inizialmente da una crescita esponenziale e da un successivo rallentamento graduale fino a quando lo stato del sistema non raggiunge un livello di equilibrio.

Per comprendere la struttura alla base della crescita ad S è utile introdurre il concetto di capacità di carico (carrying capacity) in ecologia. La capacità di carico di qualsiasi habitat è il numero massimo di organismi di un particolare tipo che un ecosistema può raggiungere compatibilmente con le risorse ambientali. Man mano che una popolazione si avvicina alla sua capacità di carico, le risorse pro capite diminuiscono, riducendo in tal modo il tasso di aumento netto fino a quando non ci sono sufficienti risorse pro capite per bilanciare le nascite e le morti (in quel punto il tasso di aumento netto è zero) e la popolazione raggiunge l'equilibrio.

Questo riferimento è utile in quanto qualsiasi quantità reale in fase di crescita esponenziale può essere interpretata come una popolazione che attinge alle risorse del suo ambiente. Con l'avvicinarsi della capacità dell'ambiente che coincide, quindi, con la capacità di carico, la corrispondenza con le risorse richieste diminuisce ed il tasso di aumento netto, pertanto, deve diminuire. Lo stato del sistema continua a crescere, ma ad un ritmo più lento fino a quando le risorse sono talmente scarse da fermarne la crescita.

In generale una popolazione può dipendere da molte risorse ed ognuna di esse crea un circuito controbilanciante che può limitarne la crescita. Il vincolo più stringente sarà quello determinante nello stabilire quale dei circuiti controbilanti sarà più influente durante la crescita dello stato del sistema.

Un aspetto chiave della struttura che genera l'archetipo sistemico crescita ad S è che l'interazione dei loop rinforzanti e controbilanti non deve essere lineare. Inizialmente, quando lo stato del sistema è molto piccolo rispetto al massimo delle risorse, i limiti della crescita raggiungibili sono lontani e dominano i loop rinforzanti e ciò porta ad una crescita esponenziale dello stato del sistema. Conseguenza diretta di tale andamento crescente è la diminuzione della corrispondenza con le risorse possibili. I

limiti di crescita raggiungibili diventano più vicini, aumenta la forza dei loop controbilanciati fino a quando non diventano dominanti. Graficamente quest'ultimo aspetto corrisponde al punto di flesso nella curva in cui si passa dall'accelerazione alla decelerazione (Sterman, John, 2000).

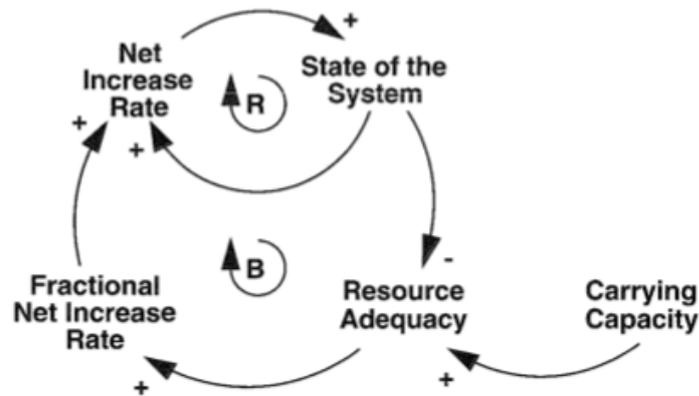


Figura 23 Struttura dell'archetipo crescita ad S (Sterman, John, 2000)

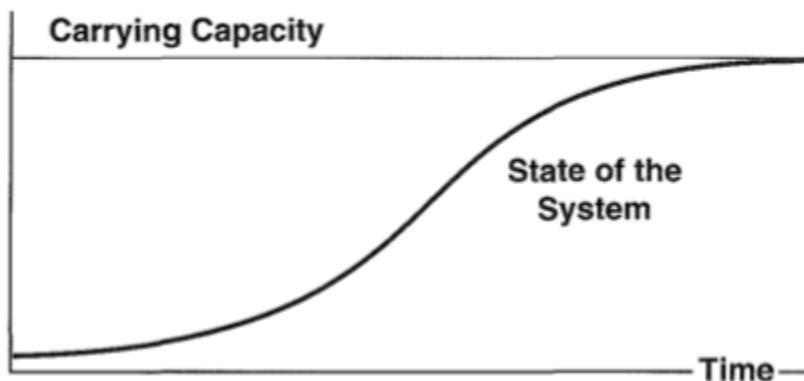


Figura 24 Comportamento dell'archetipo crescita ad S (Sterman, John, 2000)

Un sistema si comporta secondo l'archetipo crescita ad S solo se vengono soddisfatte due condizioni:

- I circuiti controbilanciati non devono includere ritardi significativi;
- La capacità di carico deve essere fissa.

L'insegnamento che emerge dall'interpretazione del fenomeno osservato suggerisce che nei periodi di crescita è necessario analizzare quali possano essere condizioni limitanti presenti e future. È fondamentale, quindi, intervenire rimuovendo il limite alla crescita prima che questo manifesti i suoi effetti negativi. (Mollona, 2000; Senge, 1990).

### 2.5.5. Crescita con sovraoscillazione

La crescita con sovraoscillazione richiede che i loop controbilancianti, che limitano la crescita, agiscano rapidamente all'avvicinarsi della capacità di carico. Spesso, però, ci sono ritardi significativi in questi loop controbilancianti e ciò porta alla possibilità che lo stato del sistema superi dapprima il valore della capacità di carico e poi oscilli attorno ad essa (Sterman, John, 2000).

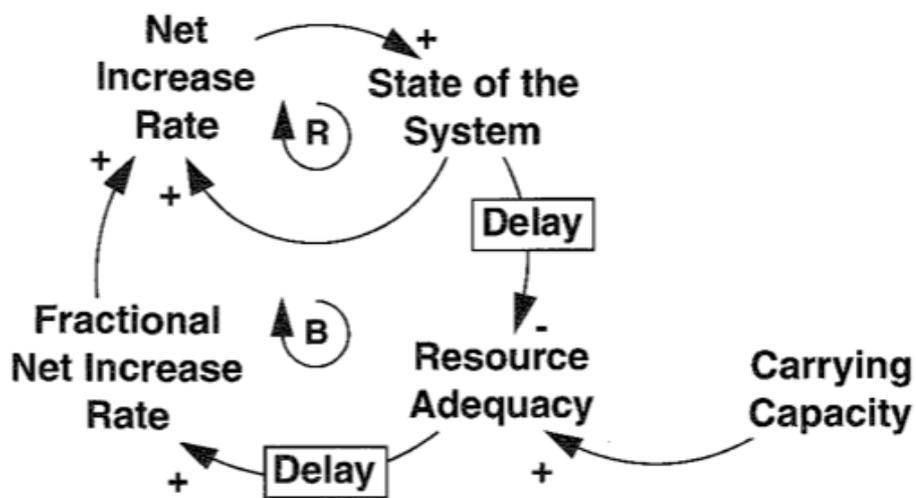


Figura 25 Struttura dell'archetipo crescita con sovraoscillazione (Sterman, John, 2000)

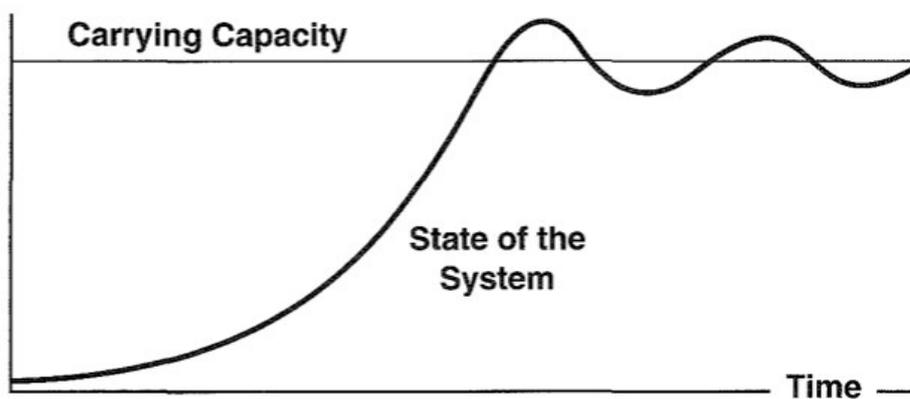


Figura 26 Comportamento dell'archetipo crescita con sovraoscillazione (Sterman, John, 2000)

### 2.5.6. Sovraoscillazione e crollo

La capacità di carico spesso non è fissa. Infatti può capitare che la capacità dell'ambiente di supportare una popolazione in crescita venga erosa o consumata dalla popolazione stessa. Il consumo o l'erosione della capacità di carico da parte della popolazione crea un secondo loop controbilanciante che ne limita la crescita. L'aumento della popolazione riduce la corrispondenza delle risorse diminuendo le risorse disponibili pro capite e quelle totali. Come nel caso dell'archetipo crescita ad S, quando le risorse sono inizialmente abbondanti, domina il loop rinforzante e lo stato del sistema cresce in modo esponenziale. Man mano che aumenta, la corrispondenza con le risorse diminuisce e, quindi, i loop controbilancianti aumentano di forza e ad un certo punto la popolazione raggiunge il suo massimo. A differenza dell'archetipo crescita ad S, però, il sistema non raggiunge l'equilibrio ma lo stato del sistema inizia a diminuire. Nonostante ciò, la popolazione rimanente continua a consumare la capacità di carico e, se non vi è la possibilità di rigenerare quest'ultima, l'equilibrio del sistema è rappresentato dall'estinzione, mentre se la capacità di carico può essere integrata con risorse, il sistema può sostenere un equilibrio diverso da zero. (Sterman, John, 2000).

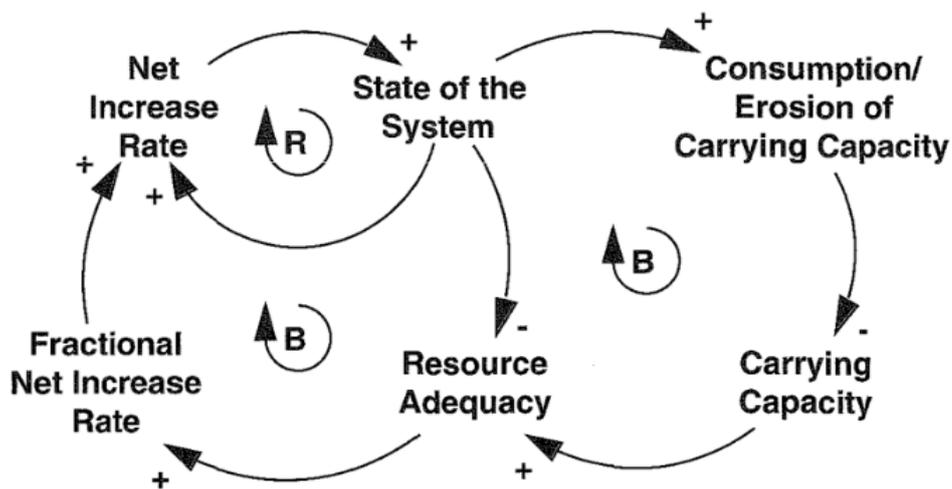


Figura 27 Struttura dell'archetipo sovraoscillazione e crollo (Sterman, John, 2000)

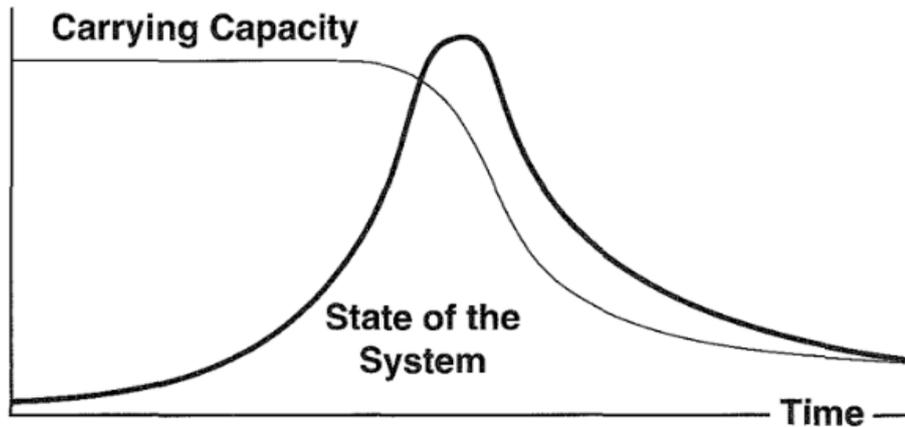


Figura 28 Comportamento dell'archetipo sovraoscillazione e crollo (Sterman, John, 2000)

### 2.5.7. Altri possibili comportamenti del sistema

Archetipi sistemici quali crescita esponenziale, raggiungimento dell'obiettivo, oscillazione e loro combinazioni crescita ad S, crescita con sovraoscillazione, sovraoscillazione e crollo non sono gli unici schemi comportamentali per i sistemi.

Altri possibili comportamenti, infatti, risultano essere:

- Stasi o equilibrio;
- Casualità;
- Caos.

#### **Stasi o equilibrio**

Il comportamento sistemico di stasi si verifica per due motivi, tra loro esclusivi:

- Le dinamiche che influenzano lo stato del sistema sono così lente che il cambiamento è impercettibile;
- I processi di loop controbilanciante sono così potenti da mantenere lo stato del sistema quasi costante anche quando sottoposto a disturbi.

Nel primo caso il cambiamento è troppo lento per essere significativo rispetto all'orizzonte temporale, mentre nel secondo caso il comportamento di stasi è un esempio di archetipo raggiungimento dell'obiettivo molto efficace (Sterman, John, 2000).

## Casualità

I disturbi possono essere modellati come variazioni casuali attorno al comportamento medio dato dalle equazioni che individuano la struttura di retroazione del sistema e danno origine al comportamento sistemico casualità. Quando quest'ultimo non deriva dall'eterogeneità dei fattori agenti, è più appropriato modellare i singoli elementi del sistema (*Sterman, John, 2000*).

## Caos

Per spiegare il comportamento sistemico caos si fa riferimento ai tipi più comuni di oscillazioni:

- Smorzate;
- In espansione e cicli limite;
- Caotiche.

### *Oscillazioni smorzate*

Un sistema si comporta secondo oscillazioni smorzate quando presenta oscillazioni e, venendo perturbato e lasciato indisturbato, fa sì che le sue fluttuazioni si estinguano.

### *Oscillazioni in espansione e cicli limite*

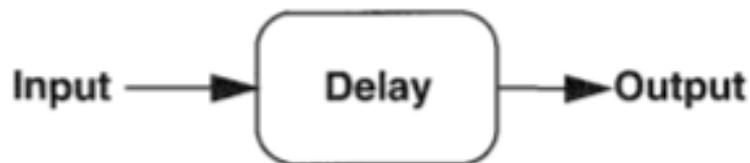
Il sistema presenta oscillazioni in espansione quando ha un equilibrio localmente instabile ovvero anche piccoli disturbi tendono a spostare il sistema più lontano dal punto di equilibrio. Mentre un equilibrio può essere localmente instabile, qualsiasi sistema reale deve essere globalmente stabile, cioè le sue traiettorie non devono divergere all'infinito. Se ad un sistema oscillatorio con un equilibrio localmente instabile viene data una leggera spinta dal suo punto di equilibrio, le sue oscillazioni diventeranno sempre più grandi fino a quando non saranno vincolate da varie non linearità. Tali oscillazioni sono note come cicli limite e ciò sta ad indicare i limiti non lineari che ne controllano l'ampiezza. I cicli limite non sono perpetui, infatti per essere mantenuti hanno bisogno di energia fornita da una fonte esterna all'oscillatore.

### *Oscillazioni caotiche*

Il sistema mostra oscillazioni caotiche quando fluttua in modo irregolare. Esso, quindi, ha un comportamento che non si ripete mai esattamente anche se il suo movimento è completamente deterministico. L'irregolarità è endogena e non è creata da shock esterni casuali. Come nei cicli limite, il percorso di un sistema caotico è limitato ad una determinata regione dello spazio degli stati. Il caos può sorgere solo nei sistemi non lineari in quanto essi sono limitati. Il comportamento caotico, a differenza dei cicli limite o dei sistemi lineari, non ha un periodo ben definito. (Sterman, John, 2000).

### 2.6. Ritardi

I ritardi sono un aspetto rilevante nelle dinamiche dei sistemi. Il ritardo è il tempo che intercorre tra un'azione e il risultato ovvero la conseguenza dell'azione stessa.



*Figura 29 Ritardo (Sterman, 2000)*

Poiché l'output generalmente differisce dall'input quindi è in ritardo, deve esserci uno stock all'interno del processo per accumulare la differenza tra input e output.

Un ritardo può essere di due tipologie:

- Materiale;
- Di informazione.

### 2.6.1. Ritardi materiali

Un ritardo materiale acquisisce il flusso del materiale attraverso un processo di ritardo ed esempi a tal proposito possono riguardare il flusso di prodotto attraverso una catena di approvvigionamento, la costruzione di edifici oppure la progressione delle attività di progettazione attraverso un processo di sviluppo del prodotto.

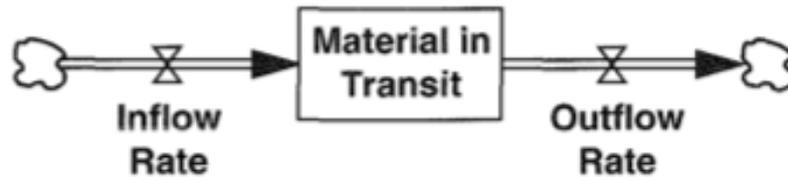


Figura 30 Struttura generica di un ritardo materiale (Sterman, 2000)

Esistono differenti tipi di ritardo materiale:

- Ritardo nella condotta o nel trasporto;
- Ritardo di primo ordine;
- Ritardo di ordine superiore.

Lo stock di materiale in transito per qualsiasi tipo di ritardo materiale è dato da:

$$\text{Materiale in transito} = \text{INTEGRAL} (\text{Afflusso} (t) - \text{Deflusso} (t), \text{Materiale in transito} (0))$$

Equazione 3 Calcolo del materiale in transito nei ritardi materiali (Sterman, 2000)

#### **Ritardo nella condotta o nel trasporto**

Il ritardo nella condotta o nel trasporto ha un tempo di ritardo costante e l'ordine di uscita dal ritardo è esattamente lo stesso dell'ordine di entrata.

