



Introduzione alla System Dynamics

Gianluca Zanutto

Università degli studi di Udine

AGENDA

- Introduzione
- Principi base della System Dynamics
- Prospettive di analisi

AGENDA

- Introduzione
- Principi base della System Dynamics
- Prospettive di analisi

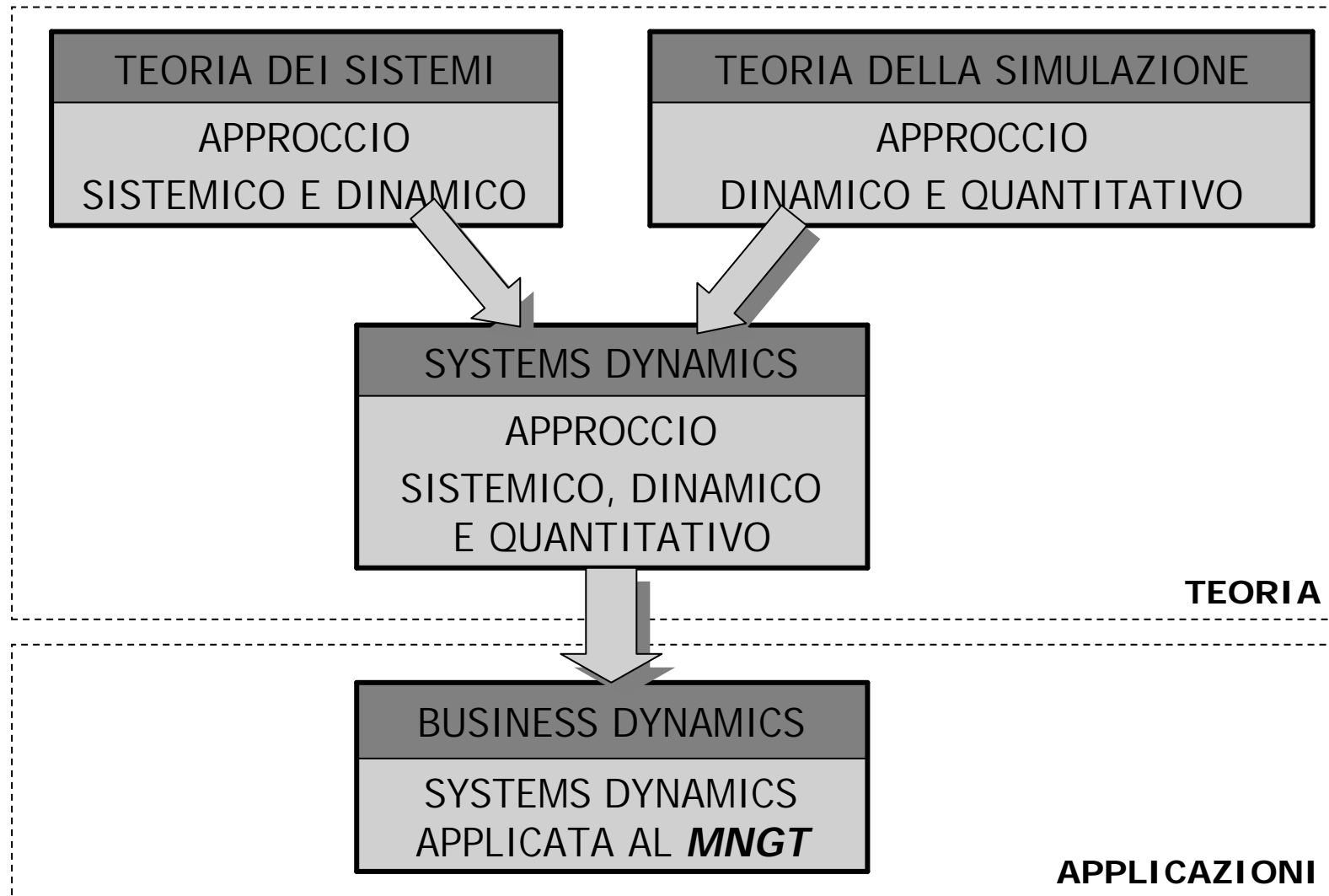
COS'È LA *SYSTEM DYNAMICS*

È una tecnica che consente di:

- *rappresentare i sistemi* come insiemi di più componenti che interagiscono tra di loro
- *analizzarne il comportamento dinamico*

Viene applicata mediante la realizzazione di **modelli di simulazione** che vengono fatti 'girare' su un apposito software.

Discipline, strumenti ed aree logiche



Cenni storici

- La System Dynamics nasce con **J.W. Forrester** (MIT)
 - Sistemi antiaerei
 - Simulatori di volo
 - Oscillazione della capacità produttiva (General Electric)
 - *Industrial dynamics* (1961)
 - *Urban dynamics* (1969)
 - *World dynamics* (1973)
- Si accresce nei contenuti teorici grazie alla corrente del ***Pensiero Sistemico***, soprattutto con **P. Senge**:
 - *La quinta disciplina* (1990)
- **J.D. Sterman** (MIT):
 - *Business dynamics: system thinking and modelling for a complex world* (2000)
 - Studio processi decisionali in azienda
 - Micro-mondi
 - Strategie

AGENDA

- Introduzione
- Principi base della System Dynamics
 - CONCETTO DI SISTEMA
 - CAUSALITA' CIRCOLARE
- Prospettive di analisi
 - PROSPETTIVA SISTEMICA
 - PROSPETTIVA DINAMICA
- Altro principio base della System Dynamics
 - ACCUMULI E FLUSSI
- Altra prospettiva di analisi
 - PROSPETTIVA STRUTTURALE

AGENDA

- Introduzione
- Principi base della System Dynamics
 - CONCETTO DI SISTEMA
 - CAUSALITA' CIRCOLARE
- Prospettive di analisi
 - PROSPETTIVA SISTEMICA
 - PROSPETTIVA DINAMICA
- Altro principio base della System Dynamics
 - ACCUMULI E FLUSSI
- Altra prospettiva di analisi
 - PROSPETTIVA STRUTTURALE

L'APPROCCIO SISTEMICO

- Modo di interpretare la realtà
- Sviluppatisi dal dopoguerra
- Non disassembla le parti
(*riduzionismo*: "le cose equivalgono alla somma delle loro parti")
 - I **sistemi** sono più complessi della semplice somma delle loro parti.
 - Studia l'organizzazione dei sistemi, piuttosto che i loro dettagli specifici.
- Vantaggi:
 - Affronta problemi complessi
 - Non entra nei dettagli tecnici della materia
 - Svela strutture e comportamenti ad un livello di astrazione elevato
 - E' indipendente dal particolare campo di indagine
 - Permette di individuare strategie d'azione anche in ambiti complessi

DEFINIZIONE DI "SISTEMA"?

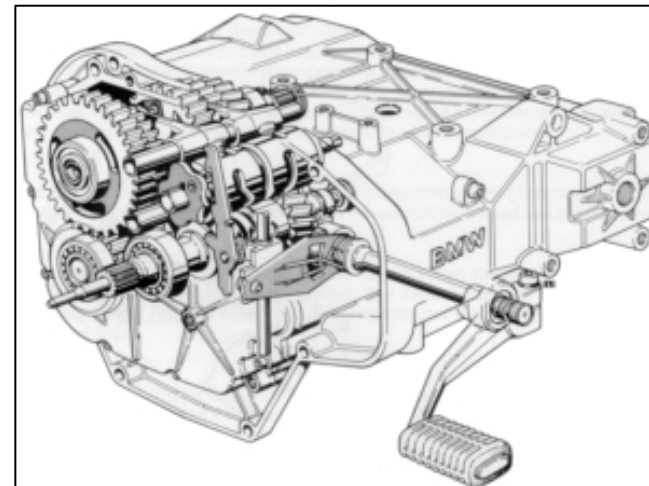
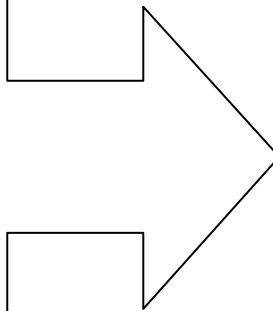
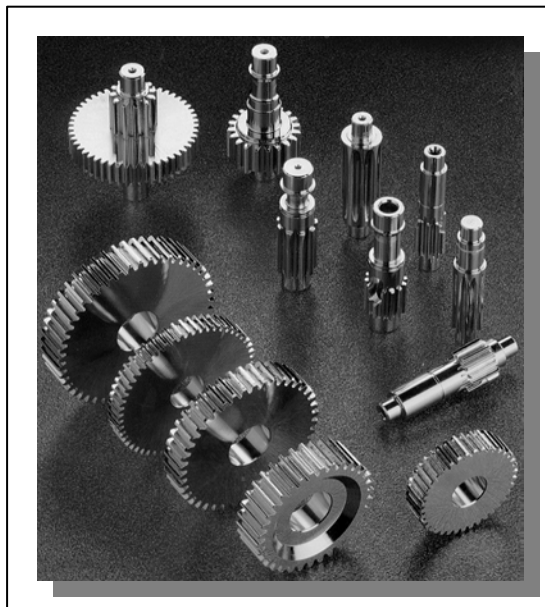
- Pluralità di elementi coordinati fra loro secondo un determinato metodo allo scopo di servire a una certa operazione
[Zingarelli, cit. in Viola 1995]
- Collezione di elementi interagenti che funzionano insieme per un qualche scopo
[Roberts]
- Che scopo ha una città?
- Collezione di elementi che interagiscono reciprocamente per funzionare come un unico
[Kauffman]