In questo tipo di ritardo materiale il deflusso è semplicemente l'afflusso shiftato del tempo di ritardo medio (D):

$$\text{Deflusso} (t) = \text{Afflusso} (t - D)$$

Equazione 4 Calcolo del deflusso in un ritardo nella condotta (Sterman, 2000)

La distribuzione A nella figura sottostante rappresenta un ritardo nella condotta: quando l'afflusso è un impulso, l'uscita è un impulso esattamente D unità di tempo successive. Non c'è miscelazione nell'ordine di lavorazione, né alcuna variazione nei tempi di lavorazione individuali; il tempo di ritardo per ogni elemento è uguale al tempo di ritardo medio.

I singoli elementi escono dal ritardo nello stesso ordine ed esattamente nello stesso tempo, come gli oggetti che si spostano lungo una catena di montaggio a velocità costante.

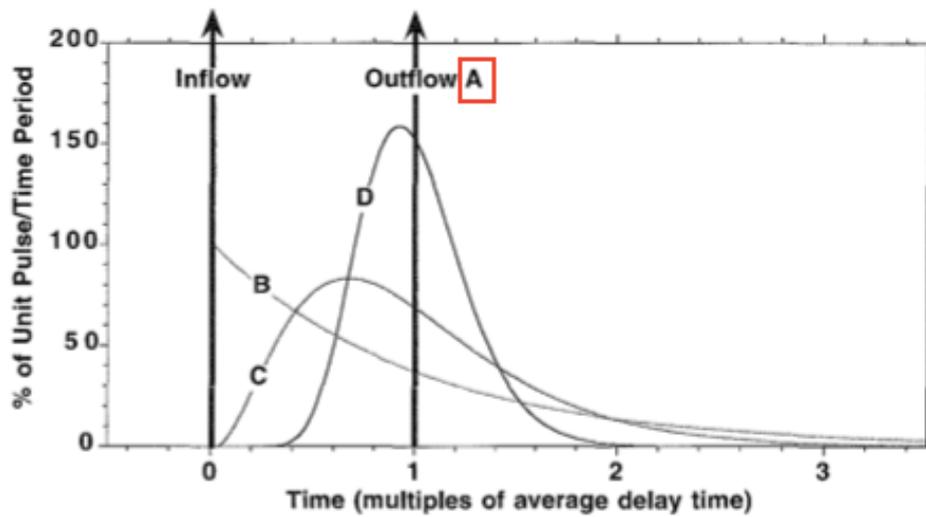


Figura 31 Distribuzione A del deflusso in un ritardo nelle condutture

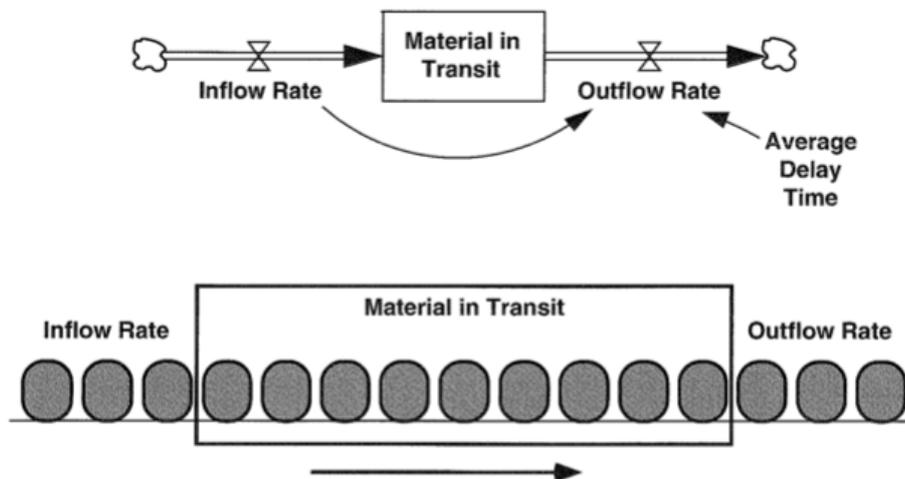


Figura 32 Struttura di un ritardo nelle condutture (Serman, 2000)

## Ritardo di primo ordine

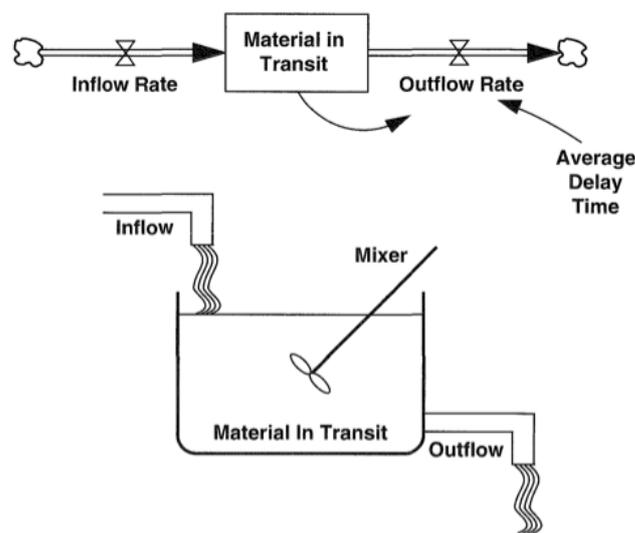
In un ritardo materiale del primo ordine il deflusso è proporzionale allo stock di materiale in transito. Il contenuto dello stock è sempre perfettamente miscelato, quindi tutti gli articoli dello stock hanno la stessa probabilità di uscita, indipendentemente dal loro orario di arrivo.

$$\text{Deflusso} = \frac{\text{Materiale in transito}}{D}$$

*Equazione 5 Calcolo del deflusso in un ritardo materiale del primo ordine*

Dove D è il tempo di ritardo medio.

È, quindi, evidente che gli unici input per la portata in uscita sono lo stock di materiale in transito ed il tempo di ritardo mentre le informazioni riguardanti l'ordine dei singoli articoli nello stock non vengono utilizzate.



*Figura 33 Struttura del ritardo materiale del primo ordine (Sterman, 2000)*

La portata in uscita forma un ciclo di feedback controbilanciante, poiché maggiore è lo stock di materiale in transito, maggiore sarà il deflusso che andrà a sua volta a ridurre lo stock. La distribuzione B nella figura sottostante mostra la risposta di un ritardo del materiale del primo ordine ad un ingresso ad impulsi corrispondente al decadimento esponenziale.

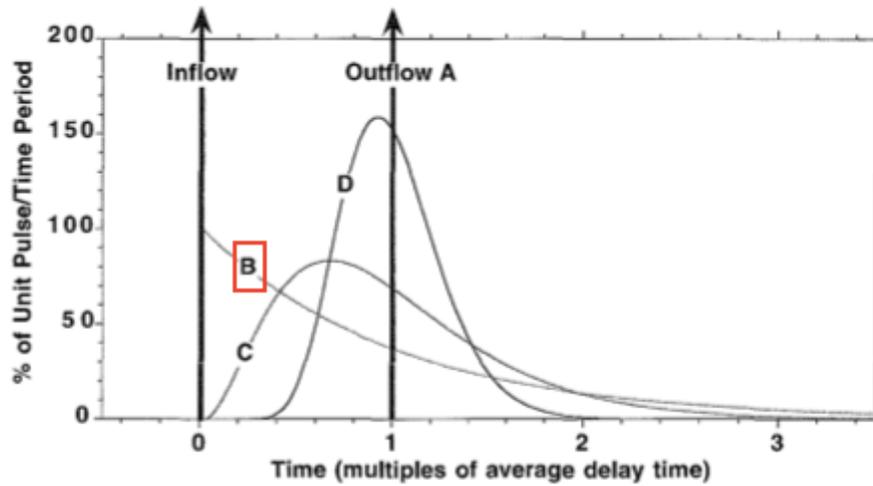


Figura 34 Distribuzione B del deflusso in un ritardo materiale del primo grado (Sterman, 2000)

### Ritardo di ordine superiore

In presenza di ritardi materiali di ordine superiore c'è una miscelazione parziale che si verifica quando un ritardo consiste in più fasi di elaborazione in cui gli elementi fluiscono in modo sequenziale da una fase all'altra: ciascuna fase introduce una certa miscelazione.

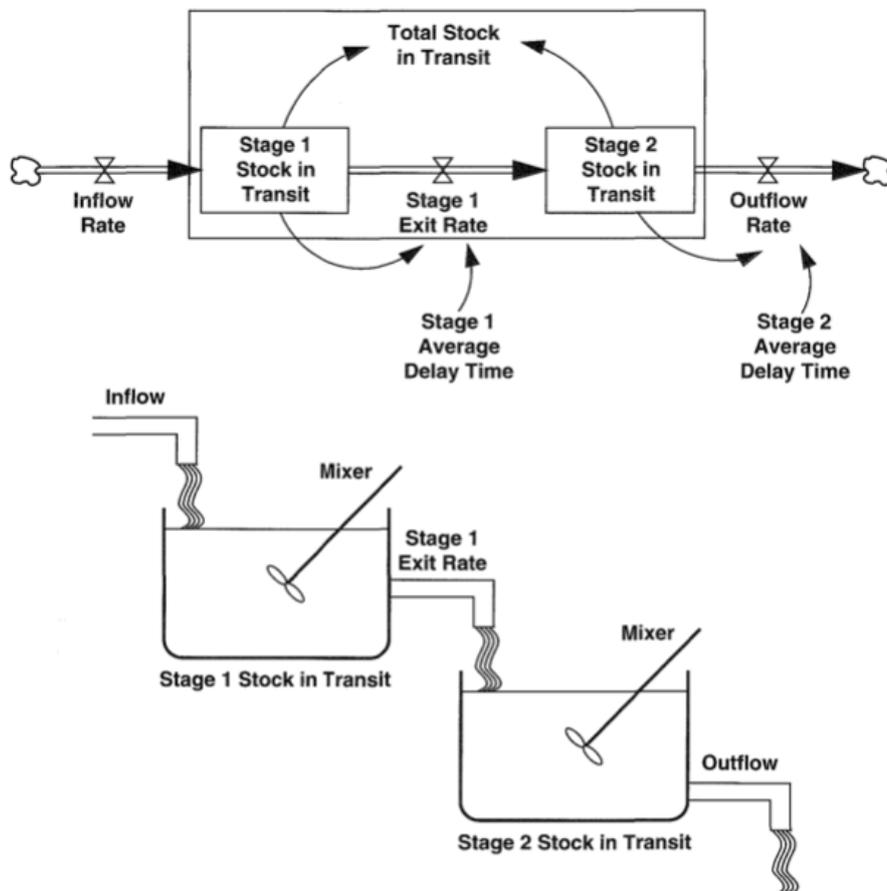


Figura 35 Struttura del ritardo di ordine superiore (Stermann, 2000)

In presenza di questo tipo di ritardo materiale il deflusso aumenta gradualmente, raggiunge un picco e poi scende a zero, come si vede per le distribuzioni C e D della figura sottostante.

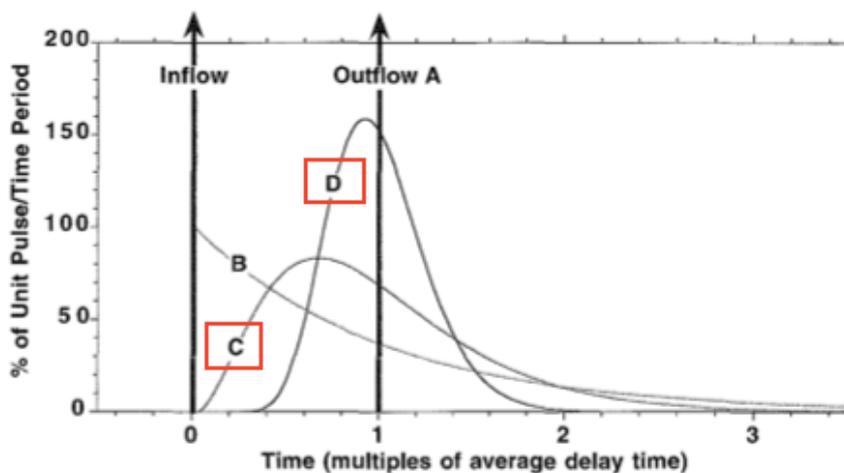


Figura 36 Distribuzioni C e D del deflusso in un ritardo di ordine superiore (Stermann, 2000)

Lo stock totale in transito è la somma dello stock in transito in ogni fase. Il ritardo totale medio tra afflusso e deflusso è la somma dei ritardi medi delle singole fasi ed è in questo modo che il ritardo può essere costruito con un numero arbitrario di fasi.

Le equazioni per il ritardo materiale di ordine n-esimo, chiamato con DELAY<sub>n</sub>, sono:

$$\text{Deflusso} = \text{DELAY}_n(\text{Afflusso}, D)$$

$$\text{Materiale Totale in transito} = \sum_{i=1}^n \text{Materiale in transito}_i$$

$$\text{Materiale in transito}_i = \text{INTEGRAL}(\text{Afflusso netto}_i, \text{Materiale in transito}_i(0))$$

$$\text{Materiale in transito}_i(0) = \text{Afflusso} * \frac{D}{n}$$

$$\text{Tasso di afflusso netto}_i = \begin{cases} \text{Afflusso} - \text{Tasso di uscita dallo stadio}_i & i = 1 \\ \text{Tasso di uscita dal passaggio}_{i-1} - \text{Tasso di uscita dallo stadio}_i & i = 2, \dots, n-1 \\ \text{Tasso di uscita dallo stadio}_{n-1} - \text{Deflusso} & i = n \end{cases}$$

$$\text{Tasso di uscita dallo stadio}_i = \frac{\text{Materiale in transito}_i}{\frac{D}{n}} \quad i = 1, \dots, n-1$$

$$\text{Deflusso} = \frac{\text{Materiale in transito}_n}{\frac{D}{n}}$$

*Equazione 6 Equazioni per il ritardo materiale di ordine n-esimo (Sterman, 2000)*

La condizione iniziale:

$$\text{Materiale in Transito} = \text{Afflusso} * \frac{D}{n}$$

*Equazione 7 Condizione iniziale per il Materiale in Transito in un ritardo di ordine n-esimo (Sterman, 2000)*

inizializza il ritardo all'equilibrio in modo tale che il deflusso iniziale sia uguale all'afflusso iniziale.

### 2.6.2. Ritardi di informazione

Un ritardo di informazione rappresenta il graduale adattamento di percezioni o credenze come la misurazione o la percezione di una variabile o l'aggiornamento di previsioni. In generale qualsiasi credenza o percezione comporta un ritardo nell'informazione perché i modelli mentali non possono essere aggiornati istantaneamente quando vengono ricevute nuove informazioni. Infatti tutte le

convinzioni, le aspettative, le previsioni e le proiezioni del decisore si basano sulle informazioni disponibili al momento, il che significa informazioni sul passato.

Occorre tempo per raccogliere le informazioni necessarie per formare giudizi ed, inoltre, le persone non cambiano idea immediatamente quando ricevono nuove informazioni in quanto la riflessione e la delibera richiedono spesso molto tempo.

I ritardi di informazione non possono essere modellati con la stessa struttura utilizzata per i ritardi materiali perché non vi è alcun afflusso fisico ad uno stock di materiale in transito. Gli input e gli output dei ritardi materiali vengono conservati a differenza delle informazioni intese come percezioni o credenze.

Esempi di ritardi di informazione sono il tasso di ordini percepito per un prodotto di un'impresa e la convinzione del management sui tassi di inflazione futuri.

### **Ritardo di primo ordine o livellamento esponenziale del primo ordine**

Il più semplice ritardo nelle informazioni è il livellamento esponenziale del primo ordine chiamato anche aspettative adattive. Con quest'ultimo termine si vuole indicare che la convinzione si adatta gradualmente al valore effettivo della variabile.

In questo caso la convinzione o il valore percepito dell'input ( $\hat{X}$ ) è uno stock:

$$\hat{X} = \text{INTEGRAL}(\text{Cambiamento nel Valore Percepito}, \hat{X}(0))$$

*Equazione 8 Calcolo del valore percepito dell'input  $\hat{X}$  (Sternan, 2000)*

Il tasso di variazione della convinzione è proporzionale al divario tra il valore corrente dell'input (X) e il valore percepito:

$$\text{Cambiamento nel Valore Percepito} = \frac{(X - \hat{X})}{D}$$

*Equazione 9 Calcolo del Cambiamento nel Valore Percepito (Sternan, 2000)*

Nei ritardi di informazione la convinzione stessa ( $\hat{X}$ ) è un'azione in quanto una percezione è uno stato del sistema (stato mentale). La convinzione sul valore di una certa quantità tende a rimanere sulla sua misura corrente finché non c'è qualche motivo per cambiarla ovvero fin quando non c'è un errore per cui lo stato effettivo differisce

dallo stato percepito. Lo stato del sistema si adatta in risposta al divario tra la convinzione attuale ed il valore effettivo della variabile. Il tasso di aggiornamento della variabile è massimo immediatamente dopo il cambiamento del valore effettivo della variabile ovvero quando l'errore nella convinzione è maggiore. Man mano che la convinzione viene aggiornata, l'errore diminuisce e gli aggiustamenti successivi si riducono finché la convinzione è nuovamente corretta.

Il livellamento esponenziale è ampiamente utilizzato nelle previsioni grazie alla sua semplicità e al basso costo di calcolo. Inoltre esso ha la proprietà di tentare di eliminare automaticamente gli errori di previsione.