SISTEMA – definizione meccanica

« gruppo di elementi

che operano insieme per un fine comune »

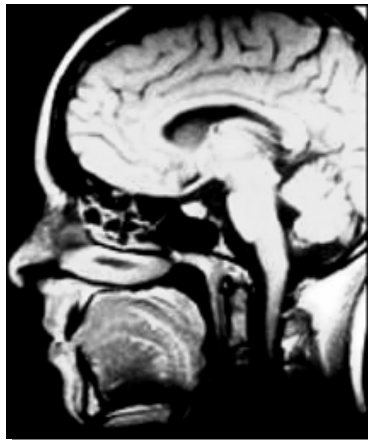
J.W. Forrester, "Principles of Systems", 1968



SISTEMA – definizione organica

**« unità globale organizzata di interrelazioni
fra elementi, azioni o individui »**

E. Morin, “Il metodo. Ordine, disordine, organizzazione”, 1983



IL CERVELLO:

$10^{11} - 10^{12}$ neuroni

1.000 dendriti per neurone

$10^{12} - 10^{13}$ connessioni (1.000 – 10.000 miliardi)

COM'È FATTO UN SISTEMA

- **Parti**

- ? Un sistema è composto da numerose parti che interagiscono tra loro. Queste parti sono legate tra loro da legami di causa ed effetto.

- **Confini**

- ? Il problema di cosa includere nel nostro modello e cosa no: i confini del sistema.

- **Strutture.**

- ? Come mettere assieme molti legami causa-effetto in un unico diagramma, e come riconoscere in esso le strutture più importanti:

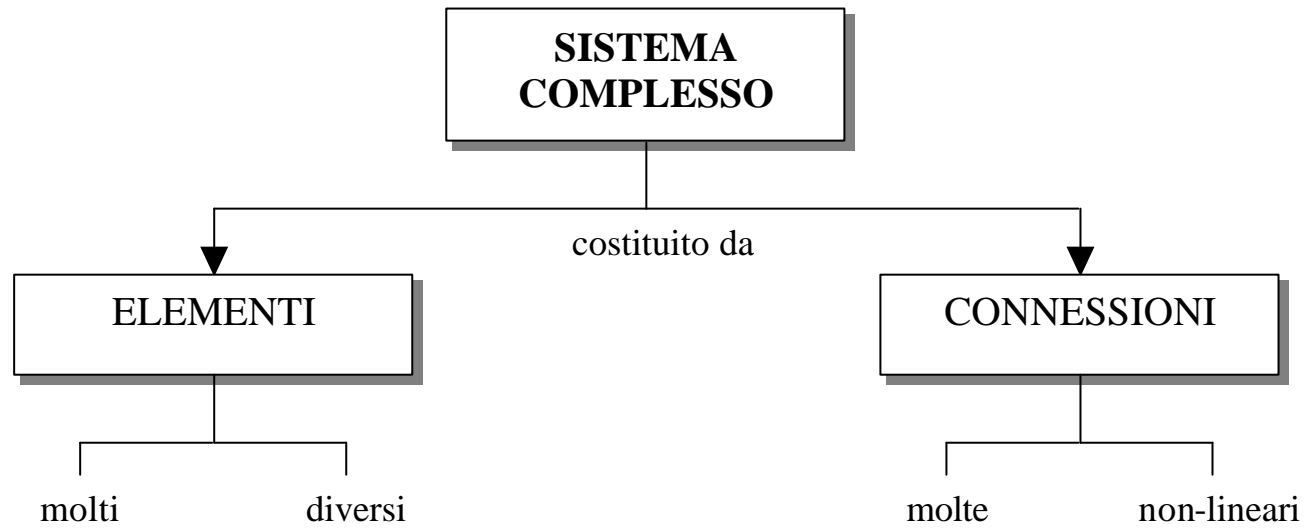
- ? i circuiti di retroazione.

- **Comportamento**

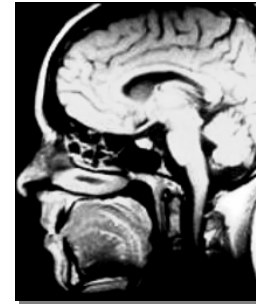
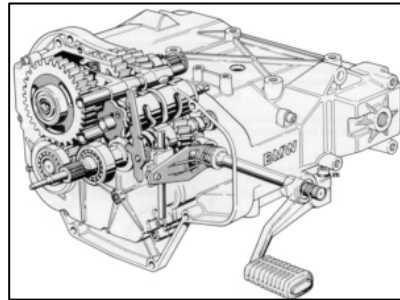
I vari tipi di circuiti di retroazione e la loro diversa azione sul comportamento del sistema:

- La retroazione negativa
- La retroazione positiva
- I sistemi misti con retroazione negativa e positiva
- Come riconoscere il tipo di retroazione col metodo dei segni
- La dominanza dei circuiti
- Le variabili esogene

SISTEMA COMPLESSO



COMPLICATO vs COMPLESSO

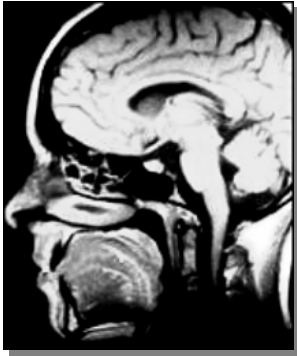


COMPLICATO

COMPLESSO

Etimologia	<i>cum plicum</i>	<i>cum plexum</i>
Approccio	analitico	sintetico
Soluzione	spiegato nelle sue pieghe	compreso nel suo insieme
Esempi	meccanismo	organismo

COME AFFRONTARE IL “COMPLESSO”