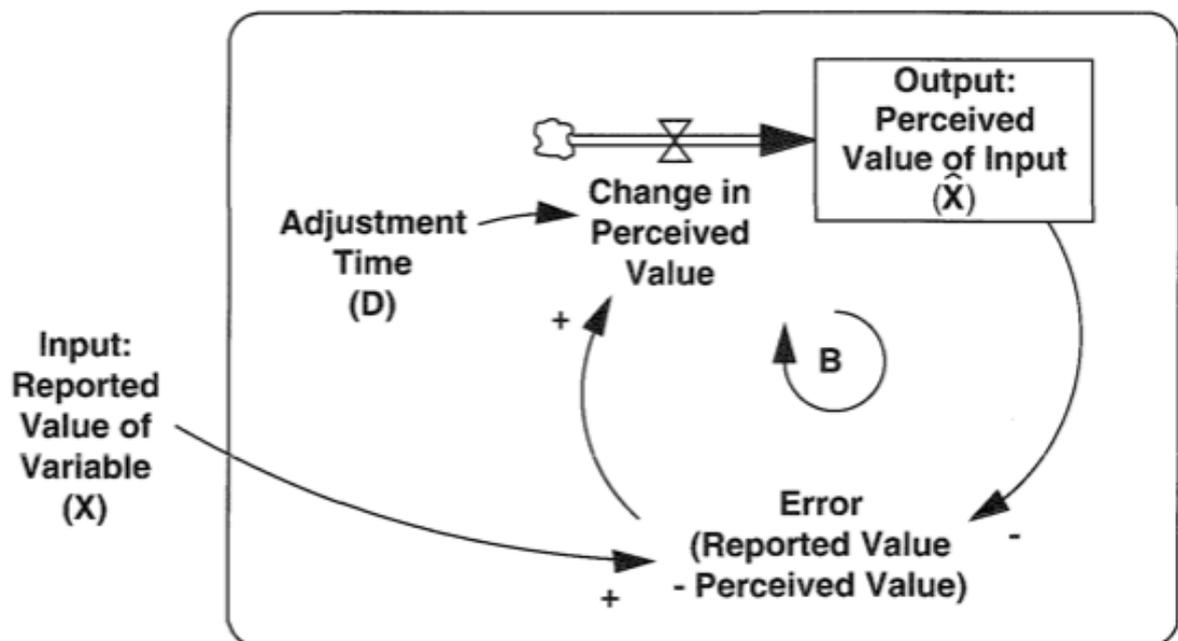


Figura 37 Struttura del ritardo di informazione aspettative adattive (Sterman, 2000)

### Ritardo di informazione di ordine superiore

Si parla di ritardo di informazione di ordine superiore quando l'uscita inizia a rispondere solo dopo che è trascorso del tempo. In questo caso i pesi sulle informazioni passate sono inizialmente bassi, successivamente raggiungono un picco per poi diminuire.

I valori recenti dell'input potrebbero avere un peso ridotto per diversi motivi:

-il ritardo che intercorre tra lo stato effettivo di un sistema e le decisioni che possono alterarlo coinvolge più fasi;

-i valori attuali dell'ingresso potrebbero non essere disponibili a causa di ritardi nelle misurazioni e nei rapporti;

-possono verificarsi ritardi amministrativi;

-possono esserci ritardi decisionali.

Il Valore Riportato a disposizione dei decisori è pari al valore effettivo spostato di qualche periodo di tempo nel passato.

$$\text{Valore Riportato}(t) = \text{Valore attuale}(t - D)$$

*Equazione 10 Calcolo del Valore Riportato dei decisori al tempo t (Sterman, 2000)*

Dove con D si indica il ritardo nella segnalazione. L'uscita del ritardo segue esattamente l'ingresso ma viene spostata di D unità nel tempo.

Proprio come i ritardi del materiale di primo ordine possono essere collegati in serie per generare ritardi di ordine superiore con tassi di risposta più realistici, allo stesso modo è possibile sovrapporre strutture di livellamento di primo ordine per generare una famiglia di ritardi nell'informazione di ordine superiore.

Un ritardo nell'informazione di ordine n, indicato dalla funzione SMOOTHn, consiste in n ritardi nell'informazione del primo ordine collegati a cascata in serie. Il valore percepito di ogni fase è l'input per la fase successiva e l'uscita del ritardo è il valore percepito della fase finale. Ogni stadio ha lo stesso tempo di ritardo, pari a 1/n del ritardo totale D:

$$\text{Output} = \text{SMOOTH}_n(\text{Input}, D)$$

$$\text{output} = S_n$$

$$S_i = \text{INTEGRAL}(\text{Cambiamento di Stadio}_i, S_i(0))$$

$$S_i(0) = \text{Input}$$

$$\text{Cambiamento di Stadio}_i = \begin{cases} \frac{(\text{Input} - S_1)}{\frac{D}{n}} & i = 1 \\ \frac{S_{i-1} - S_i}{\frac{D}{n}} & i = 1, \dots, n \end{cases}$$

Equazione 11 Ritardo di informazioni di ordine n (Sterman, 2000)

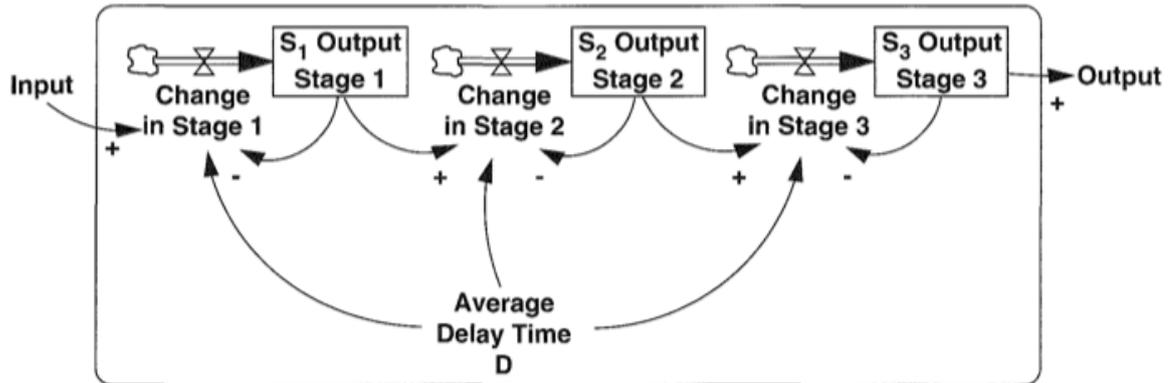


Figura 38 Struttura del ritardo di informazione del terzo ordine

## 2.7. Fasi della System Dynamics

Per valutare a priori le prestazioni ottenibili dal sistema in esame prima ancora di procedere alla sua realizzazione o modifica e per considerare il comportamento dello stesso al variare di condizioni e parametri, si deve modellare e simulare il sistema. Si parte con l'identificazione e la definizione del problema, si passa poi alla concettualizzazione del sistema, alla formulazione del modello, alla fase di test del modello ed infine all'utilizzo, all'implementazione, alla diffusione e alla progettazione dell'apprendimento della strategia e dell'infrastruttura.

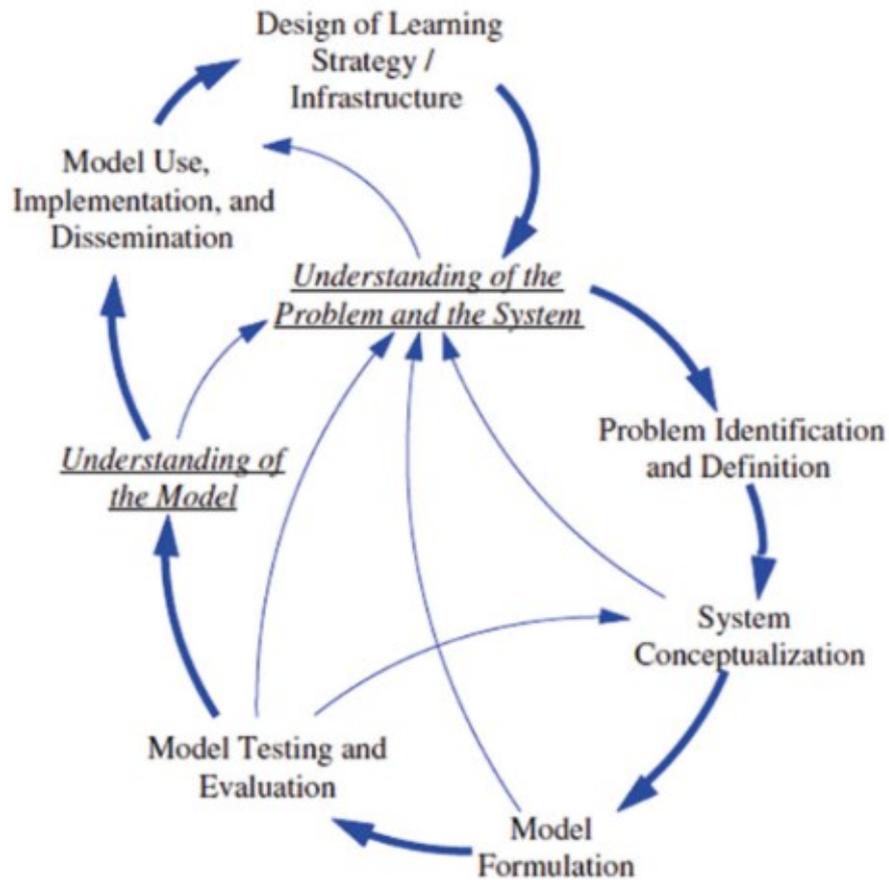


Figura 39 Panoramica dell'approccio alla modellazione delle dinamiche di sistema (Martinez-Moyano e Richardson, 2013)

Per far ciò, la metodologia prevede le seguenti fasi:

1. Identificazione del problema;
2. Sviluppo di ipotesi dinamiche per spiegare la causa del problema;
3. Creazione del diagramma causale;
4. Conversione del diagramma causale in un diagramma stock-flussi;
5. Stima dei parametri e della loro sensibilità eseguita con l'ausilio di programmi o equazioni STELLA o VENSIM;
6. Convalida del modello attraverso specifici test;
7. Applicazione del modello.

### 2.7.1. Identificazione del problema

Il primo step da seguire per la modellazione è identificare il problema, circoscriverlo e definire i suoi obiettivi specifici.

È necessario, quindi, identificare le variabili importanti, individuare le cause del problema, comprenderlo nella sua interezza, per attuare politiche al fine di risolverlo nel breve e nel lungo periodo.

Per riconoscere il problema è opportuno attingere a studi e report, opinioni di esperti e documentazioni relative a comportamenti passati del sistema in modo tale da poter preparare una descrizione dettagliata a riguardo. Essa deve contenere i principali fattori che influenzano la dinamica del comportamento del sistema, lo scopo e gli obiettivi, dopo un confronto con tutte le parti interessate.

La descrizione verbale del problema è il modo più semplice per trattare con gli altri relativamente al sistema in esame; in particolare più è dettagliata la descrizione, più diventa facile modellare il sistema. La descrizione verbale, quindi, è un modello qualitativo del sistema.

Quando quest'ultimo è difficile da comprendere interamente, perché è molto grande e complesso, è conveniente suddividere il sistema in settori o blocchi per semplificare le interazioni all'interno del sistema. Ogni blocco descrive una parte di un sistema che dipende da alcune variabili di input e da cui ne derivano altre di output. Il sistema, nel suo complesso, può essere descritto in termini di interconnessioni tra i blocchi, per cui può essere rappresentato graficamente con un diagramma a blocchi (*Bala, Arshad, Noh, 2017*).

### 2.7.2. Ipotesi dinamica

Dopo il primo step si passa allo sviluppo di una teoria chiamata ipotesi dinamica, basata sul comportamento della modalità di riferimento in un orizzonte temporale, in quanto essa, formulata in termini di diagramma causale (causal loop diagram) e diagramma stock-flussi, può spiegare la dinamica del problema.

L'ipotesi dinamica è un modello concettuale che consiste generalmente in un diagramma causale, in un diagramma stock-flussi o in una loro combinazione. Definisce i circuiti di feedback critici che guidano il comportamento del sistema (*Bala, Arshad, Noh, 2017*).

L'ipotesi dinamica è provvisoria in quanto può essere revisionata o scartata dopo il suo test che dipende esclusivamente dal comportamento della modalità di riferimento osservata e da quella simulata in un orizzonte temporale (*Sterman, 2000*).

L'obiettivo dell'ipotesi dinamica è sviluppare una spiegazione endogena del comportamento problematico, ovvero trovare le interazioni delle variabili all'interno del sistema che causano quella determinata situazione (*Sterman, 2000*).

### 2.7.3. Creazione del diagramma causale

Un diagramma causale è uno schema che aiuta a visualizzare come delle variabili correlate si influenzino a vicenda.

Il confine del sistema copre sia le variabili chiave che sono all'interno (endogene) sia quelle che attraversano il confine (esogene).

Inoltre le variabili del sistema vanno classificate per grado di importanza (variabili più importanti, variabili secondariamente importanti e variabili terziariamente importanti).

Fondamentale è cercare le relazioni tra le variabili e gli sviluppi dei circuiti di feedback che sono rappresentati sotto forma di diagrammi causali nella System Dynamics (*Sterman, 2000*) e sotto forma di diagrammi a blocchi nella teoria dei controlli nell'analisi dei sistemi (*Manetsch e Park, 1982*).

#### 2.7.4. Creazione del diagramma stock-flussi

Il diagramma stock-flussi rappresenta le equazioni integrali alle differenze finite che coinvolgono le variabili della struttura del circuito di retroazione del sistema simulandone il comportamento dinamico. E', quindi, la struttura fisica sottostante il sistema in termini di stock e flussi.

Uno stock (o "variabile livello") è "una certa entità che viene accumulata nel tempo a causa di flussi in entrata e/o ridotta dai deflussi (flussi in uscita). I livelli possono essere modificati soltanto tramite i flussi".

Un flusso (o tasso) "modifica un livello o stock nel tempo". I flussi sono misurati in un certo intervallo di tempo ed in genere si distinguono i flussi in entrata (che aumentano il livello) da quelli in uscita (che riducono il livello).

#### 2.7.5. Stima dei parametri

La stima dei parametri è uno dei passi fondamentali nella modellazione della dinamica del sistema ed è, quindi, richiesto che sia corretta per ottenere comportamenti plausibili del sistema nel tempo. Essa può essere fatta servendosi di software di simulazione quali STELLA o VENSIM e partendo da dati:

- Disaggregati;
- Aggregati: possono utilizzare un'equazione singola o equazioni multiple.

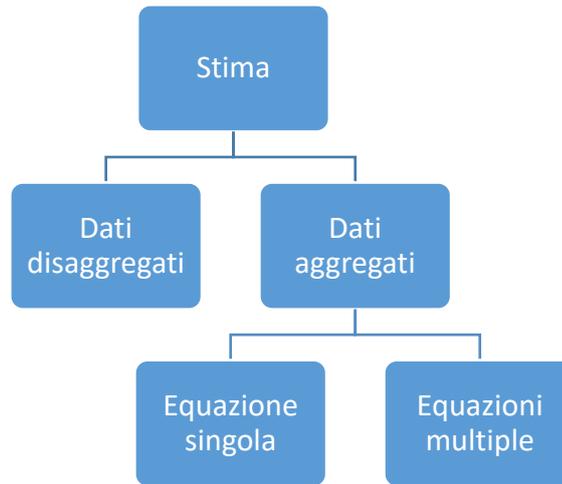


Figura 40 Stima dei parametri

La stima è fatta con *dati disaggregati* quando si utilizzano parametri determinati sulla base di informazioni descrittive ottenute dai partecipanti alla modellizzazione dei sistemi.

Quando, invece, si esegue la stima dei parametri mediante *dati aggregati* si presuppone la correttezza di un'equazione singola del modello oppure di più equazioni.

Altrettanto importante è l'analisi della sensibilità dei parametri, eseguita per valutare come essi influenzino il comportamento del sistema e quanto sia rilevante determinarli con precisione, ma anche per capire l'affidabilità dei risultati simulati nonché per verificare la solidità del comportamento del modello. L'analisi della sensibilità offre l'opportunità di determinare il livello di accuratezza necessario nella stima del parametro per rendere valido ed utile il modello.

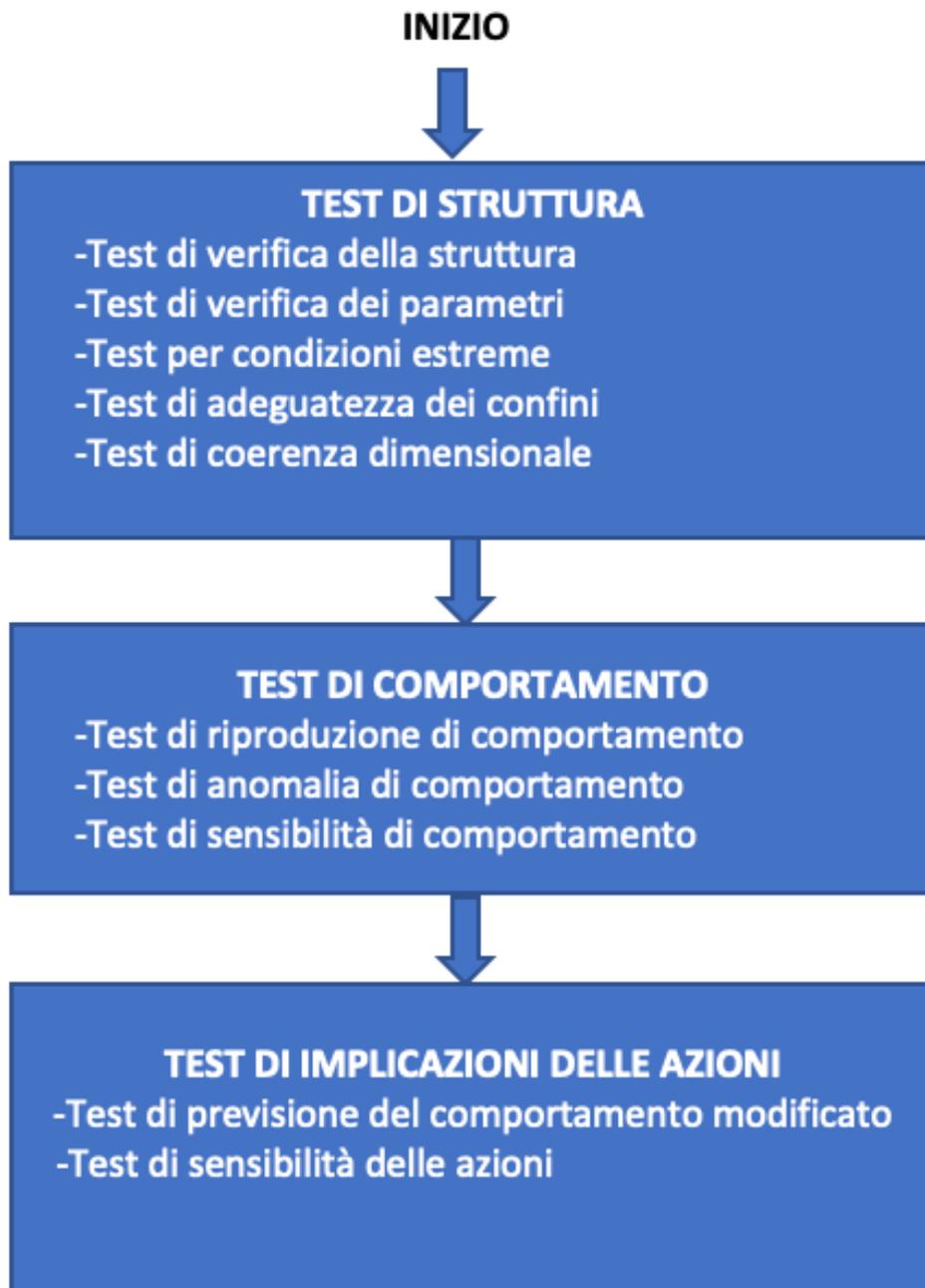
E' necessario, quindi, stimare la sensibilità dei parametri importanti del modello e ciò viene fatto impostando valori diversi di circa il 15%, in modo tale da studiare le variazioni nei comportamenti del modello (Bala, Arshad, Noh, 2017).