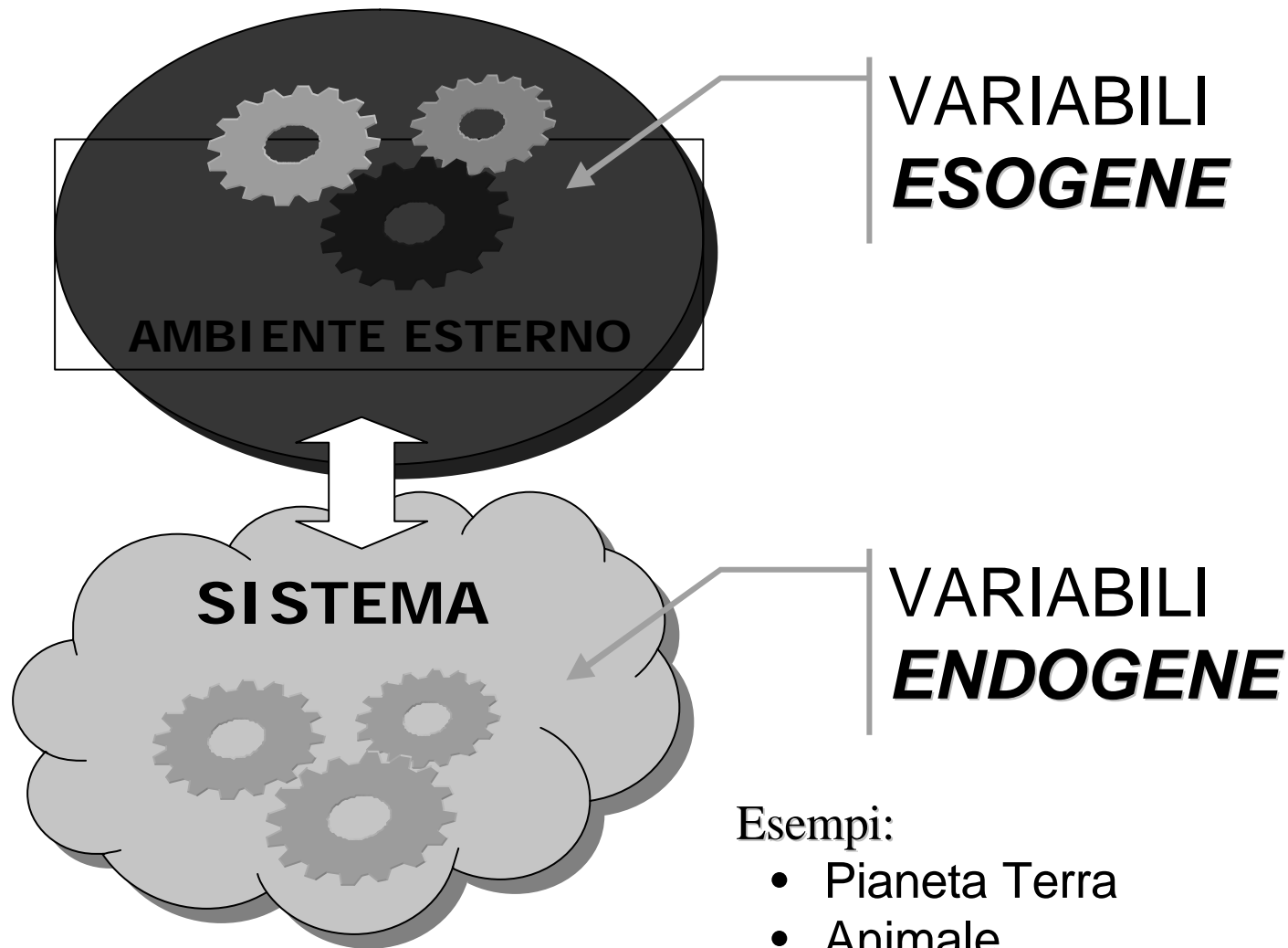


COME AFFRONTARLO ?

Per confrontarsi con i **sistemi complessi**
bisogna utilizzare un **approccio sistemico.**

Il complesso va compreso nel suo insieme,
non spiegato nelle sue pieghe.

SISTEMA E AMBIENTE ESTERNO: I CONFINI



AGENDA

- Introduzione
- Principi base della System Dynamics
 - CONCETTO DI SISTEMA
 - CAUSALITA' CIRCOLARE
- Prospettive di analisi
 - PROSPETTIVA SISTEMICA
 - PROSPETTIVA DINAMICA
- Altro principio base della System Dynamics
 - ACCUMULI E FLUSSI
- Altra prospettiva di analisi
 - PROSPETTIVA STRUTTURALE

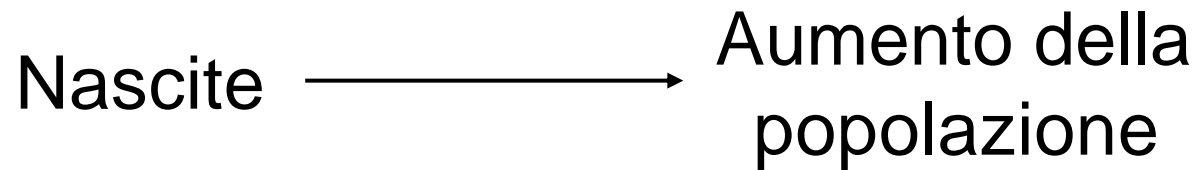
CONCETTO DI CAUSALITA'

$$X \longrightarrow Y$$

Siamo in presenza di un **legame causale**
quando
una variabile X influenza un'altra variabile Y

Esempio di legame causale

Un legame causale viene rappresentato così:



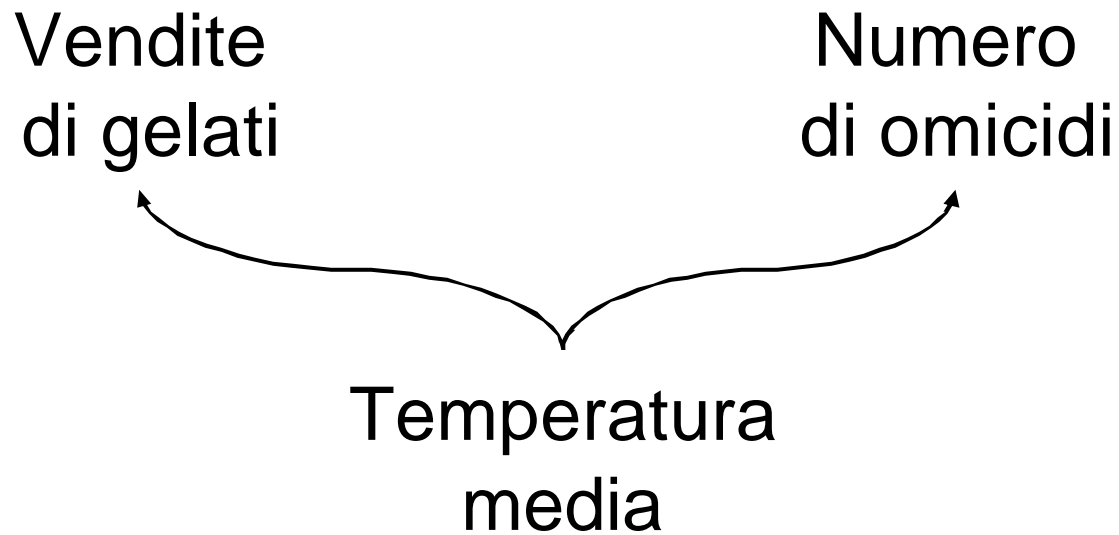
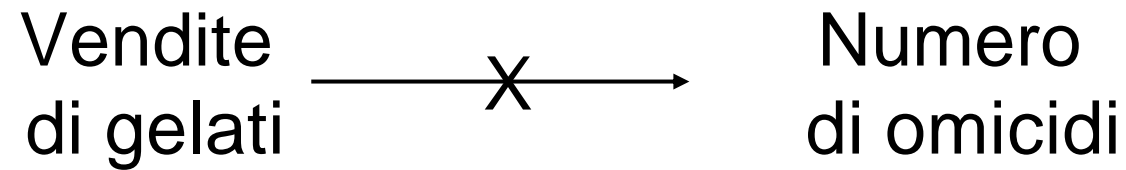
Questo diagramma si legge:

“Le nascite *causano* un aumento di popolazione”

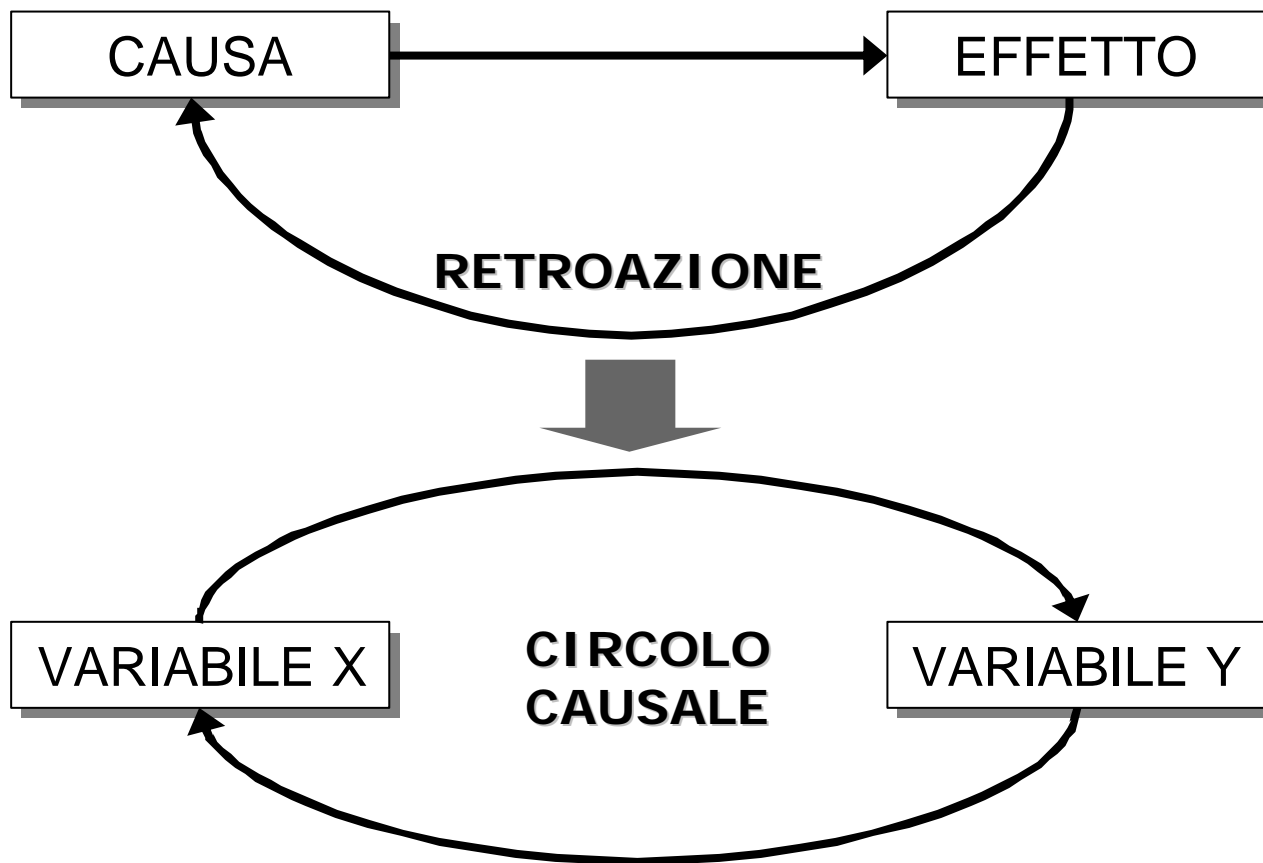
O meglio:

“Le nascite *influenzano* l'aumento di popolazione”₂₀

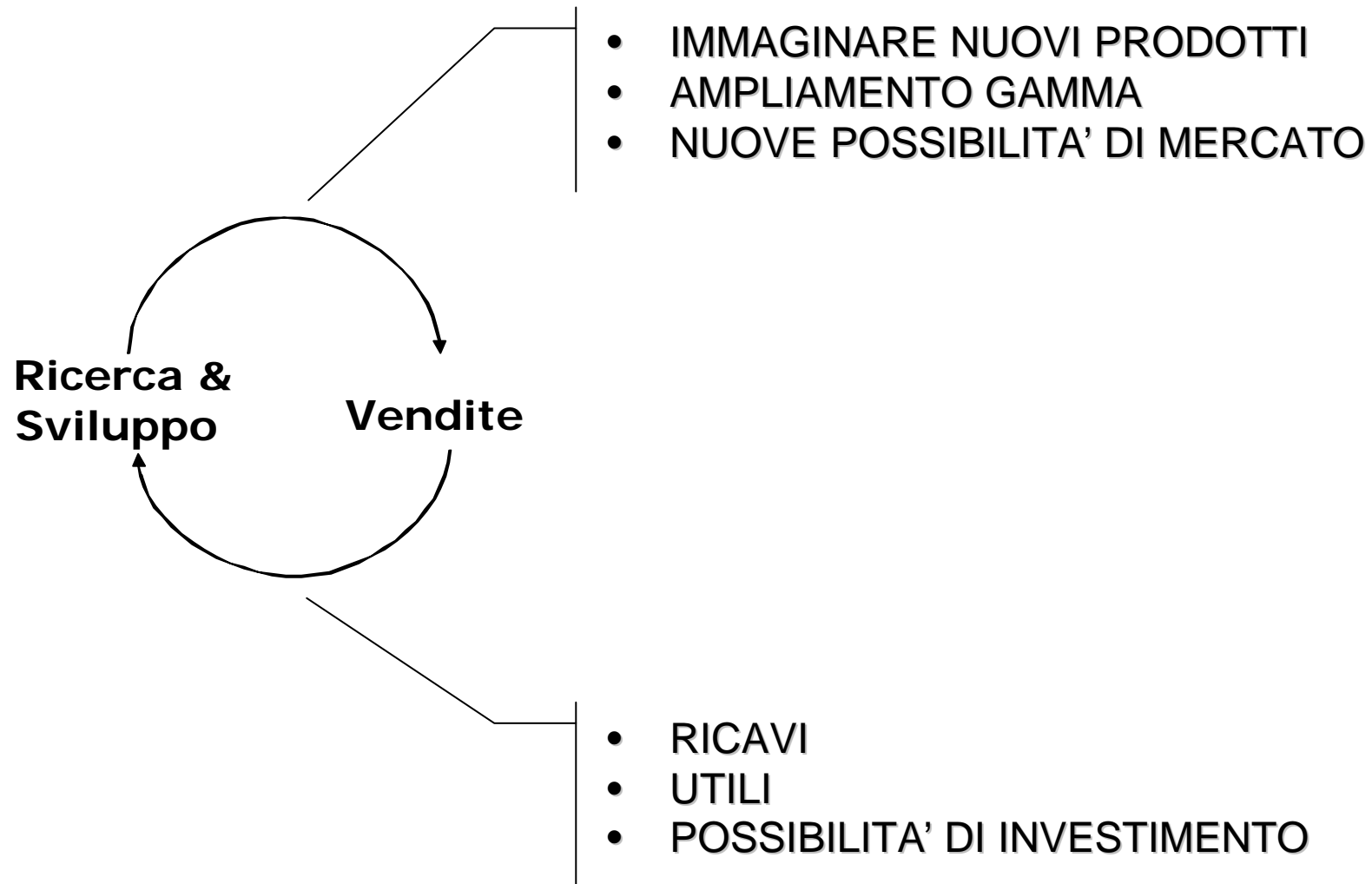
Causalità e correlazione



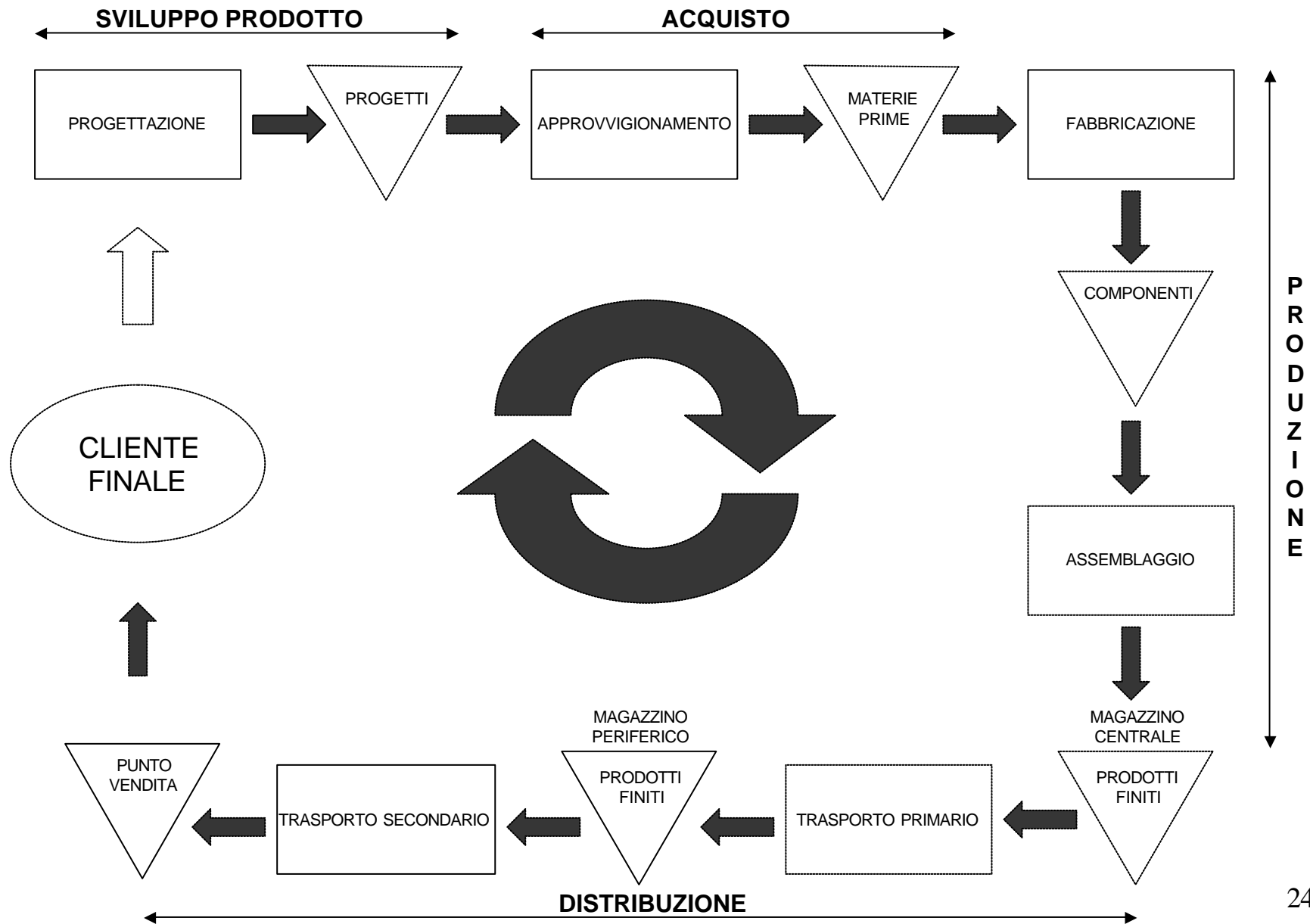
CAUSALITA' LINERARE vs CAUSALITA' CIRCOLARE