#### 2.7.6. Test del modello

I test per consolidare la fiducia nel modello comprendono la sua convalida, l'analisi di sensibilità e l'analisi politica.

Il test consiste nel confronto di un modello con la realtà empirica e porta ad una sua accettazione o rifiuto a seconda del risultato. La validazione è il processo per stabilire la fiducia nella solidità e nell'utilità del modello. I test possono essere di tre tipologie:

- Test di struttura;
- Test di comportamento;
- Test di implicazioni delle azioni.



*Figura 41 Sequenza logica dei test per la convalida del modello (Bala B.K., Arshad F.M., Noh K.M., 2017)*

In modalità test, le strutture del modello vengono confrontate direttamente con la conoscenza descrittiva delle strutture del sistema reale così come il comportamento del modello osservato viene messo in relazione con quello reale del sistema.

In modalità di validazione, il modello si comporta in modo plausibile e presenta gli stessi problemi o comportamenti del sistema reale.

L'obiettivo della validazione del modello è sviluppare fiducia per quanto riguarda le previsioni. Infatti il primo passo per raggiungere questo intento è stabilire la validità della struttura del modello e quello successivo è riprodurre il comportamento del modello che sarà tanto più simile a quello reale quanto più veritiera sarà la struttura del modello e quindi quanto più sarà grande la fiducia nelle previsioni.

Si vanno ora ad analizzare i differenti tipi di test del modello rispettivamente nel seguente ordine: test di struttura, test di comportamento e test di implicazioni delle politiche (*Bala, Arshad, Noh, 2017*).

### **Test di struttura**

I test di struttura costituiscono il primo passo nella validazione dei modelli. Possono essere ulteriormente classificati come:

- Test di struttura diretta
  - Empirici;
  - Teorici.
- Test di comportamento orientati alla struttura.

I test empirici vengono condotti confrontando la struttura del modello con le informazioni qualitative e quantitative ottenute dal sistema.

I test teorici vengono eseguiti confrontando la struttura del modello con la conoscenza generalizzata del sistema dalla letteratura.

Nei test di comportamento orientati alla struttura la validità della struttura del modello viene valutata mettendo in relazione il comportamento del modello previsto con la conoscenza del comportamento dei sistemi reali.

Ulteriore classificazione dei test di struttura è la seguente:

- Test di verifica della struttura;
- Test di verifica dei parametri;
- Test per condizioni estreme;
- Test di adeguatezza dei confini;
- Test di coerenza dimensionale.

Il test di *verifica della struttura* confronta le equazioni del modello con le relazioni esistenti nei sistemi reali. Questa attività è più semplice rispetto agli altri test.

Il test di *verifica dei parametri* mette in relazione i parametri costanti con quelli ottenuti grazie alla conoscenza dei sistemi reali sia a livello concettuale che a livello numerico. Esso ha uno stretto legame con il test di verifica della struttura in quanto ha di base lo stesso obiettivo.

Il test *per condizioni estreme* valuta la validità delle equazioni del modello e l'essere plausibile dei valori risultanti rispetto a ciò che accadrebbe in condizioni estreme simili in realtà. Il modello deve essere in grado di far fronte a condizioni esterne e deve, quindi, essere robusto. Se le condizioni estreme sono incluse nel modello il risultato è un modello migliorato nella sua normale regione operativa. Un modello dovrebbe essere messo in discussione se non supera il test per condizioni estreme, in quanto esse possono verificarsi nella realtà. Il test per condizioni estreme è efficace, in quanto migliora l'utilità del modello per l'analisi delle politiche ed è un potente mezzo per rilevare eventuali difetti nella struttura del modello.

Il test di *adeguatezza dei confini* considera le relazioni strutturali necessarie per soddisfare lo scopo del modello. Si utilizza per vedere se l'aggregazione del modello sia appropriata o meno e se il modello in esame include tutta la sua struttura corrispondente. Una volta stabilito il confine del modello è necessario verificare se è stato omissa o meno un ciclo di feedback aggiuntivo. Se quest'ultimo ha un impatto significativo deve essere incluso in quanto il modello deve comprendere tutte le variabili ed i cicli di feedback del sistema che influenzano le dinamiche o le implicazioni politiche del modello.

Il test di *coerenza dimensionale* è uno dei test di base e deve, quindi, essere eseguito durante la costruzione del modello. Esso prevede la verifica della coerenza dimensionale sul lato destro e sul lato sinistro di ciascuna delle equazioni del modello, ovvero le unità di misura devono essere uguali su entrambi i lati. Inoltre le dimensioni delle variabili devono essere quanto più vicine al loro significato fisico.

## Test di comportamento

Secondo passo nella convalida dei modelli della System Dynamics è eseguire i test del comportamento del modello, che devono essere svolti dopo aver completato con successo i test di struttura. I test di comportamento del modello sono di tre tipologie:

- Test di riproduzione di comportamento;
- Test di anomalia di comportamento;
- Test di sensibilità di comportamento.

I test di *riproduzione del comportamento* sono utili per misurare il grado di precisione con cui il modello può riprodurre il comportamento dinamico dei sistemi reali. Essi verificano, quindi, quanto il comportamento del modello corrisponda a quello del sistema reale osservato. Esistono molti strumenti per valutare quanto il comportamento del modello riesca a riprodurre quello del sistema reale. I più comuni sono le statistiche descrittive utilizzate per misurare l'adattamento punto per punto come il coefficiente di determinazione ( $R^2$ ) che misura la frazione di varianza. Inoltre l'errore assoluto medio (MAE), l'errore percentuale assoluto medio (MAPE) e l'errore quadratico medio (RMSE) sono utili perché forniscono misure dell'errore medio tra valori simulati e reali.

I test di *anomalia di comportamento* sono importanti in quanto permettono di capire quando c'è un difetto nelle ipotesi del modello. Infatti durante la simulazione di un modello di System Dynamics può succedere che quest'ultimo si comporti diversamente da come previsto, per cui si verifica un'anomalia nel comportamento del modello che può evidenziare un errore nelle ipotesi del modello.

I test di *sensibilità di comportamento* sono utilizzati per valutare se gli scostamenti possibili dai valori dei parametri del modello possano far sì che un test di comportamento, che era stato precedentemente superato, ora non lo sia più. I test di sensibilità di comportamento vengono in genere eseguiti sperimentando diversi valori dei parametri ed andando a vedere come essi impattino sull'andamento del sistema.

## Test di implicazioni delle azioni

I test di implicazioni delle azioni sono eseguiti per aumentare la validità nelle implicazioni del modello. Essi possono essere classificati nel seguente modo:

- Test di previsione del comportamento modificato;
- Test di sensibilità delle azioni.

I test di *previsione del comportamento modificato* mostrano in che modo il modello prevede il comportamento del sistema nel caso vengano modificate una o più azioni.

I test di *sensibilità delle azioni* sono quelli più appropriati quando ci sono incertezze sui presupposti dei parametri.

La sensibilità delle azioni esiste ogni volta che il cambiamento nelle ipotesi impatta modificando sostanzialmente il comportamento del sistema o l'opportunità di una scelta proposta.

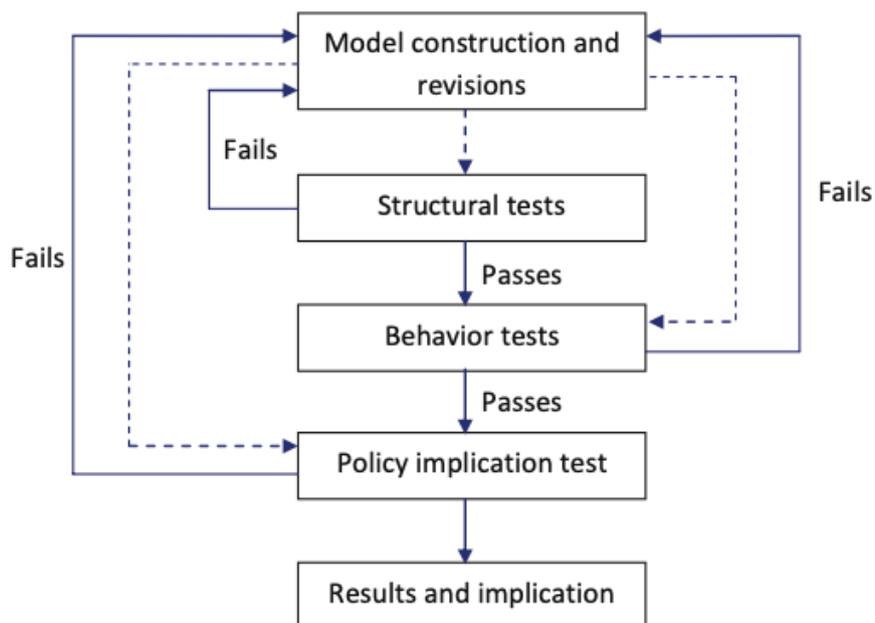


Figura 42 Sequenze logiche di passaggi di validazione del modello (Barlas, 1996)

### 2.7.7. Applicazione del modello

Si ricorre alla simulazione, poiché la mente umana non è in grado di tracciare il comportamento dinamico dei sistemi complessi a causa della loro natura controintuitiva.

Grazie alla simulazione, quindi, si riesce ad avere una migliore comprensione dei sistemi analizzando diverse scelte per migliorare le prestazioni del sistema, progettando una sua gestione e controllo.

Un modello di simulazione è essenziale per l'ottimizzazione del sistema, il cui obiettivo finale è proprio progettare in modo ottimale le sue politiche di gestione e controllo, tenendo conto dei vincoli e delle relazioni tra le variabili (*Bala, Arshad, Noh, 2017*).

Con il termine simulazione si intende la riproduzione del comportamento di un sistema.

La simulazione si basa su due concetti principali:

- sistema;
- modello.

Il sistema è definito come insieme di elementi che, interagendo tra loro, creano relazioni caratterizzanti l'insieme stesso.

Il modello è la rappresentazione semplificata del sistema reale ed il suo obiettivo è poter analizzare, studiare e comprendere il sistema stesso.

Gli elementi che costituiscono un modello di simulazione sono:

- variabili di stato;
- eventi;
- entità ed attributi;
- risorse;
- attività e ritardi.

Si vanno ora a spiegare brevemente gli elementi sopra enunciati.

Un sistema è descritto in ogni istante di tempo da un insieme di variabili, chiamate *variabili di stato*. Nei sistemi continui le variabili cambiano con continuità rispetto al tempo, mentre nei sistemi discreti le variabili variano istantaneamente in corrispondenza di precisi istanti di tempo che sono finiti oppure appartenenti ad un insieme numerabile.

Si definisce *evento* un qualsiasi accadimento istantaneo che fa cambiare il valore di almeno una delle variabili di stato. Esistono eventi esterni al sistema, chiamati eventi esogeni ed eventi interni, chiamati eventi endogeni.

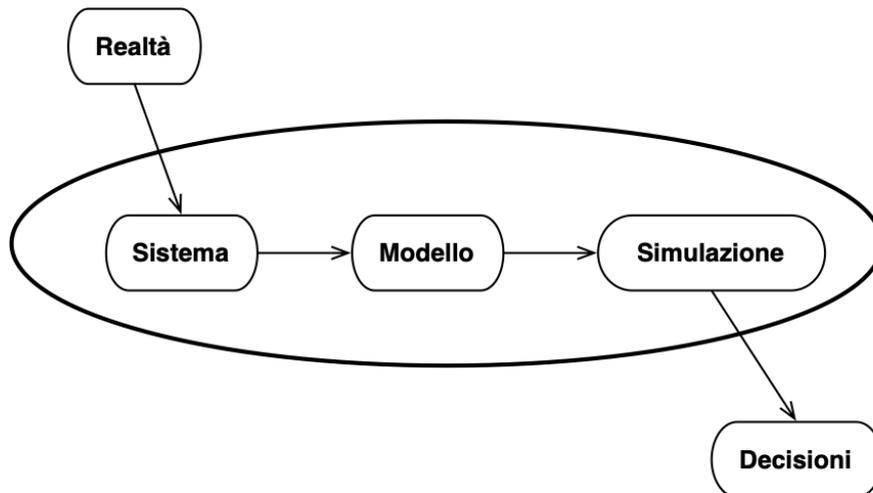
Le *entità* sono singoli elementi del sistema che devono essere definiti e possono essere caratterizzate da attributi che forniscono un valore di un dato assegnato all'entità stessa. Le entità possono essere raggruppate in classi che sono insiemi di entità dello stesso tipo, quindi si raggruppano in base agli *attributi*.

Le *risorse* sono elementi del sistema che forniscono un servizio alle entità. Un'entità può richiedere una o più unità di risorsa e se questa non è disponibile, l'entità dovrà mettersi o in coda fino a quando la risorsa non sarà disponibile oppure intraprendere un'altra azione. Se, invece, la risorsa è disponibile, essa viene presa dall'entità per il tempo necessario e poi rilasciata.

Un'*attività* è un'operazione la cui durata è nota a priori all'inizio dell'esecuzione dell'attività stessa. Tale durata può essere una costante, data in input, calcolata in base ad altri eventi che accadono nel sistema oppure un valore aleatorio generato da una distribuzione di probabilità. Un *ritardo* è un periodo di tempo di durata indefinita in quanto determinata dalle condizioni stesse del sistema.

La simulazione è uno strumento sperimentale di analisi molto potente che, avvalendosi delle possibilità di calcolo dei sistemi di elaborazione informatici, permette di anticipare quello che sarà il comportamento del sistema reale e di valutarne la risposta in determinate circostanze, attraverso la costruzione del modello.

Negli ultimi tempi, le tecniche di simulazione si sono rivelate strumenti fondamentali nell'analisi e nella risoluzione di situazioni dinamiche complesse. La simulazione permette di rappresentare sistemi reali, anche complessi, tenendo conto delle sorgenti di incertezza, di testare criteri di gestione confrontando soluzioni alternative, di riprodurre il comportamento di un sistema in riferimento a situazioni che non sono sperimentabili direttamente.



*Figura 43 Processo decisionale: dalla realtà alle decisioni*

I principali approcci simulativi sono:

- Modellizzazione discreta, chiamata Discrete Event Simulation, in cui il tempo avanza quando nel sistema si verifica un evento;
- Modellizzazione continua, in cui il tempo avanza in modo continuo.

### **Discrete Event Simulation**

Nella Discrete Event Simulation il sistema è rappresentato, nella sua evoluzione e nel tempo, con variabili che cambiano istantaneamente il loro valore in ben definiti istanti di tempo, ovvero quelli in cui accadono gli eventi, appartenenti ad un insieme numerabile. E', quindi, necessario tenere traccia del tempo che procede attraverso un meccanismo di avanzamento del tempo per far passare quello simulato da un valore ad un altro. Simulation clock è la variabile che fornisce il valore attuale del tempo simulato

e per definire il suo avanzamento esistono due modi: al prossimo evento e ad incrementi prefissati.

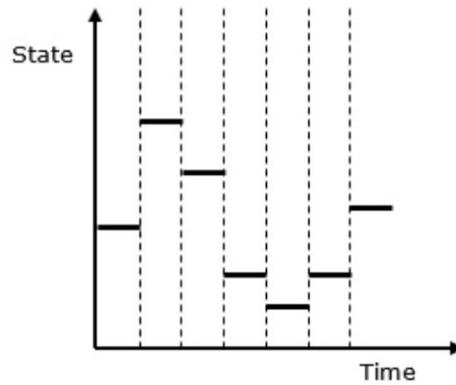


Figura 44 Esempio di comportamento della Discrete Event Simulation

### **Modellazione continua**

La modellazione continua si basa sulla System Dynamics ed è, quindi, incentrata sull'elaborazione di modelli matematici simulati tramite supporti informatici.

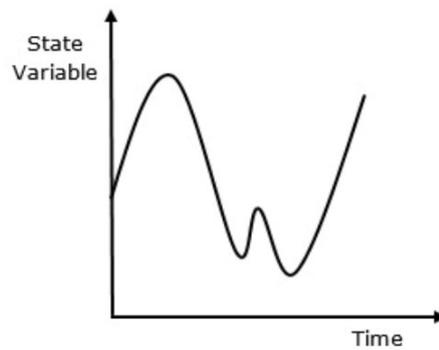


Figura 45 Esempio di comportamento della modellazione continua

Nel prossimo capitolo si andrà ad approfondire la letteratura relativa alla System Dynamics applicata ad un particolare studio di SCR.

### 3. Literature review

Uno step intermedio finalizzato all'individuazione dei fattori che influenzano la disponibilità di manodopera durante una disruption è stato quello di effettuare una literature review.

La prima parte del lavoro è stata orientata alla ricerca delle disruption; ciò è avvenuto attraverso l'approfondimento degli articoli presenti nella letteratura nel periodo compreso tra il 2012 ed il 2020.

Successivamente si è passati alla ricerca ed all'individuazione dei fattori relativi alle disruption di cui sopra che impattano sulla disponibilità di manodopera.

Si è proceduto poi con la classificazione degli articoli in base alla tipologia di disruption:

- Pandemie;
- Catastrofi naturali.

Infine sono stati analizzati due modelli di simulazione relativi ad uno scenario di pandemia.

#### 3.1. Ricerca delle variabili e delle connessioni causali

##### 3.1.1. Pandemie

Le pandemie (come l'H1N1, la SARS ed in ultimo il COVID-19) hanno conseguenze rilevanti in ogni settore, costringendo governi ed organismi a mettere in atto misure rigide per contenere la diffusione dei virus.