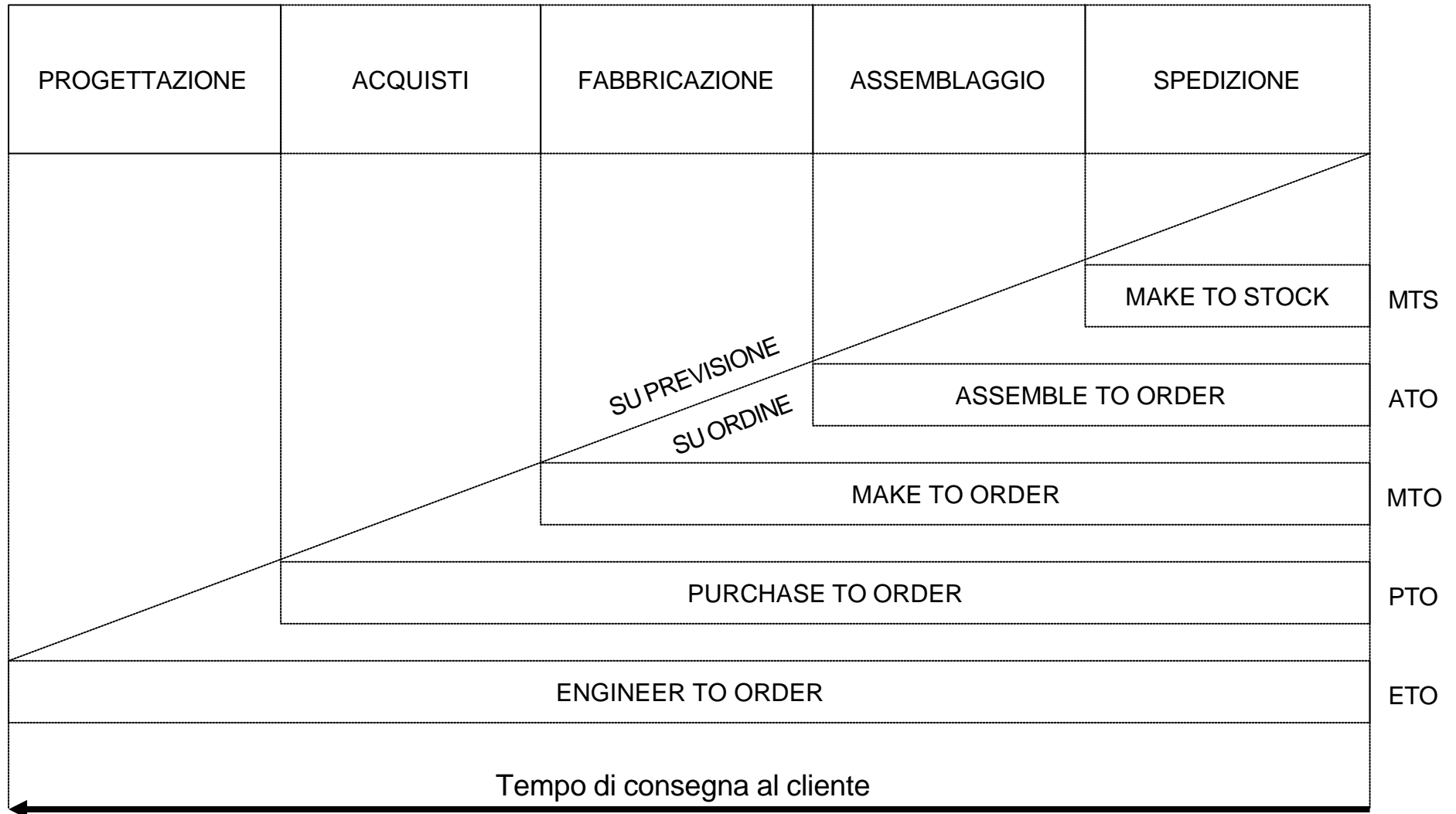
Un esempio di circolo causale



(SCHEMA GENERALIZZATO DI FLUSSO LOGISTICO)

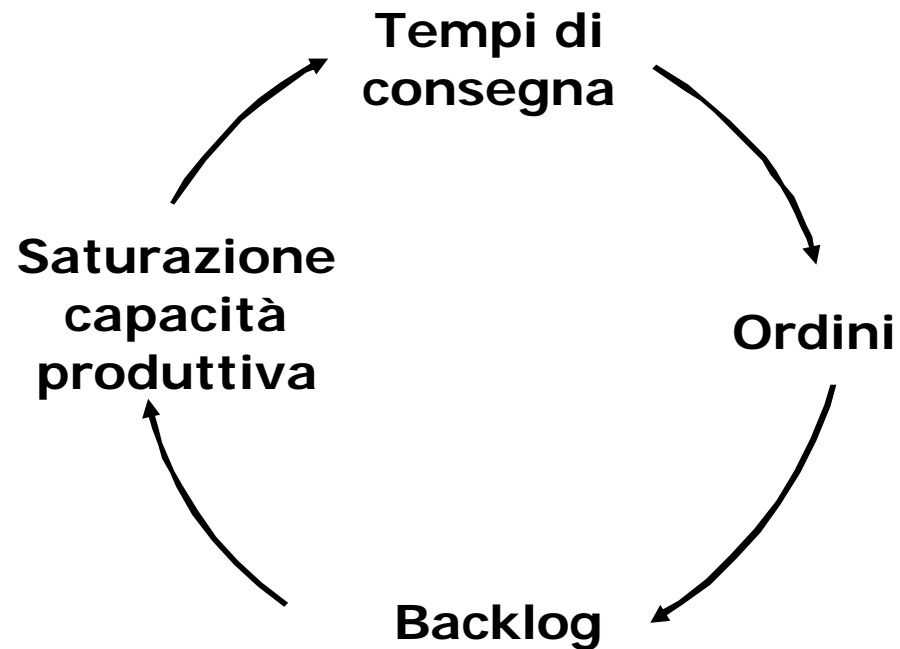


(CLASSIFICAZIONE RISPETTO AL MODO DI RISPONDERE ALLA DOMANDA)