Ne conseguono inevitabili ripercussioni sulle supply chain e sulle scelte delle aziende le quali si trovano ad affrontare numerosi cambiamenti.

Aviso et al. (2018) in "Allocating human resources in organizations operating under crisis conditions: A fuzzy input-output optimization modeling framework" prendono in considerazione la situazione del personale sanitario in un ospedale durante una pandemia, specificando che gli operatori sanitari, in particolare medici ed infermieri,

sono in prima linea nella contrazione dei virus in periodi di pandemia. Ciò determina una riduzione transitoria della disponibilità della forza lavoro, durante la disruption, tale da non riuscire a garantire la continuità del servizio. Ne consegue una nuova assegnazione del personale in ospedale durante l'emergenza sanitaria.

Santos Joost (2020) in "Using Input-Output Analysis to Model the Impact of Pandemic Mitigation and Suppression Measures on the Workforce" spiega come la pandemia di COVID-19 abbia messo in discussione la capacità di molti sistemi sanitari ed abbia avuto impatti economici a cascata su settori interdipendenti della società globale. Infatti, le misure di mitigazione dell'azione del virus hanno prodotto assenteismo forzato a causa della chiusura di aziende e scuole, ma anche assenteismo non forzato, in quanto i dipendenti hanno contratto la malattia o hanno dovuto occuparsi dei familiari.

Huff Andrew et al. (2015) in "How resilient is the United States' food system to pandemics?" analizzano l'impatto di una grave pandemia sul sistema alimentare negli Usa. In questo lavoro di ricerca viene evidenziato che limitare la distruzione di infrastrutture critiche (elettricità, acqua e cibo) è importante per la sopravvivenza e la salute della società, in quanto la maggior parte delle risposte mediche e della salute pubblica ad una pandemia dipende da queste infrastrutture. Dichiarano, inoltre, che una delle maggiori sfide nella pianificazione della pandemia è lo sviluppo di sistemi come cibo, acqua e produzione di energia che siano abbastanza resilienti per continuare a funzionare durante una grave pandemia. L'assenteismo dei lavoratori crea una situazione potenzialmente instabile nel corso del manifestarsi della disruption, a causa delle interdipendenze critiche tra i sistemi multipli come pure mette a dura prova la produzione di prodotti di energia ed il funzionamento dei sistemi di trasporto.

Una proprietà fondamentale delle reti interdipendenti è che il fallimento o il degrado in un sistema può causare il fallimento di altri sistemi dipendenti.

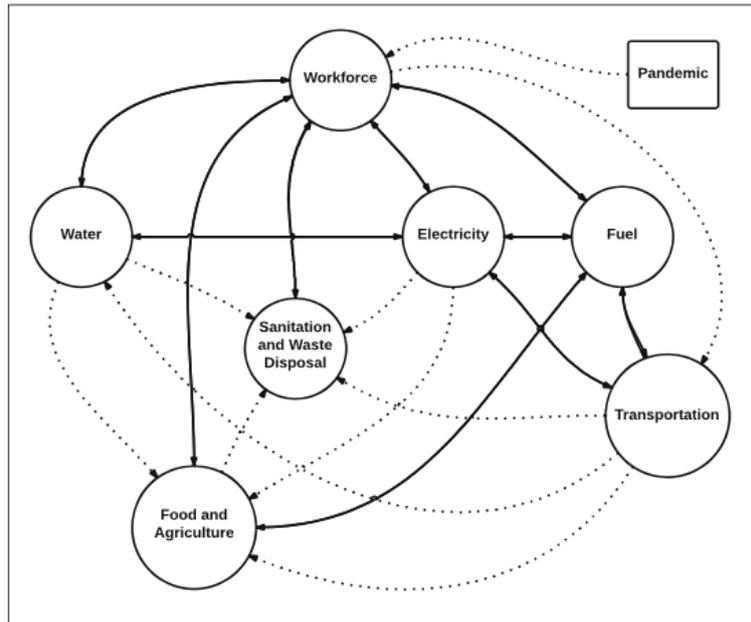


Figura 46 Interdipendenza tra pandemia, forza lavoro, sistemi necessari per il settore alimentare ed agricolo (Huff, Andrew, 2015)

Il sistema alimentare globale, così come la maggior parte degli altri sistemi vitali nella società moderna, dipende da cibo, acqua e produzione di energia. Senza una forza lavoro sana, le catene di approvvigionamento funzionano al di sotto della capacità ottimale o si arrestano del tutto. Dipendenti malati, cambiamenti nella domanda o carenze del livello di magazzino possono influenzare una vasta gamma di catene di approvvigionamento, comprese quelle di fornitura necessarie per combattere la pandemia.

Lo studio di Huff et al. ha dimostrato che una grave pandemia che porta alla riduzione della disponibilità di manodopera superiore al 25% può creare carenze alimentari significative e diffuse.

Amine El Haimar e Joost Santos (2014) in "Modeling Uncertainties in Workforce Disruptions from Influenza Pandemics Using Dynamic Input-Output Analysis" studiano l'impatto dell'H1N1 del 2009 sulla forza lavoro e stimano che l'assenteismo dei lavoratori sia compreso tra il 10% ed il 40%.

Essi dichiarano che, tradizionalmente, i vaccini sono stati adottati come mezzi efficaci per ridurre l'impatto di una pandemia. Tuttavia, la difficoltà di scoprire un vaccino pone

una grave limitazione alla sua efficacia. Pertanto, è necessario sviluppare strategie di mitigazione che includano misure sociali come chiusure di scuole e luoghi di lavoro.

| Papers | Variables   |
|--------|---|
| 1      | Absenteeism due to illness.   |
| 2      | -Absenteeism due to closure of schools and companies;<br>-Absenteeism due to illness;<br>-Absenteeism due to family duties. |
| 3      | Absenteeism due to illness.   |
| 4      | Absenteeism due to illness.   |

*Figura 47 Variabili che incidono sulla disponibilità di manodopera durante una pandemia*

1-> Aviso, K. B., Mayol, A. P., Promentilla, M. A. B., Santos, J. R., Tan, R. R., Ubando, A. T., & Yu, K. D. S. (2018). Allocating human resources in organizations operating under crisis conditions: A fuzzy input-output optimization modeling framework.

2-> Santos, Joost. "Using Input-Output Analysis to Model the Impact of Pandemic Mitigation and Suppression Measures on the Workforce." Sustainable Production and Consumption (2020).

3-> Huff, Andrew G., et al. "How resilient is the United States' food system to pandemics?" Journal of Environmental Studies and Sciences 5.3 (2015): 337-347.

4-> Haimar, Amine El, and Joost R. Santos. "Modeling Uncertainties in Workforce Disruptions from Influenza Pandemics Using Dynamic Input-Output Analysis." Risk Analysis 34.3 (2014): 401-415.

### 3.1.2. Catastrofi naturali ed eventi meteorologici avversi

Altra categoria di disruption è quella delle catastrofi naturali e degli eventi meteorologici avversi che comprendono:

- terremoti;
- tsunami;
- uragani;
- alluvioni;
- tempeste;
- eruzioni del vulcano di fango.

Le catastrofi naturali che si sono abbattute sul nostro Pianeta, oltre a provocare la perdita di vite umane, rappresentano una grande minaccia per le supply chain ed impattano negativamente anche sull'attività economica con conseguenze a breve ed a lungo termine.

Proprio per questo motivo, nel 2019 il World Economic Forum ha inserito i rischi climatici all'interno di quattro dei cinque principali rischi globali. (*Willis Towers Watson, 7 novembre 2019*)

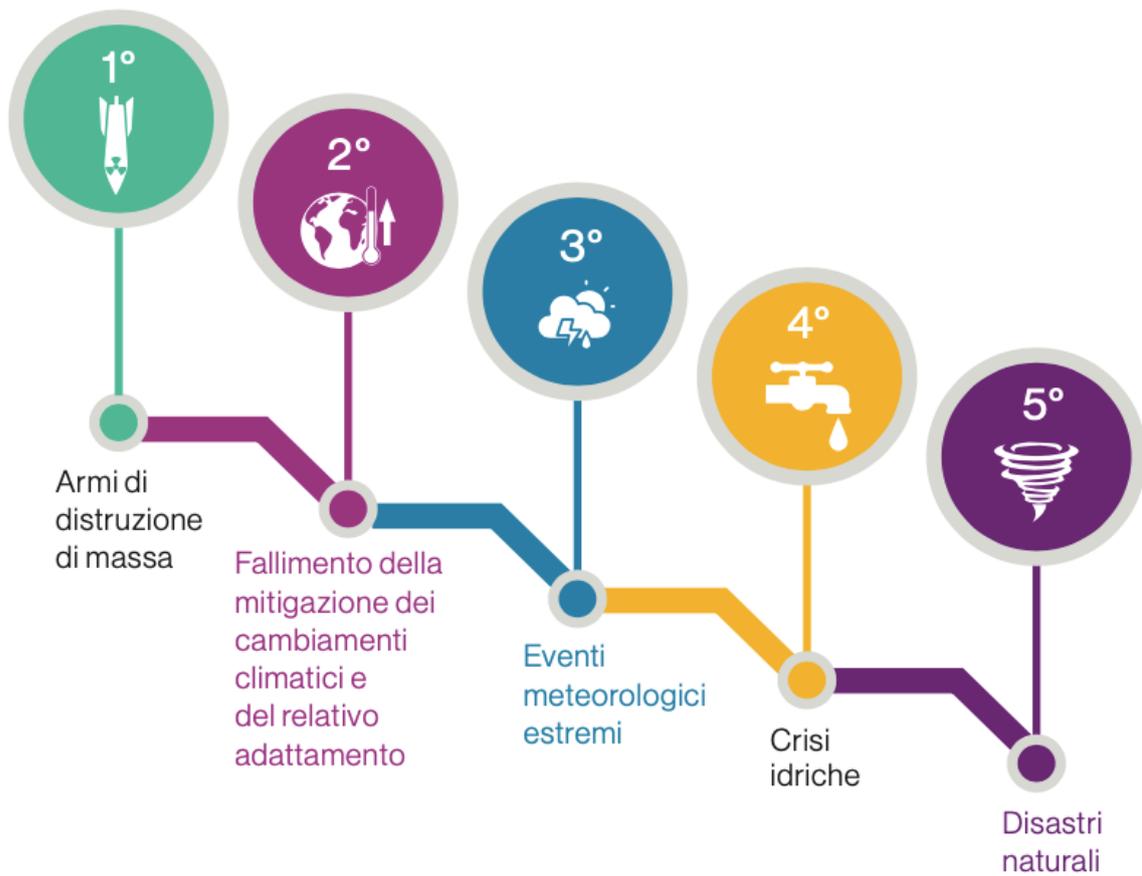


Figura 48 World Economic Forum 2015: principali 5 rischi globali

E', quindi, necessario promuovere una cultura globale della prevenzione delle catastrofi, attraverso azioni preventive, di mitigazione del rischio e di prontezza nella gestione dei danni.



Figura 49 Effetti del cambiamento climatico su macro e micro livelli

Cameron MacKenzie et al. (2012) in “Measuring changes in international production from a disruption” approfondiscono il tema del terremoto e dello tsunami che hanno colpito il Giappone l’11 Marzo 2011. Ciò ha causato perdite di vite umane, e quindi anche di lavoratori, influenzando negativamente le performances industriali con dei ritardi nella supply chain.

Kachali et al. (2015) in “Industry sector recovery following the Canterbury earthquakes” descrivono gli impatti del terremoto del 22 Febbraio 2011 a Canterbury in Nuova Zelanda sulle organizzazioni, soffermandosi sul fatto che alcune di esse non riaprono dopo il terremoto ed altre lottano per sopravvivere ma poi sono costrette a chiudere.

Kondo Ayako (2018) in “The effects of supply chain disruptions caused by the Great East Japan Earthquake on workers” analizza il terremoto in Giappone dell’11 Marzo 2011, evidenziando che esso ha colpito non solo i lavoratori locali impiegati negli stabilimenti direttamente danneggiati, ma anche quelli dei loro partners commerciali attraverso interruzioni della catena di approvvigionamento. Si sono verificate, inoltre, entro i 18 mesi dal terremoto, una sospensione temporanea del lavoro come pure una riduzione

dell'orario lavorativo e si è assistito alla mobilità del personale in settori meno colpiti dalla disruption.

Higuchi Yoshio et al. (2012) in "The impact of the Great East Japan Earthquake on the labor market-need to resolve the employment mismatch in the disaster-stricken areas" studiano l'impatto del terremoto in Giappone focalizzandosi sulla disponibilità di manodopera. Mettono in luce che la situazione occupazionale nelle aree colpite da disastri è generalmente grave, in quanto il numero di candidati per i posti di lavoro è superiore alle offerte disponibili. Fa eccezione a quanto detto sopra l'aumento delle posizioni lavorative legate alla ricostruzione post-terremoto e alla ripresa della produzione nell'industria manifatturiera. Nonostante vi sia un gran numero di offerte di lavoro per persone con qualifiche e competenze relative a lavori professionali e tecnici dell'edilizia e dell'ingegneria civile, c'è carenza di candidati compatibili con quelle abilità. Inoltre fino a sei mesi post-sisma si assiste ad una riduzione temporanea dell'orario di lavoro a causa dell'impatto della disruption.

Kirchberger Martina (2017) in "Natural disasters and labor markets" punta a far comprendere gli effetti di shock distruttivi su larga scala che impattano sui mercati del lavoro nei paesi a basso e medio reddito. In particolare fa riferimento al terremoto in Indonesia del 27 Maggio 2006, che ha causato feriti e morti facendo diminuire sia la domanda che l'offerta di lavoro. Inoltre si è verificata una minore disponibilità di manodopera nel settore agricolo, in quanto i lavoratori hanno preferito spostarsi verso il settore delle costruzioni, perché offriva maggiori possibilità di lavoro legate alla ricostruzione post-sisma.

Grinberger e Peleg Samuels (2018) in "Modeling the labor market in the aftermath of a disaster: Two perspectives" presentano due prospettive opposte del mercato del lavoro dopo una disruption (uragano o terremoto), accomunate da una riduzione immediata dell'occupazione.

Nel primo caso la manodopera è negoziabile ed i prodotti sono rigidi, mentre nel secondo caso la manodopera è immobile ed i prodotti sono negoziabili.

Considerando la prima ipotesi, in risposta alla domanda in calo, i lavoratori sono spinti a trovare soluzioni lavorative al di fuori dell'area colpita dalla disruption, il che significa

che i tassi di occupazione rimangono elevati a discapito, però, dell'occupazione locale che precipita.

La seconda ipotesi porta il sistema a ritornare al suo percorso di crescita pre-disruption e ciò comporta che i lavoratori assorbano il processo di ricostruzione.

Yaseen Qazi Muhammad et al. (2020) in "Dynamic inoperability input-output modeling for economic losses estimation in industries during flooding" evidenziano come le alluvioni sconvolgano le organizzazioni e le industrie causando assenteismo della forza lavoro.

Poiché la manodopera è direttamente coinvolta nel funzionamento delle imprese, il suo assenteismo può causare riduzione della produzione che si traduce in perdite finanziarie dei settori industriali.

Rodriguez-Oreggia Eduardo (2013) in "Hurricanes and labor market outcomes: Evidence for Mexico" analizza le conseguenze degli uragani in Messico dal 2000 al 2011 relativamente all'occupazione per livello di competenze ed alla mobilità dei lavoratori.

In particolare si assiste ad uno spostamento dei lavoratori dal settore agricolo ad uno meno colpito dalla disruption con la conseguenza che i lavoratori che non hanno possedimenti terrieri sono meno sensibili alle disruption, poiché possono facilmente migrare in altri luoghi e trovare un nuovo lavoro. Inoltre nella zona colpita da catastrofe naturale si registra un calo dell'occupazione contrariamente a ciò che avviene nelle zone limitrofe.

Relativamente all'occupazione per livello di competenze, c'è una richiesta maggiore di manodopera meno qualificata destinata alla ricostruzione rispetto a quella altamente istruita.

Chen et al. (2019) in "Building resilience and managing post-disruption supply chain recovery: Lessons from the information and communication technology industry" sostengono che negli ultimi anni le perturbazioni locali e globali hanno avuto effetti negativi sulle prestazioni aziendali. Ciò è maggiormente evidente per le imprese che hanno lunghe, complesse e globali supply chain. La gestione delle perturbazioni e dei suoi effetti è, pertanto, diventata un obiettivo chiave per le imprese.

Gli autori affermano che un efficace processo di gestione post-interruzione influisca direttamente sulla reale capacità di recupero da interruzioni improvvise e gravi delle imprese.

E' necessario, quindi, riconfigurare le risorse (forza lavoro) e le infrastrutture durante una disruption per garantire la continuità del processo. Inoltre è importante creare nuovi team di risposta alla disruption e nuovi processi e strumenti per aumentare la resilienza dell'azienda.

Fitrianto e Hadi (2012) in "Supply chain risk management in shrimp industry before and during mud volcano disaster: an initial concept" mirano ad analizzare la gestione del rischio della catena di approvvigionamento a supporto dell'industria dei gamberetti prima e durante l'eruzione del vulcano di fango a Sidoarjo in Indonesia.

Questa tipologia di business ha un ruolo importante per il distretto di Sidoarjo in termini di contributo economico. È importante, quindi, conoscere i rischi ed imparare a gestirli per evitare la perdita di posti di lavoro da parte di allevatori di gamberetti, di ambulanti e di commercianti a seguito della disruption.

Sargut e Lian Qi (2012) in "Analysis of a two-party supply chain with random disruptions" esaminano i fattori che intervengono nella disponibilità di manodopera prendendo in considerazione le tempeste invernali all'inizio del 2010 nelle regioni del Nord Atlantico e del Nord Est degli Stati Uniti. A causa di questa tipologia di disruption i lavoratori sono costretti a rimanere a casa per interruzione o chiusura di strade.