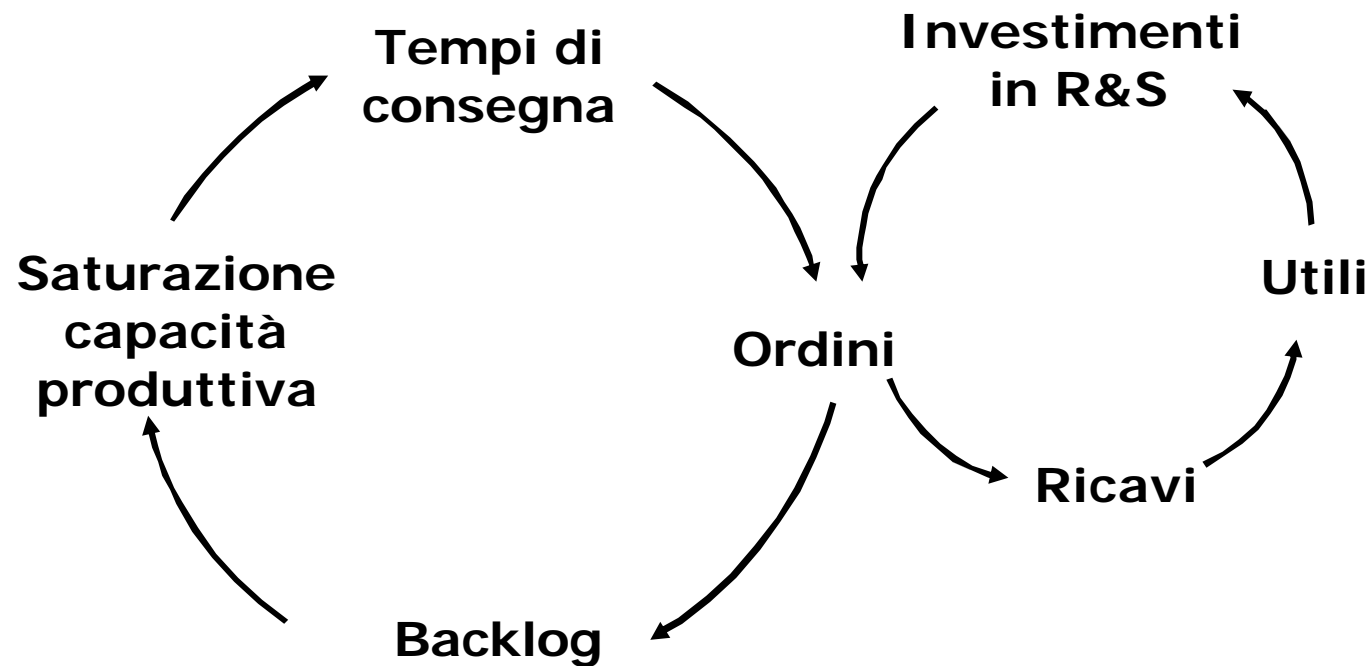
Un circolo causale può coinvolgere molte variabili

...ad esempio in un'azienda Assemble To Order



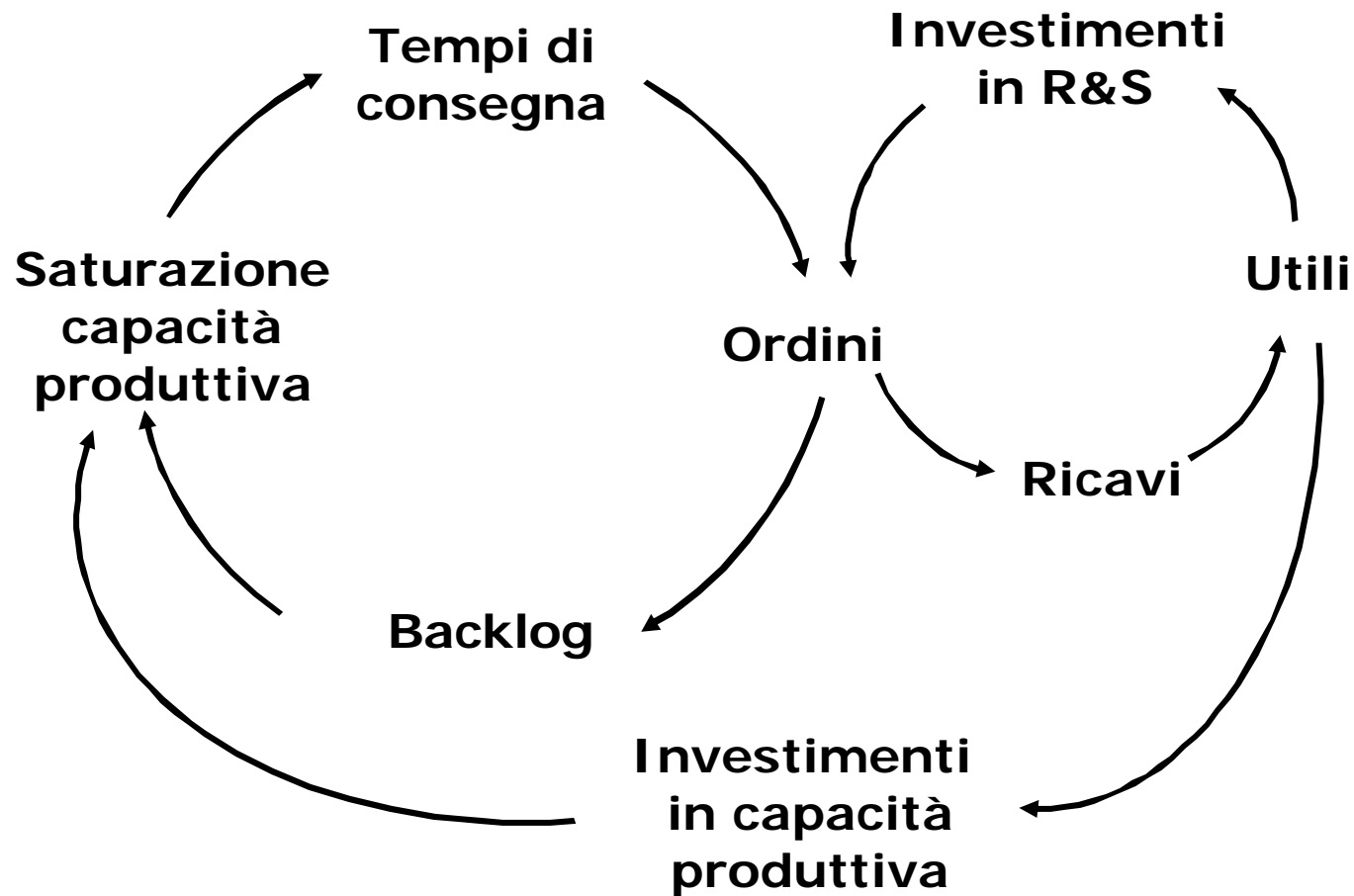
I circoli causali possono concatenarsi ...

...ad esempio in un'azienda Assemble To Order

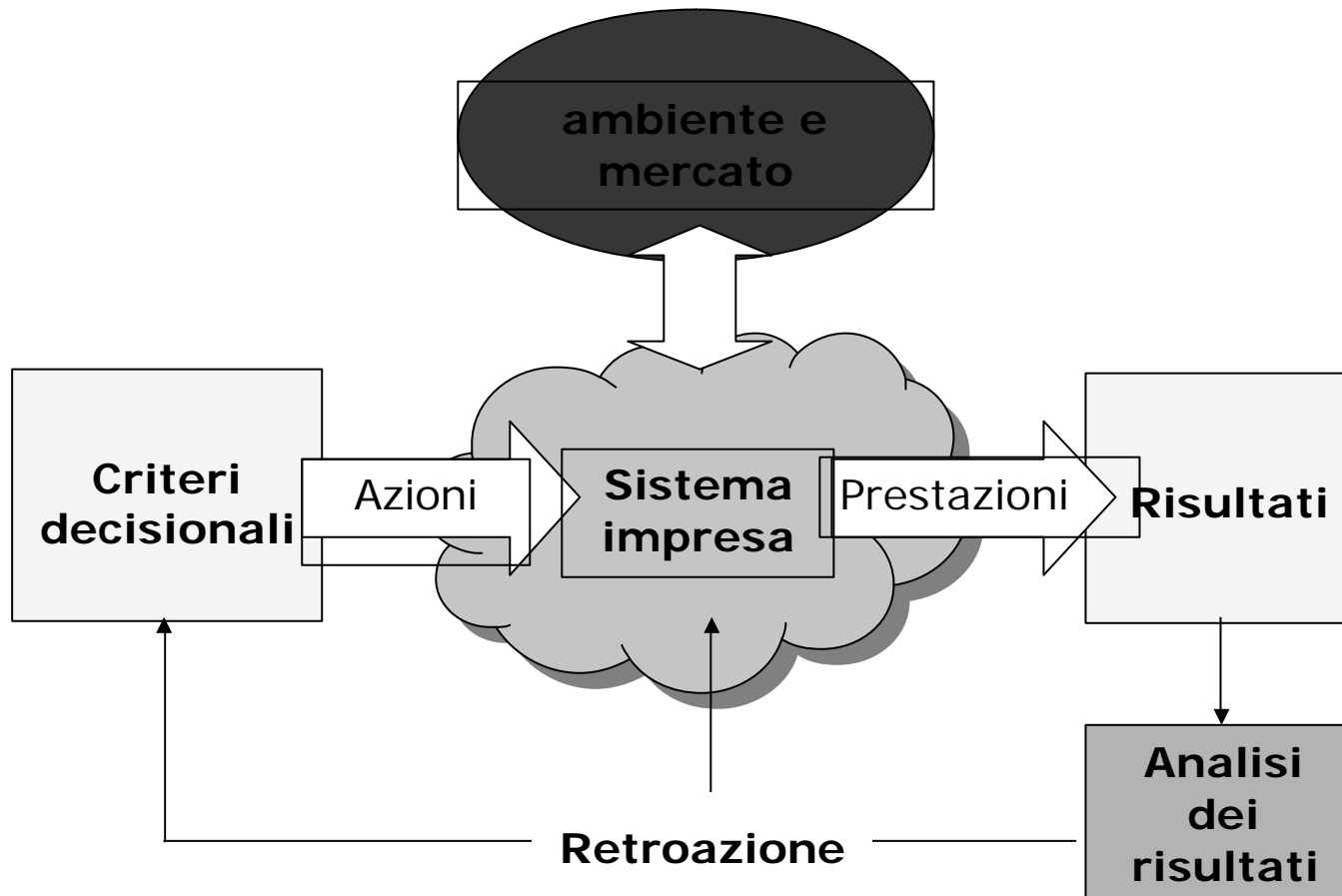


...e sovrapporsi.