Esistono, inoltre, fattori di rilevanza minore che impattano sulla disponibilità di manodopera come sottolineano Hassani et al. (2020) in "Real-time personnel rescheduling after a minor disruption in the retail industry" che consistono in ritardi o uscite in anticipo del lavoratore relativamente al suo turno di lavoro a causa di imprevisti.

| Papers | Variables  |
|--------|--|
| 1      | Deaths.  |
| 2      | -Job losses;<br>-Workers mobility.   |
| 3      | -Temporary stop of work;<br>-Reduction of working hours;<br>-Workers mobility. |
| 4      | -Decline in employment;<br>-Reduction of working hours.                        |
| 5      | -Injured;<br>-Deaths;<br>-Workers mobility.                                    |
| 6      | -Decline in employment.  |
| 7      | -Workers mobility;<br>-Decline in employment.                                  |
| 8      | -New reconstruction team.  |
| 9      | Job losses.  |
| 10     | Road outages and closures.   |
| 11     | Delays or early departures due to unexpected.                                  |

*Figura 50 Variabili che incidono sulla disponibilità di manodopera durante una catastrofe naturale o evento meteorologico avverso*

1-> MacKenzie, Cameron A., Joost R. Santos, and Kash Barker. "Measuring changes in international production from a disruption: Case study of the Japanese earthquake and tsunamis." *International Journal of Production Economics* 138.2 (2012): 293-302.

2-> Kachali, H., et al. "Industry sector recovery following the Canterbury earthquakes." *International Journal of Disaster Risk Reduction* 12 (2015): 42-52.

3-> Kondo, Ayako. "The effects of supply chain disruptions caused by the Great East Japan Earthquake on workers." *Japan and the World Economy* 47 (2018): 40-50.

4-> Higuchi, Yoshio, et al. "The impact of the Great East Japan Earthquake on the labor market—need to resolve the employment mismatch in the disaster-stricken areas." *Japan Labor Review* 9.4 (2012): 4-21.

5-> Kirchberger, Martina. "Natural disasters and labor markets." *Journal of Development Economics* 125 (2017): 40-58.

6-> Grinberger, A. Yair, and Peleg Samuels. "Modeling the labor market in the aftermath of a disaster: Two perspectives." *International journal of disaster risk reduction* 31 (2018): 419-434.

7-> Rodríguez-Oreggia, Eduardo. "Hurricanes and labor market outcomes: Evidence for Mexico." *Global environmental change* 23.1 (2013): 351-359.

8-> Chen, Hsi Yueh, Ajay Das, and Dmitry Ivanov. "Building resilience and managing post-disruption supply chain recovery: Lessons from the information and communication technology industry." *International Journal of Information Management* 49 (2019): 330-342.

9-> Fitrianto, Achmad Room, and Suryadi Hadi. "Supply chain risk management in shrimp industry before and during mud volcano disaster: an initial concept." *Procedia-Social and Behavioral Sciences* 65 (2012): 427-435.

10-> Sargut, F. Zeynep, and Lian Qi. "Analysis of a two-party supply chain with random disruptions." *Operations Research Letters* 40.2 (2012): 114-122.

11-> Hassani, Rachid, Guy Desaulniers, and Issmail Elhallaoui. "Real-time personnel re-scheduling after a minor disruption in the retail industry." *Computers & Operations Research* (2020): 104952

### 3.2. Modelli di simulazione

Per studiare cosa succede ad una SC durante e subito dopo una disruption è utile ricorrere a modelli di simulazione.

In particolare se ne analizzeranno due relativi alle conseguenze di una pandemia: il primo caso riguarda il sistema alimentare statunitense ed il secondo l'inoperabilità e le perdite economiche.

#### 3.2.1. Primo modello di simulazione

Huff, Andrew G., et al. per comprendere l'effetto dell'assenteismo dei lavoratori sul sistema alimentare statunitense hanno creato un modello di simulazione in cui il flusso di cibo passa attraverso un sistema formato dalle seguenti fasi:

- aziende agricole;
- lavorazione;
- distribuzione;
- vendita al dettaglio;
- consumatore.

Quando il cibo è acquistato al dettaglio, viene avviata una catena di comunicazione: i venditori al dettaglio ordinano il cibo dai distributori, questi ultimi dai trasformatori che, a loro volta, si riforniscono dalle aziende agricole. Il trasporto fa sì che il cibo passi da una fase a quella immediatamente successiva.

Il modello include tutti i componenti minimi necessari per il funzionamento del sistema alimentare: comunicazione, elettricità, dipendenti, produzione in tutte le fasi, trasporto, acqua e rifiuti.

Esso considera la quantità totale di cibo disponibile nelle diverse fasi della filiera produttiva intanto che il cibo passa attraverso essa. L'aspetto interessante è che la capacità di produrre, elaborare o trasportare cibo in ogni fase dipende direttamente dalla disponibilità di manodopera.

Ogni esecuzione del modello copre un periodo di tempo pari a 800 giorni.

Si considera una pandemia della durata di 500 giorni, rappresentata da tre ondate di malattia (e assenteismo associato), ciascuna della durata di 166 giorni (Figura sottostante).

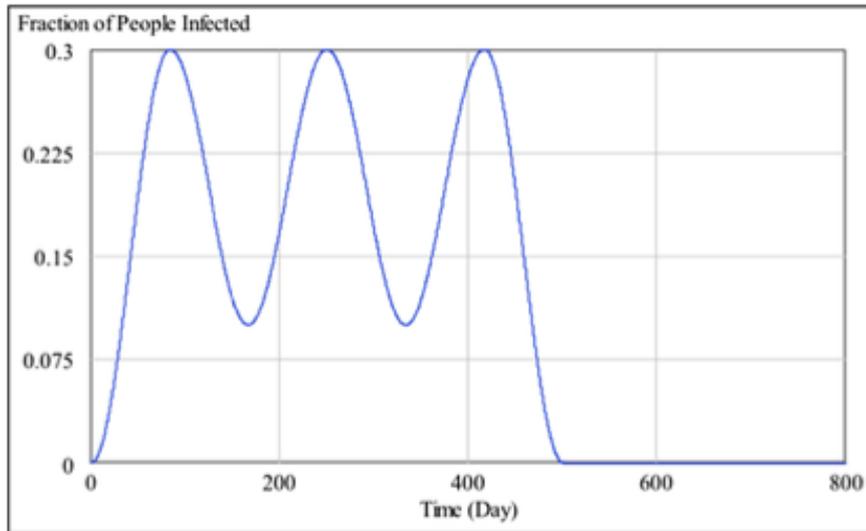


Figura 51 Frazione di persone infette durante le tre ondate di pandemia (Huff, Andrew G., et al., 2015)

Le simulazioni vengono fatte anche nei 300 giorni successivi alla fine della pandemia per osservare cosa sarebbe accaduto al sistema alimentare dopo la disruption.

Ogni fase è caratterizzata da alcuni parametri chiave:

- la quantità di cibo contenuto nelle scorte;
- la sensibilità del tasso di produzione all'assenteismo dei lavoratori;
- un tasso relativo al cibo alterato (espresso come costante di tempo);
- la sensibilità del tempo di trasporto all'assenteismo dei lavoratori.

Di particolare importanza è il fatto che la riduzione della funzione per assenteismo può non essere semplicemente proporzionale alla riduzione della manodopera. Ciascun sistema di produzione e trasporto nel modello ha una dipendenza dalla legge di potere della disponibilità di manodopera (Figura sottostante).

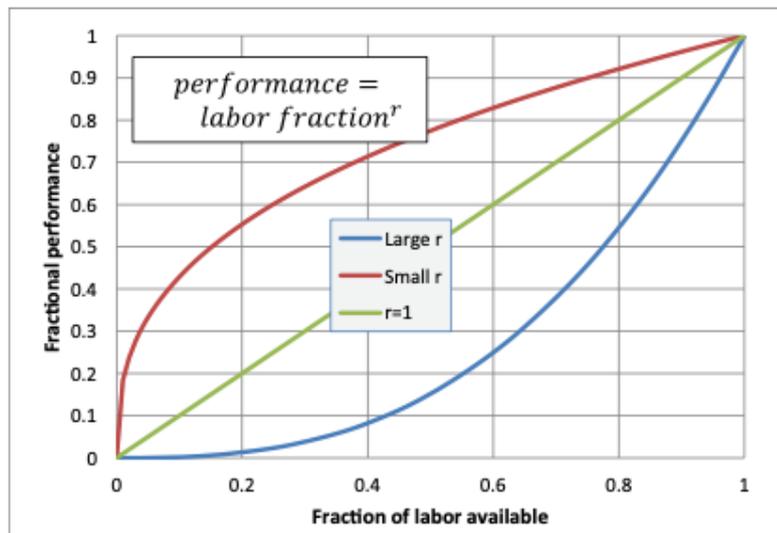


Figura 52 Relazione tra manodopera disponibile e performance (Huff, Andrew G. et al., 2015)

Alcune parti del sistema possono avere la capacità di rimediare ad una riduzione parziale della manodopera, mantenendo le prestazioni più vicine alla normalità di quanto suggerirebbe la riduzione della manodopera stessa. Al contrario in altre parti del sistema, una riduzione della manodopera mette in moto una riduzione sproporzionatamente maggiore delle prestazioni. Per inserire nel modello questo concetto Huff, Andrew G. et al. hanno assunto la seguente relazione:

- $r=1$  se la riduzione delle prestazioni è in semplice proporzione alla riduzione della manodopera;
- $r < 1$  se la riduzione delle prestazioni è inferiore alla riduzione della manodopera;
- $r > 1$  se la riduzione delle prestazioni è maggiore della riduzione della manodopera.

Inoltre bisogna considerare che le reti di trasporto che collegano le principali fasi del sistema alimentare sono soggette ad interruzioni dovute ad un diffuso assenteismo, sia a causa della carenza di manodopera agricola, di camionisti e di operatori di magazzino sia a causa di qualsiasi interruzione nella disponibilità di sistemi interdipendenti (combustibile, elettricità, acqua, servizi igienico-sanitari e smaltimento dei rifiuti).

Il modello include una gamma di valori per la capacità di conservazione degli alimenti in ogni fase del sistema alimentare pari ad un intervallo di 10-150 giorni di approvvigionamento alimentare nelle aziende agricole, 4-28 giorni di immagazzinamento nella lavorazione e 2-7 giorni di immagazzinamento per la distribuzione, per la vendita al dettaglio e per il consumatore. Poiché il cibo è soggetto a deterioramento in ogni fase del sistema, la perdita è inclusa nel modello come un processo di decadimento esponenziale, utilizzando valori selezionati casualmente per tassi di perdita di aziende agricole, di lavorazione, di distribuzione e di vendita al dettaglio compresi tra 0,02 a 0,20 al giorno e un tasso di perdita del consumatore compreso tra 0,07 e 0,20 al giorno.

Il deficit nella quantità di cibo che raggiunge i consumatori (cioè la differenza tra la domanda dei consumatori e l'offerta di cibo ai consumatori) è stato calcolato quotidianamente nel corso di ciascuna simulazione. Il deficit giornaliero potrebbe variare dallo 0%, quando il fabbisogno alimentare giornaliero è stato pienamente soddisfatto, al 100% se quel giorno non ci fosse la consegna di cibo ai consumatori. I deficit di ogni giorno sono stati sommati negli 800 giorni per calcolare il numero totale di giorni in mancanza di cibo. Un giorno in assenza di cibo equivale a una persona che non mangia per un giorno. La somma dei giorni in mancanza di cibo in un intero periodo è una misura aggregata dell'incapacità del sistema di soddisfare la domanda alimentare della popolazione.

Tuttavia, l'offerta di cibo diminuisce drasticamente con successive ondate di infezione, causando una significativa carenza di cibo e un aumento dei giorni cumulativi di fame e della frazione della popolazione che soffre di fame. In alcune sessioni di simulazione, i deficit alimentari erano continui da un'ondata di infezione all'altra.

Questo studio ha rilevato che il sistema alimentare degli Stati Uniti non resiste al livello previsto di assenteismo dei lavoratori (20-40%) durante una pandemia (DHS 2006; FFIEC 2007; OSHA 2007).

Le malattie infettive che distruggono rapidamente la popolazione statunitense in meno di 30 giorni probabilmente non avranno un grande impatto sulle catene di approvvigionamento e le malattie che si sostengono moderatamente nella popolazione

per periodi più lunghi avranno probabilmente maggiori conseguenze in termini di assenteismo dei lavoratori.

Ci sono molte opportunità per la ricerca futura per migliorare la resilienza del sistema alimentare alle pandemie. In teoria, ai lavoratori dei trasporti e del sistema alimentare potrebbero essere forniti dispositivi di protezione personale per ridurre il rischio di trasmissione di malattie. Studi futuri potrebbero esaminare la fattibilità della formazione del personale e della distribuzione di dispositivi di protezione individuale ai dipendenti dei sistemi vitali, cercare di determinare quali sistemi di trasporto di emergenza alternativi esistono, quali capacità hanno e stabilire se questi tipi di politiche sarebbero accettabili per i lavoratori. Un'altra possibile soluzione per rendere più resiliente il funzionamento dei sistemi alimentari e di trasporto è disporre di una forza lavoro di riserva di emergenza per sostituire i lavoratori assenti critici. La ricerca dovrebbe essere condotta per identificare e quantificare il numero di posizioni fondamentali per tipo in tutti i sistemi interdipendenti e classificare la loro criticità per il funzionamento dei sistemi. In questo modo le posizioni più determinanti possono essere sostituite per prime. Sulla base di questa analisi, è necessario elaborare piani di formazione per determinare quanti giorni sono necessari per istruire i lavoratori sostitutivi. Durante una pandemia, molti sistemi dovranno affrontare carenze di manodopera e si dovrebbe, quindi, condurre una ricerca per determinare e classificare le competenze trasferibili nella forza lavoro. I lavoratori, pertanto, potranno essere assegnati a posizioni con una formazione minima ma con massima efficienza. Se questi studi venissero applicati potrebbero aumentare la resilienza del sistema alimentare (Huff, Andrew G., 2015).

### 3.2.2. Secondo modello di simulazione

Il framework di simulazione di Haimar, Amine e Joost R. Santos è stato creato per simulare, studiare e analizzare il comportamento dello sviluppo pandemico nel tempo, misurato in termini di inoperabilità e di conseguenze di perdite economiche.

Esso si basa sulla combinazione di un modello pandemico e di un modello di inoperabilità variabile nel tempo.

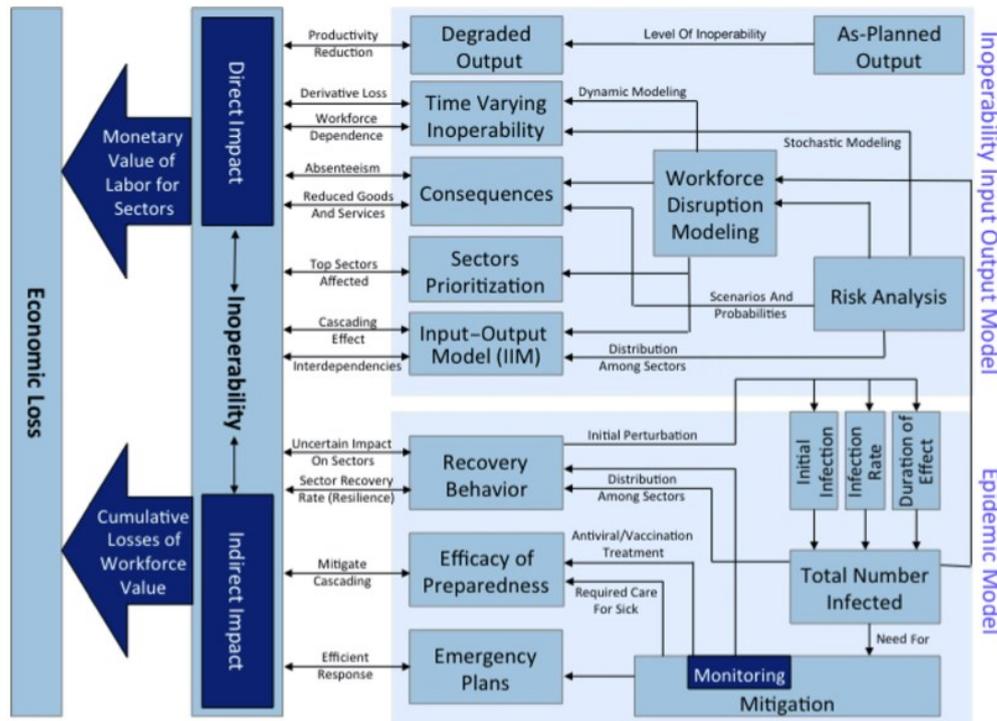


Figura 53 Framework input-output per la valutazione dell'impatto economico di una pandemia (Haimar, Amine El, e Joost R. Santos, 2014)

Il framework di modellazione pandemica consente di valutare la perturbazione di partenza in termini di infezione iniziale, tasso di infezione e durata dell'effetto. Questi parametri aiutano ad ottenere maggiori informazioni sul numero totale di persone infette e sul comportamento di recupero della popolazione. Quest'ultimo è influenzato da parametri specifici del settore come la perturbazione di partenza e la resilienza. I parametri sono basati su una simulazione generata da FluWorkLoss. Il software consente di effettuare modifiche di input come il numero previsto di giorni persi a causa dell'assenteismo del lavoratore dovuto alla propria malattia o all'assistenza di un membro malato della famiglia. Il software può anche generare illustrazioni grafiche dei giorni totali persi in base all'entità e alla durata delle ondate pandemiche. Dopo aver compreso e monitorato il contesto della disruption, ha luogo un processo di mitigazione per fornire una preparazione efficiente e piani di emergenza sotto forma di trattamento antivirale e di cure necessarie per i malati. Tale processo contribuirà a mitigare l'effetto a cascata di inoperabilità a causa delle interdipendenze tra i settori.

Il modello dinamico di inoperabilità input-output (DIIM) funge da strumento per valutare l'interruzione della forza lavoro, per eseguire l'analisi dei rischi, per tener conto delle loro probabilità di accadimento e delle rispettive conseguenze.

In questo articolo il DIIM definisce il livello di inoperabilità come la differenza percentuale tra la produzione effettiva (degradata) e quella pianificata causata da un alto tasso di assenteismo dovuto alla pandemia. Inoltre, il DIIM prende in considerazione le interdipendenze tra i settori ed il comportamento variabile nel tempo dell'inoperabilità. Nell'estensione DIIM presentata in questo articolo Haimar, Amine El, e Joost R. Santos introducono funzioni di inoperabilità probabilistiche specifiche del settore per valutare anche le incertezze nella propagazione degli effetti pandemici nel tempo. Inoltre, i settori diventano inoperabili a causa della loro dipendenza dalla forza lavoro, che crea ulteriormente un effetto a catena che si propaga ad altri settori correlati. Ad esempio, un settore potrebbe non essere inizialmente colpito, ma diventare alla fine inutilizzabile a causa della sua dipendenza da un altro settore che sta già sperimentando un certo livello di inoperabilità. Pertanto, si riconoscono due tipi di effetti di inoperabilità:

- un effetto diretto implica che il settore diventa inutilizzabile a causa della propria incapacità di soddisfare la produzione pianificata per l'assenteismo della forza lavoro;

- un effetto indiretto si verifica a causa della dipendenza del settore da altri inutilizzabili.