...ad esempio in un'azienda Assemble To Order



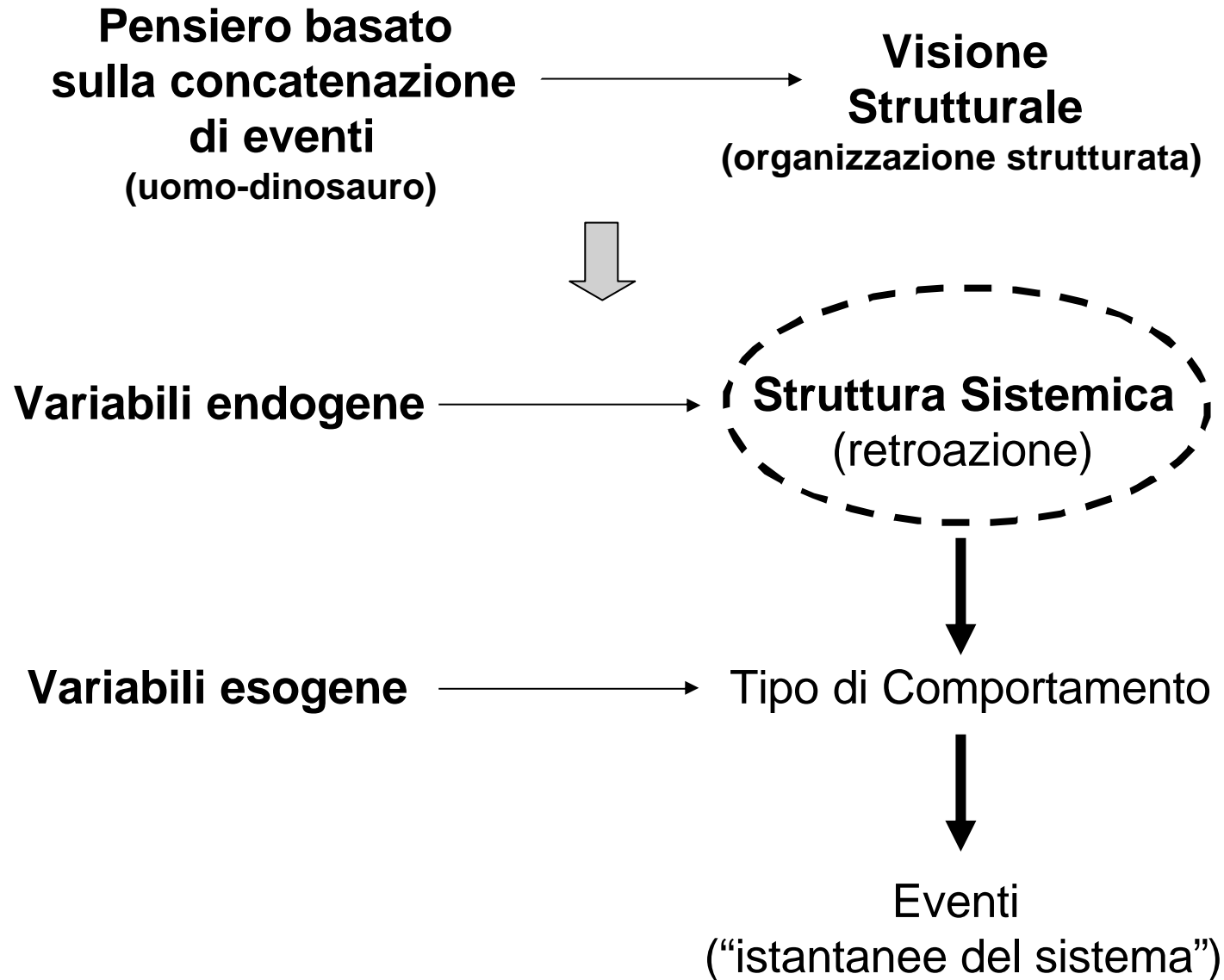
L'impresa come sistema complesso con controllo in retroazione



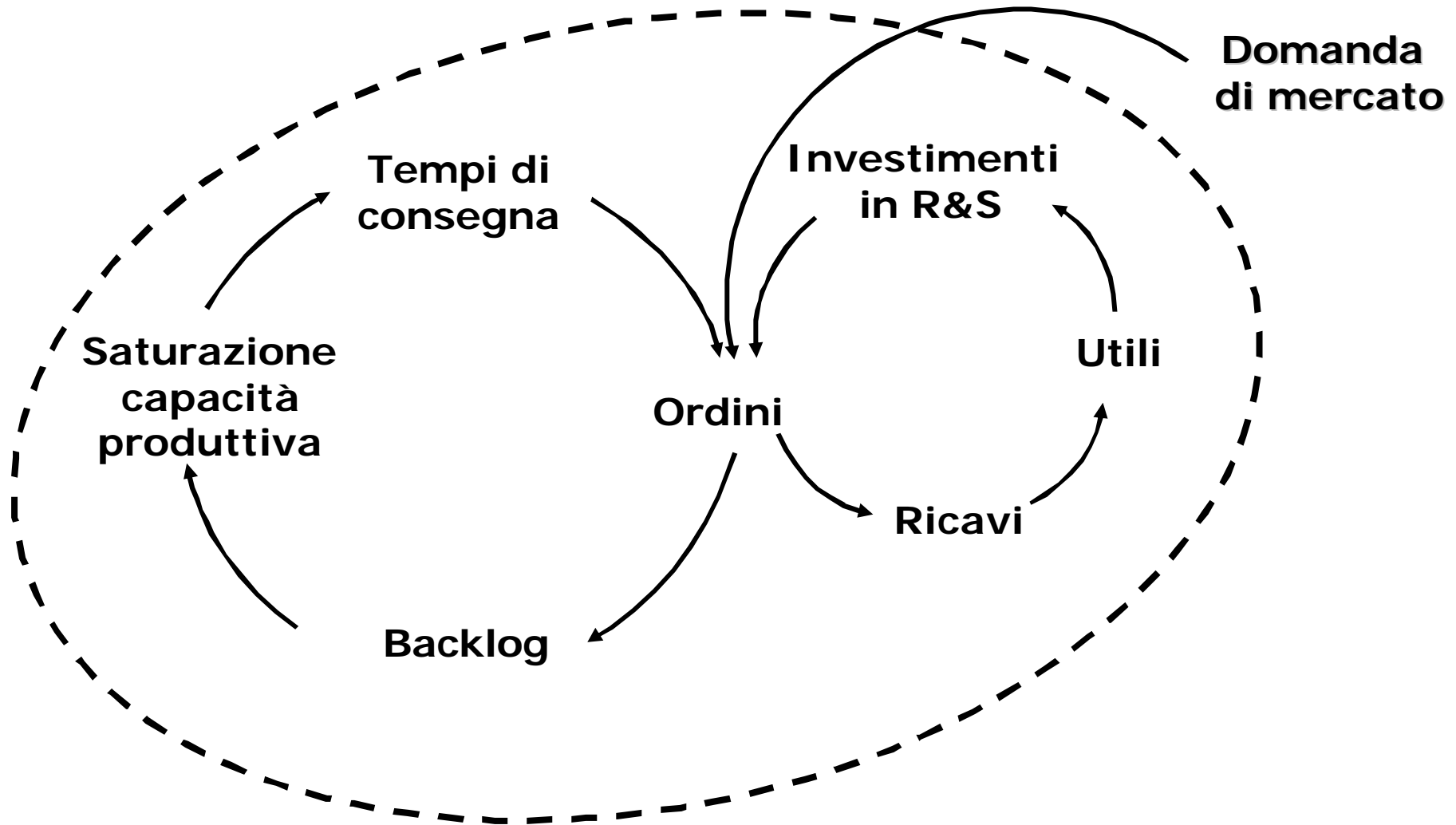
AGENDA

- Introduzione
- Principi base della System Dynamics
- Prospettive di analisi
 - PROSPETTIVA SISTEMICA
 - PROSPETTIVA DINAMICA
- Altro principio base della System Dynamics
 - ACCUMULI E FLUSSI
- Altra prospettiva di analisi
 - PROSPETTIVA STRUTTURALE