Evidentemente, il valore di inoperabilità di un settore diventa il risultato dell'interazione di diversi fattori, inoperabilità iniziale, dipendenza da altri settori e tempo di recupero o resilienza. I valori di inoperabilità che ne derivano consentono di valutare l'entità della perdita economica in ogni settore, che stima il valore monetario del lavoro perso a causa della diminuzione della produzione di beni e servizi.

In questo articolo viene sviluppato un modello per introdurre un aspetto probabilistico della inoperabilità iniziale. Essa rappresenta una misura della percentuale di indisponibilità della forza lavoro nel momento in cui inizia la disruption. Poiché i settori hanno diverse caratteristiche della forza lavoro e differenti valori di resilienza, l'inoperabilità iniziale dei settori non dovrebbe avere valori uguali in risposta alla disruption.

L'inoperabilità iniziale non è necessariamente nota, ma può variare tra i valori minimo, massimo e più probabile per cui viene utilizzata una distribuzione triangolare per illustrare il suo aspetto probabilistico.

Il modello considera due ondate consecutive di malattia. La prima ondata inizia al tempo  $t = 0$  e termina al tempo  $t = 28$ , con un picco all'istante  $t = 20$ . La seconda ondata inizia all'istante  $t = 28$  e si conclude all'istante  $t = 42$ , con un valore di picco all'istante  $t = 35$ . Una volta passata la seconda ondata, il modello assume che la restante inoperabilità avrà una traiettoria di recupero basata sulla regolare formulazione DIIM mostrata nell'equazione sottostante rappresentante la perdita economica del settore  $i$  al tempo  $t$ :

$$loss_i = \frac{1}{52} * X_i * q_i(t)$$

*Equazione 12 Perdita economica del settore  $i$  al tempo  $t$*

Dove:

- $X_i$  rappresenta l'output del settore  $i$ ;

- $q_i(t)$  rappresenta l'inoperabilità del settore  $i$  al tempo  $t$ ;

-52 è il coefficiente numerico che rappresenta il numero di settimane annue ( $X_i$  viene misurata su un anno e l'unità di tempo utilizzata dal modello è in settimane).

Quindi, la perdita economica cumulativa viene calcolata nel periodo di tempo. Utilizzando i set di dati di inoperabilità (min, max, average, f4), si generano le metriche minima, massima, media e f4 per la perdita economica come segue:

$$loss\_min_i(t) = \frac{1}{52} * X_i * q\_min_i(t)$$

$$loss\_max_i(t) = \frac{1}{52} * X_i * q\_max_i(t)$$

$$loss\_avg_i(t) = \frac{1}{52} * X_i * q\_avg_i(t)$$

$$loss\_f4_i(t) = \frac{1}{52} * X_i * q\_f4_i(t)$$

*Equazione 13 Perdita economica utilizzando set di dati di inoperabilità (min, max, average, f4) (Haimar, Amil El, e Joost R. Santos, 2014)*

Esse possono essere impiegate, quindi, per classificare e tracciare i settori critici in termini di perdita economica decrescente.

Una disruption, come una pandemia, può influire negativamente sui settori economici in una determinata regione e causare gravi interruzioni operative, con conseguenti perdite economiche significative ed irreversibili. Tali effetti possono peggiorare se questi settori economici sono interdipendenti. L'entità di queste conseguenze può essere quantificata numericamente in termini di inoperabilità e di perdita economica le quali si basano sul contributo della forza lavoro alla produzione. (*Haimar, Amine El, and Joost R. Santos, 2014*).

Nel prossimo capitolo si utilizzerà la metodologia della System Dynamics per l'analisi di un caso studio.

## 4. Case study

Lo scopo della tesi è stato analizzare i fattori che intervengono nella disponibilità di manodopera durante una disruption e, quindi, effettuare uno studio della resilienza applicata ad un ambito della SC, attraverso la System Dynamics.

Si vanno ora ad eseguire nel dettaglio le prime quattro fasi di questa metodologia.

### 4.1. Identificazione del problema

La mancanza di manodopera è un problema serio e reale che si verifica generalmente durante o subito dopo una disruption e, quindi, va affrontato comprendendone bene le cause.

Fare un'analisi del genere è, altresì, importante per agire in maniera preventiva nel futuro nel momento in cui si presenta una disruption. In tal modo le interruzioni saranno minime o addirittura assenti e si limiteranno i danni economici.

L'esperienza insegna che negli ultimi anni le disruption sono sempre più frequenti, di ampia portata ed imprevedibili, impattano su chiunque ed in tutto il Pianeta, quindi, effettuare una loro analisi è un aspetto che non può essere più trascurato.

Oggi, infatti, i problemi si presentano in maniera veloce, mentre le SC impiegano più tempo per riprendersi. Il rischio è ancora maggiore, in quanto le catene di approvvigionamento sono sempre più interdipendenti, complesse, lunghe e con interi settori che dipendono da un singolo fornitore specializzato o da un numero limitato di fornitori specializzati. La globalizzazione delle SC, esplicita da una complessa combinazione di delocalizzazioni, esternalizzazioni, creazioni di reti globali di fornitura e distribuzione è uno dei fattori alla base della sempre maggiore vulnerabilità delle SC. Pertanto, è fondamentale gestire il rischio, ottimizzando le azioni per impedire le interruzioni della SC o per recuperare rapidamente la condizione ideale.

Per analizzare una SC è necessario adottare un approccio integrato e sistemico al fine di capire come una variazione in una parte del sistema inevitabilmente impatti su altre; ciò è dovuto al fatto che una SC è un sistema complesso in cui non è possibile isolare gli effetti. Occorre, quindi, individuare tutte le variabili in gioco ed allo stesso tempo valutare l'andamento di queste ultime in presenza di determinati rischi.



Figura 54 Agenti della SC

In un contesto del genere, la resilienza diventa un concetto fondamentale in quanto si sta sperimentando che saper reagire velocemente è più importante che saper prevedere accuratamente.

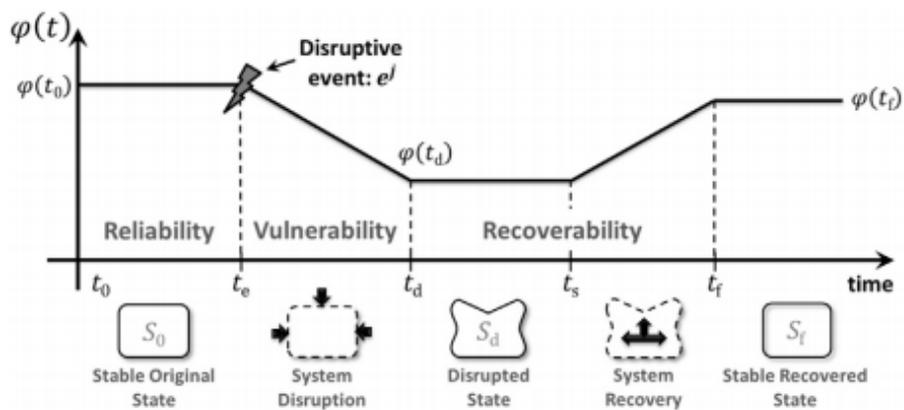


Figura 55 Evoluzione dello stato di un sistema resiliente in seguito ad una perturbazione (Seyedmohsen Hosseini, Kash Barker, Jose E. Ramirez-Marquez, 2015)

Si devono, pertanto, riconoscere i principali rischi di una SC:

- Carenza di manodopera;
- Distributori limitati nella loro capacità operativa e possibile interruzione della catena produttiva e di approvvigionamento;
- Fallimento di uno o più fornitori e difficoltà di identificarne e qualificarne di nuovi;
- Mancanza di disponibilità di materie prime, semilavorati e prodotti finiti.

Per quanto riguarda la carenza di manodopera dallo studio della letteratura e dall'analisi dei modelli di simulazione precedentemente esaminati relativi ad uno scenario di pandemia, si evince che i fattori che impattano su di essa durante una disruption sono riconducibili principalmente a due categorie:

-pandemie;

-catastrofi naturali o eventi meteorologici avversi.

I fattori che intervengono nella disponibilità di manodopera durante una pandemia sono i seguenti:

- Assenteismo per malattia contratta dal personale;
- Assenteismo del personale per occuparsi di familiari;
- Chiusure forzate di luoghi di lavoro e scuole.

Dall'analisi degli articoli è emerso, inoltre, che i fattori che intervengono nella disponibilità di manodopera durante una catastrofe naturale o evento meteorologico avverso sono i seguenti:

- morti;
- feriti;
- perdite di posti di lavoro;
- calo dell'occupazione;
- sospensione temporanea del lavoro;
- riduzione dell'orario lavorativo;
- mobilità del personale in settori meno colpiti dalla disruption;
- assenteismo dal lavoro per interruzione o chiusura di strade.

Esistono anche fattori di rilevanza minore che impattano sulla disponibilità di manodopera come sottolineano Hassani et al. (2020) in "Real-time personnel rescheduling after a minor disruption in the retail industry" che consistono in ritardi o uscite in anticipo del lavoratore relativamente al suo turno di lavoro a causa di imprevisti.

Inoltre dallo studio della letteratura della struttura di gestione generica di uno stock (*Sterman, John, 2000*) emerge che non sono trascurabili, per quanto riguarda la manodopera, le seguenti variabili:

- tasso di creazione di posti vacanti (VCR);
- tasso di licenziamento e di inattività (LQR);
- tasso di assunzione (HR);
- posti vacanti e tirocinanti (VT).

#### 4.2. Ipotesi dinamica

Alla luce di ciò che è emerso dallo studio effettuato, si è provveduto a riorganizzare tutti i fattori che intervengono nella disponibilità di manodopera durante una disruption in modo tale da poterli successivamente inserire in un diagramma causale.

I fattori ricompattati risultano essere i seguenti:

- ammalati;
- morti;
- lavoratori che si spostano in settori meno colpiti dalla disruption;
- feriti;
- lavoratori a casa;
- lavoratori in ritardo.

Si suppone che ci sia un ritardo tra la creazione di posti vacanti e l'assunzione; la manodopera viene incrementata dalle assunzioni e diminuita dal tasso di licenziamento e di inattività. Inoltre, all'aumentare del tasso di creazione di posti vacanti aumenteranno i posti vacanti ed i tirocinanti al di sopra di ciò che altrimenti sarebbe stato.

I principali fattori individuati, sopra elencati, influenzano nella stessa direzione il tasso di licenziamento e di inattività instaurando una relazione rinforzante, ovvero all'aumentare di un determinato fattore, aumenterà il tasso di licenziamento e di inattività più di quanto altrimenti sarebbe stato. Di conseguenza diminuirà la manodopera all'aumentare del tasso di licenziamento e di inattività.

In particolare, i lavoratori a casa hanno una relazione rinforzante con altri due fattori ovvero la necessità di occuparsi di familiari e l'interruzione o chiusura di strade. Infatti, all'aumentare della necessità di un lavoratore di prendersi cura di membri della famiglia, aumenteranno i lavoratori che si troveranno a casa, facendo incrementare il tasso di inattività. All'aumentare delle interruzioni o chiusure di strade, aumenteranno i lavoratori che resteranno a casa, perché impossibilitati a raggiungere il posto di lavoro.

I lavoratori in ritardo sul posto di lavoro si possono considerare un fattore di rilevanza minore, in quanto causano soltanto una breve interruzione. I lavoratori in ritardo sono collegati in modo rinforzante con il numero di imprevisti per ciascun lavoratore, in quanto all'aumentare di lavoratori che hanno imprevisti, aumenteranno i lavoratori che arriveranno in ritardo sul posto di lavoro.

### 4.3. Creazione del diagramma causale

Una volta definito il problema, si vanno a classificare gli elementi del sistema per grado di importanza.

| <b>Most important elements</b>                    | <b>Secondary important elements</b>           | <b>Tertiary important elements</b> |
|---|---|------------------------------------|
| Sick people                                       | Hiring Lag (HL)                               | Unexpected                         |
| Deaths  | Indicated Vacancy Creation (IVC)              |                                    |
| Injured   | Workers who are late                          |                                    |
| Workers at home                                   | Desired Vacancies and trainees (VT*)          |                                    |
| Workers moving in less affected by the disruption | Vacancies and trainees Adjustment Time (VTAT) |                                    |
| Vacancies and trainees (VT)                       | Desired Employees (E*)                        |                                    |
| Vacancy Creation Rate (VCR)                       | Employees Adjustment Time (EAT)               |                                    |
| Hiring Rate (HR)                                  | Expected Layoffs and quits Rate (ELQ)         |                                    |
| Layoffs and quits Rate (LQR)                      | Workers with family members to car for        |                                    |
| Adjustment for vacancies and trainees (AVT)       | Road outages and closures                     |                                    |
| Adjustment for Employees (AE)                     |   |                                    |
| Desired Hiring Rate (DHR)                         |   |                                    |

*Figura 56 Classificazione degli elementi del sistema per grado di importanza*

Le relazioni tra gli elementi, precedentemente trattate nell'ipotesi dinamica, vengono esplicitate attraverso il seguente diagramma causale:

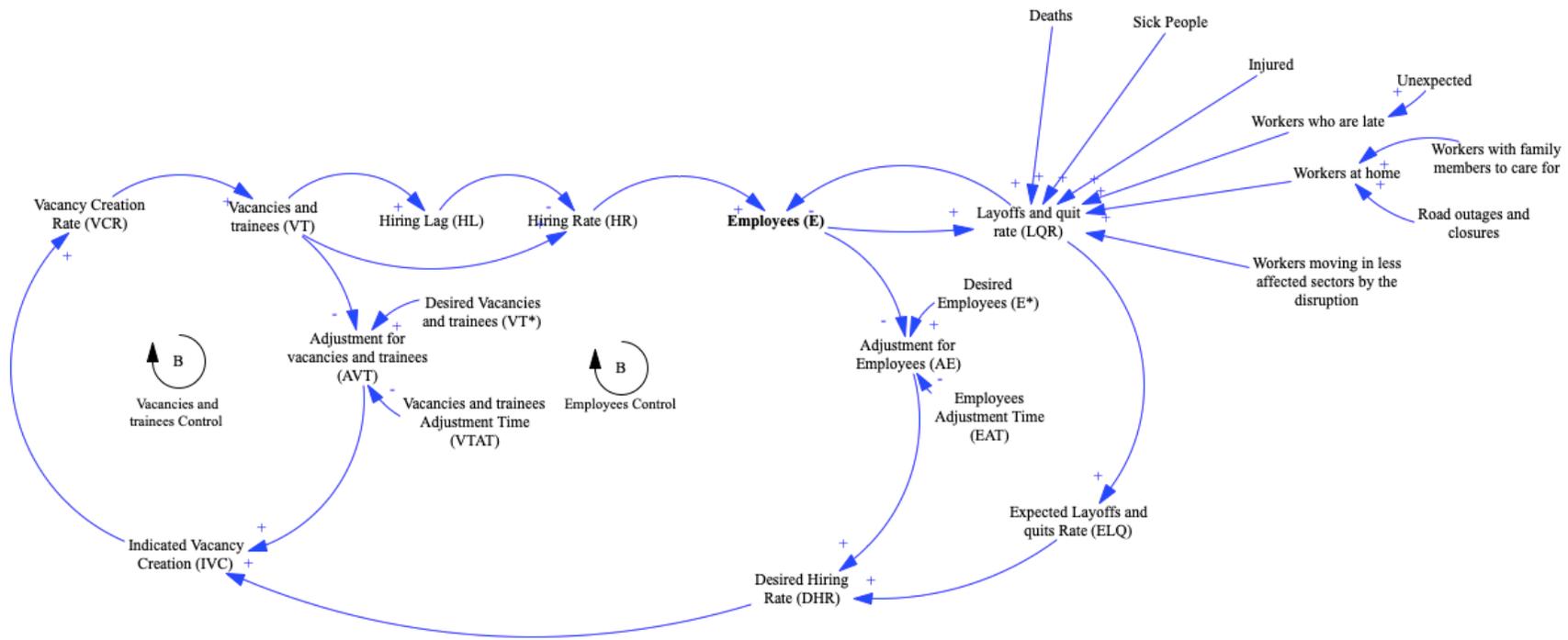


Figura 57 Diagramma causale

Con l'adeguamento dei posti vacanti e dei tirocinanti (AVT) e con l'adeguamento della manodopera (AE) si formano due loop controbilanciati (Vacancies and trainees Control e Employees Control) riguardanti rispettivamente il numero dei posti vacanti e tirocinanti nel primo caso e quello dei dipendenti nel secondo.

#### 4.4. Creazione del diagramma stock-flussi

Il problema della gestione e del controllo della manodopera può essere suddiviso in due parti:

- Struttura relativa ai dipendenti ed ai flussi del sistema;
- Regola decisionale utilizzata dai manager per controllare l'assunzione del personale.

Di seguito si andrà a studiare la struttura del diagramma stock-flussi per la gestione ed il controllo della manodopera e della sua disponibilità.

Le relazioni precedentemente espresse si vanno a tradurre in funzioni matematiche.

Lo stock da controllare in questo caso è la manodopera (E) calcolabile come la differenza tra il tasso di assunzione (HR) e quello di licenziamento e di inattività (LQR):

$$E = \text{INTEGRAL} (HR - LQR, E_{t_0})$$

*Equazione 14 Calcolo della manodopera (E)*

Il valore dei posti vacanti ed i tirocinanti (VT) è calcolabile come la differenza tra il tasso di creazione di posti vacanti (VCR) ed il tasso di assunzione (HR):

$$VT = \text{INTEGRAL} (VCR - HR, VT_{t_0})$$

*Equazione 15 Calcolo del numero dei posti vacanti e tirocinanti (VT)*

Il tasso di assunzione (HR) dipende dai posti vacanti e dai tirocinanti (VT) e dal ritardo medio di assunzione (HL):

$$HR = L(VT, HL)$$

*Equazione 16 Calcolo del tasso di assunzione (HR)*

Dove con L si indica una funzione che esprime il ritardo.

Il ritardo medio di assunzione (HL) può dipendere dai posti vacanti e dai tirocinanti (VT), da variabili endogene (X) e da variabili esogene (U):

$$HL = f(VT, X, U)$$

*Equazione 17 Calcolo del ritardo medio di assunzione (HL)*

Inoltre, è il management che deve scegliere il tasso di creazione di posti vacanti (VCR) per mantenere la manodopera quanto più possibile vicina ad un valore obiettivo. I manager, infatti, tendono a ridurre qualsiasi discrepanza tra il valore di manodopera desiderata e quella effettiva.

Il tasso di creazione di posti vacanti (VCR), che nella maggior parte dei casi reali non è negativo, può essere calcolato nel seguente modo:

$$VCR = MAX(0, IVC)$$

*Equazione 18 Calcolo del tasso di creazione di posti vacanti (VCR)*

Dove IVC è il tasso di creazione dei posti vacanti indicato che può essere calcolato sommando il tasso di assunzione desiderato (DHR) e l'adeguamento per i posti vacanti ed i tirocinanti (AVT):

$$IVC = DHR + AVT$$

*Equazione 19 Calcolo del tasso di creazione di posti vacanti indicato (IVC)*

L'adeguamento per i posti vacanti ed i tirocinanti (AVT) e l'adeguamento per la manodopera (AE) si calcolano in modo analogo:

$$AVT = \frac{(VT^* - VT)}{VTAT}$$

*Equazione 20 Calcolo dell'adeguamento per i posti vacanti ed i tirocinanti (AVT)*

Dove:

-VT\* è il valore desiderato dei posti vacanti e dei tirocinanti;

-VTAT è il tempo di regolazione dei posti vacanti e dei tirocinanti.

L'adeguamento per la manodopera (AE) è pari a:

$$AE = \frac{(E^* - E)}{EAT}$$

*Equazione 21 Calcolo dell'adeguamento per la manodopera (AE)*

Dove:

-E\* è il valore corrispondente alla manodopera desiderata;

-EAT è il tempo di regolazione della manodopera.

Infine l'equazione per il tasso di assunzione desiderato (DHR) contempla il fatto che esso rimanga non negativo anche quando c'è un surplus di dipendenti:

$$DHR = \text{MAX}(0, ELQ + AE)$$

*Equazione 22 Calcolo del tasso di assunzione desiderato (DHR)*

Dove ELQ è il tasso di licenziamento ed inattività previsto.

Il diagramma stock-flussi per la gestione ed il controllo della manodopera in presenza di una disruption risulta essere il seguente:

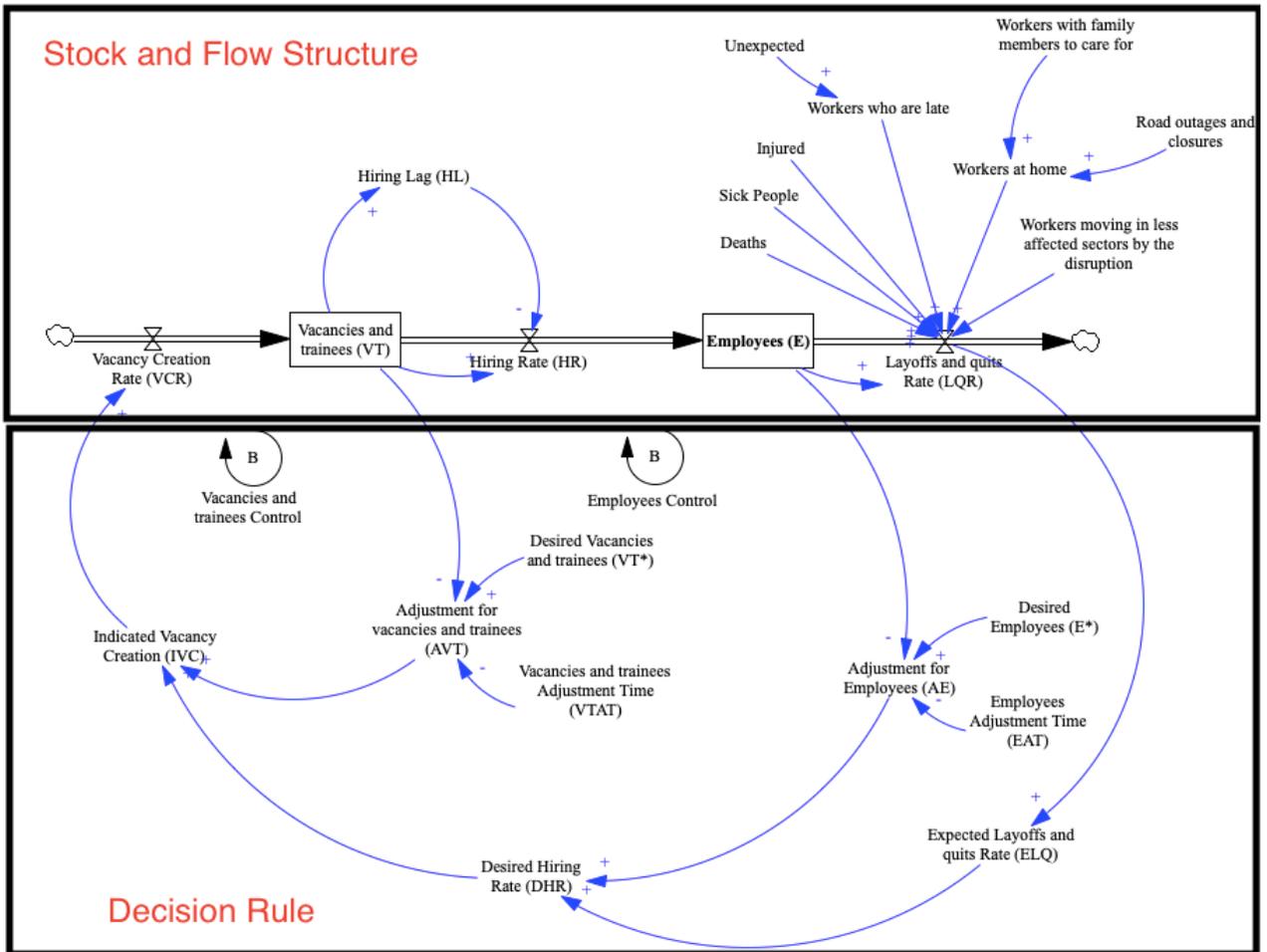


Figura 58 Diagramma stock-flussi per la manodopera in presenza di una disruption

## Conclusioni

Il lavoro è stato orientato all'applicazione degli strumenti della System Dynamics per analizzare la SCR relativamente alla disponibilità di manodopera durante una disruption.

In un ecosistema economico globale profondamente interconnesso, caratterizzato da SC molto estese e complesse, qualunque evento non pianificato rappresenta ormai un elemento di potenziale disruption che può portare ad ingenti perdite economiche, colpendo le varie parti del sistema SC.

A tal proposito è stato preso in esame il problema della mancanza di manodopera che si presenta durante o subito dopo una disruption.

Fondamentale è stato individuare le variabili e le relazioni presenti tra esse per comprendere cosa determina il cambiamento del livello di manodopera ed, in particolare, cosa può portare alla sua non disponibilità in un determinato istante temporale.

A tale scopo sono stati utilizzati il diagramma causale ed il diagramma stock-flussi, che hanno evidenziato principalmente che il livello di manodopera disponibile decrementa all'aumentare del tasso di inattività e di licenziamento e che quest'ultimo dipende da fattori strettamente connessi alla tipologia di disruption, quali: morti, malati, feriti, lavoratori rimasti a casa in quanto impossibilitati a raggiungere il posto di lavoro, lavoratori che decidono di cambiare occupazione spostandosi in altro settore meno colpito dalla disruption ed, in ultima battuta, dipendenti che sono in ritardo per il turno di lavoro a causa di imprevisti.

Si è riscontrata, inoltre, l'importanza del management che con le sue decisioni, può utilizzare un loop controbilanciante in grado di controllare il livello di manodopera tramite un suo tempestivo adeguamento in base alla necessità.

Lo studio sviluppato può, quindi, considerarsi un primo passo verso un'attenzione sempre maggiore alle disruption ed al loro impatto sulle SC, per far sì che nell'immediato futuro queste ultime siano sempre più resilienti e, pertanto, capaci di reagire rapidamente e di adattarsi alle nuove situazioni, limitando le interruzioni ed il loro impatto.

## Bibliografia

- A. Z. Rose, *Economic Resilience to Disasters*, Los Angeles (CA):Published Articles & Papers, 2009
- Ates, Aylin, and Umit Bititci. "Change process: a key enabler for building resilient SMEs." *International Journal of Production Research* 49.18 (2011): 5601-5618.
- Aviso, K. B., Mayol, A. P., Promentilla, M. A. B., Santos, J. R., Tan, R. R., Ubando, A. T., & Yu, K. D. S. (2018). Allocating human resources in organizations operating under crisis conditions: A fuzzy input-output optimization modeling framework. *Resources, Conservation and Recycling*, 128, 250-258.
- Azevedo, Susana G., Helena Carvalho, and V. Cruz Machado. "The influence of large supply chain management practices on manufacturing supply chain performance." *context* 3.25 (2010): 26-27.
- Bala B.K., Arshad F.M., Noh K.M. (2017) *Scenario Planning and Modelling*. In: *System Dynamics*. Springer Texts in Business and Economics. Springer, Singapore
- Barlas Y (1996) Formal aspects of model validity and validation in system dynamics. *Syst Dyn Rev* 12(3):183–210
- BAYER, Steffen. *Business dynamics: Systems thinking and modeling for a complex world*. 2004.
- Briano, Enrico, Claudia Caballini, and Roberto Revetria. "Literature review about supply chain vulnerability and resiliency." *Proceedings of the 8th WSEAS international conference on System science and simulation in engineering*. Genova, Italy: World Scientific and Engineering Academy and Society (WSEAS), 2009.
- Chen, Hsi Yueh, Ajay Das, and Dmitry Ivanov. "Building resilience and managing post-disruption supply chain recovery: Lessons from the information and communication technology industry." *International Journal of Information Management* 49 (2019): 330-342.
- Chowdhury, Md Maruf Hossan, and Mohammed Quaddus. "Development and validation of an instrument for supply chain resilience

- measurement." Proceedings Conference: The 2014 ANZAM Operations, Supply Chain and Services Management Symposium. 2014.
- Christopher, M., & Peck, H. (2004). Building the resilient supply chain. *The international journal of logistics management*
  - Craighead, C. W., Blackhurst, J., Rungtusanatham, M. J., & Handfield, R. B. (2007). The severity of supply chain disruptions: design characteristics and mitigation capabilities.
  - Falasca, M., Zobel, C. W., & Cook, D. (2008, May). A decision support framework to assess supply chain resilience.
  - Fiksel, Joseph. "Sustainability and resilience: toward a systems approach." *Sustainability: Science, Practice and Policy* 2.2 (2006): 14-21.
  - Fitrianto, Achmad Room, and Suryadi Hadi. "Supply chain risk management in shrimp industry before and during mud volcano disaster: an initial concept." *Procedia-Social and Behavioral Sciences* 65 (2012): 427-435.
  - Grinberger, A. Yair, and Peleg Samuels. "Modeling the labor market in the aftermath of a disaster: Two perspectives." *International journal of disaster risk reduction* 31 (2018): 419-434.
  - Haimar, Amine El, and Joost R. Santos. "Modeling Uncertainties in Workforce Disruptions from Influenza Pandemics Using Dynamic Input-Output Analysis." *Risk Analysis* 34.3 (2014): 401-415.
  - Harris, Stanley G. "" The Fifth Discipline: The Art and Practice of the Learning Organization", by Peter M. Senge." *Human Resource Management* 29.3 (1990): 343.
  - Hassani, Rachid, Guy Desaulniers, and Issmail Elhallaoui. "Real-time personnel re-scheduling after a minor disruption in the retail industry." *Computers & Operations Research* (2020): 104952
  - Heckmann, I., Comes, T., & Nickel, S. (2015). A critical review on supply Chain risk, Definition, measure and modelling
  - Higuchi, Yoshio, et al. "The impact of the Great East Japan Earthquake on the labor market—need to resolve the employment mismatch in the disaster-stricken areas." *Japan Labor Review* 9.4 (2012): 4-21.

- Hosseini S., Barker K., Ramirez-Marquez J. ,2015, A review of definitions and measures of system resilience, United States
- Huff, Andrew G., et al. "How resilient is the United States' food system to pandemics?" *Journal of Environmental Studies and Sciences* 5.3 (2015): 337-347.
- Jüttner, U., & Maklan, S.(2011).Supply chain resilience in the global financial crisis: an empirical study. *Supply Chain Management: An International Journal*
- Kachali, H., et al. "Industry sector recovery following the Canterbury earthquakes." *International Journal of Disaster Risk Reduction* 12 (2015): 42-52.
- Kirchberger, Martina. "Natural disasters and labor markets." *Journal of Development Economics* 125 (2017): 40-58.
- Knemeyer, A. M., Zinn, W., & Eroglu, C. (2009). Proactive planning for catastrophic events in supply chains. *Journal of Operations Management*
- Kondo, Ayako. "The effects of supply chain disruptions caused by the Great East Japan Earthquake on workers." *Japan and the World Economy* 47 (2018): 40-50.
- MacKenzie, Cameron A., Joost R. Santos, and Kash Barker. "Measuring changes in international production from a disruption: Case study of the Japanese earthquake and tsunami." *International Journal of Production Economics* 138.2 (2012): 293-302.
- Manetsch TJ, Park GL (1982) Systems analysis and simulation with applications to economic and social systems. Department of Electrical Engineering and System Science, Michigan State University, USA
- Martín García, Juan, and John Sterman. 2006. Theory and practical exercises of system dynamics
- Martinez-Moyano IJ, Richardson IJG (2013) Best practices in system dynamics modelling. *Syst Dyn Rev* 29(2):102–123
- MELLA, Piero. *Systems thinking: intelligence in action*. Springer Science & Business Media, 2012.
- Peck, H. (2005). Drivers Of Supply chain vulnerability: An Integrated framework. *International journal of physical distribution & logistics management*
- Pereira, Carla Roberta, Martin Christopher, and Andrea Lago Da Silva. "Achieving supply chain resilience: the role of procurement." *Supply Chain Management: an international journal* (2014).

- Pettit T., Fiksel J., Croxton K. Ensuring Supply Chain resilience: development of a conceptual framework, *Journal of Business Logistics*, Vol. 31, No. 1, 2010, United States.
- Pettit, Timothy J., Keely L. Croxton, and Joseph Fiksel. "Ensuring supply chain resilience: development and implementation of an assessment tool." *Journal of business logistics* 34.1 (2013): 46-76.
- Pochard, Sophie. *Managing risks of supply-chain disruptions: dual sourcing as a real option*. Diss. Massachusetts Institute of Technology, 2003.
- Rice, J.B., & Caniato, F. (2003). BUILDING A SECURE AND RESILIENT SUPPLY NETWORK. *SUPPLY CHAIN MANAGEMENT REVIEW*
- Rodríguez-Oreggia, Eduardo. "Hurricanes and labor market outcomes: Evidence for Mexico." *Global environmental change* 23.1 (2013): 351-359.
- S. McManus, E. Seville, D. Brunsdon e J. Vargo, *Resilience management, A frame-work for assessing and improving the resilience of organizations*, 2007
- Santos, Joost. "Using Input-Output Analysis to Model the Impact of Pandemic Mitigation and Suppression Measures on the Workforce." *Sustainable Production and Consumption* (2020).
- Sargut, F. Zeynep, and Lian Qi. "Analysis of a two-party supply chain with random disruptions." *Operations Research Letters* 40.2 (2012): 114-122.
- Serhiy Y. Ponomarov and Mary C. Holcomb, *Understanding the concept of supply chain resilience*, Department of Marketing and Logistics, University of Tennessee, Knoxville, Tennessee, USA, 2009
- Serhiy Y. Ponomarov and Mary C. Holcomb, *Understanding the concept of supply chain resilience*, Department of Marketing and Logistics, University of Tennessee, Knoxville, Tennessee, USA, 2009.
- Soni, U., Jain, V., & Kumar, S. (2014). *Measuring supply chain resilience using A deterministic modelling approach*
- Serman JD (2000) *Business dynamics: systems thinking and modeling for a complex world*. McGraw-Hill Higher Education, Boston
- Svensson, G. (2000). *A conceptual framework for the analysis of vulnerability in supply chains*. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*

- Tang, C.S. (2006). Perspectives in supply chain risk management. *International Journal of Production Economics*
- Tierney, K., & Bruneau, M. (2007). Conceptualizing and measuring resilience: A key to disaster loss reduction
- Timothy J. Pettit, Joseph Fiksel, Keely L. Croxton, Ensuring Supply Chain Resilience: development of a conceptual framework, 2006
- U. Soni and V. Jain, "Minimizing the vulnerabilities of supply chain: A new framework for enhancing the resilience," 2011 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, Singapore, 2011, pp. 933-939, doi: 10.1109/IEEM.2011.6118053.
- Wagner, S. M., & Bode, C. (2006). An empirical investigation into supply chain vulnerability. *Journal of purchasing and supply management*, Germania
- Yaseen, Qazi Muhammad, et al. "Dynamic inoperability input-output modeling for economic losses estimation in industries during flooding." *Socio-Economic Planning Sciences* (2020): 100876.
- Yossi Sheffi, James B. Rice Jr. (2005). *A Supply Chain View of the Resilient Enterprise*, United States

## Sitografia

- <https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:0v1ldYXdfiEJ:https://www.puntosicuro.it/sicurezza-sul-lavoro-C-1/tipologie-di-contenuto-C-6/valutazione-dei-rischi-C-59/system-dynamics-modellazione-simulazione-dei-rischi-AR-14897/+&cd=2&hl=it&ct=clnk&gl=it> (Consultato il 29/09/20)
- [https://www.tutorialspoint.com/modelling\\_and\\_simulation/modelling\\_and\\_simulation\\_continuous\\_simulation.htm](https://www.tutorialspoint.com/modelling_and_simulation/modelling_and_simulation_continuous_simulation.htm) (Consultato il 29/09/20)
- <https://www.willistowerswatson.com/it-IT/Insights/2019/11/gli-effetti-del-cambiamento-climatico-e-degli-eventi-naturali-catastrofali> (Consultato il 29/09/20)