PENSIERO SISTEMICO



STRUTTURA SISTEMICA e VARIABILI ESOGENE



Polarità dei legami causali

$X \xrightarrow{+} Y$

un legame è *positivo* se:

$$\frac{\partial y}{\partial x} > 0$$

- una variazione del valore di X produce una variazione del valore di Y nella stessa direzione

$X \xrightarrow{-} Y$

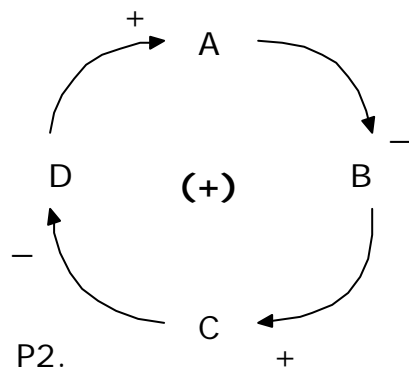
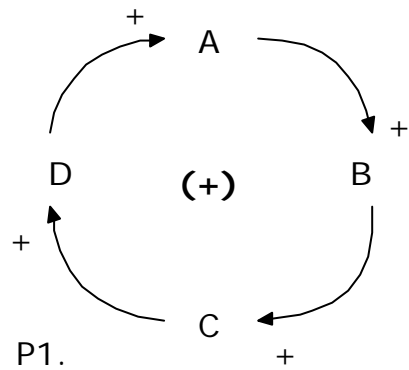
un legame è *negativo* se:

$$\frac{\partial y}{\partial x} < 0$$

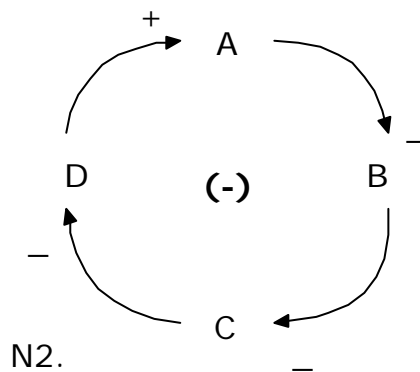
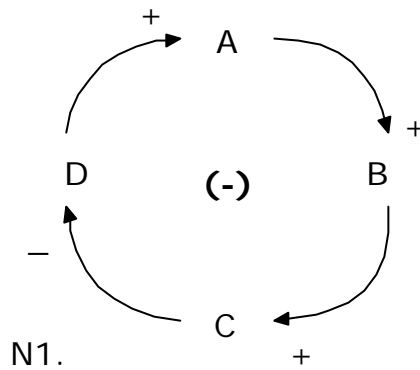
- una variazione del valore di X produce una variazione del valore di Y nella direzione opposta

Circoli positivi e circoli negativi

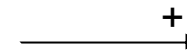
Circoli positivi



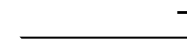
Circoli negativi



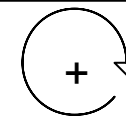
legame positivo



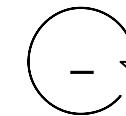
legame negativo



Circolo positivo

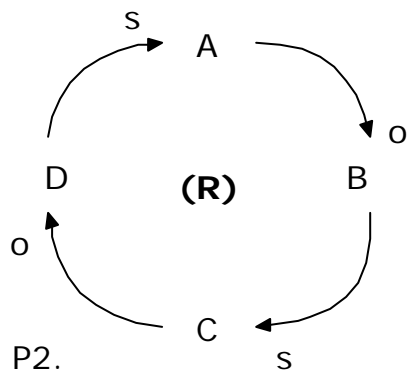
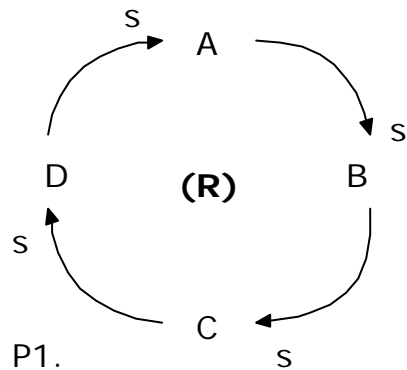


Circolo negativo

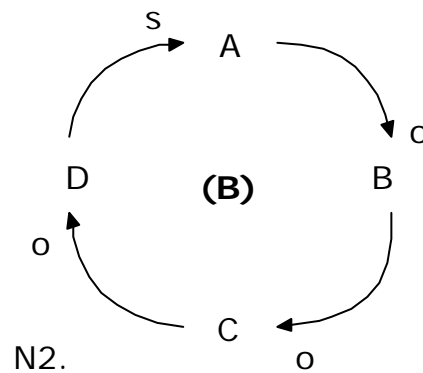
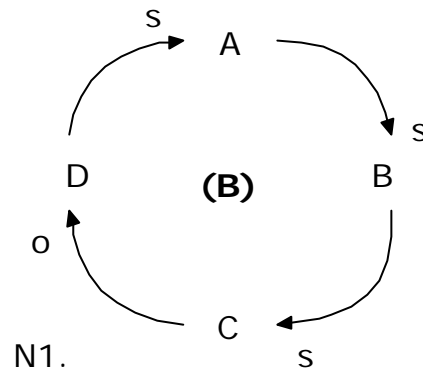


altre notazioni

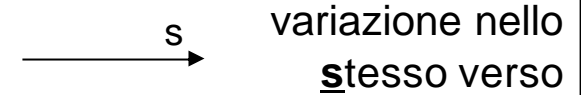
Circoli positivi
(auto-rafforzanti)



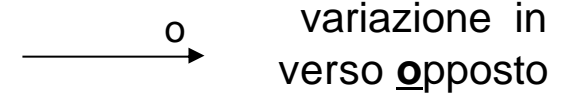
Circoli negativi
(auto-bilancianti)



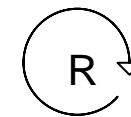
legame positivo



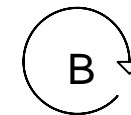
legame negativo



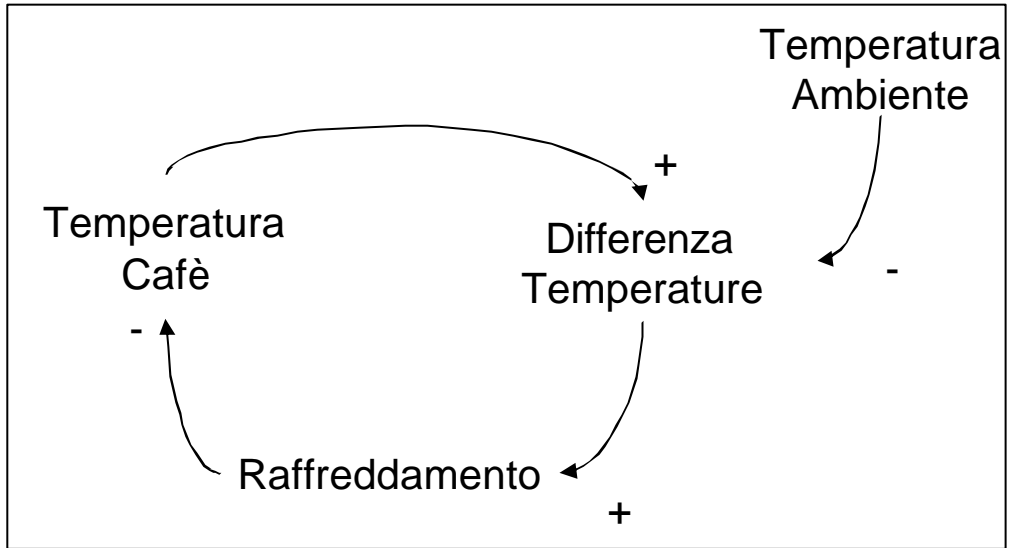
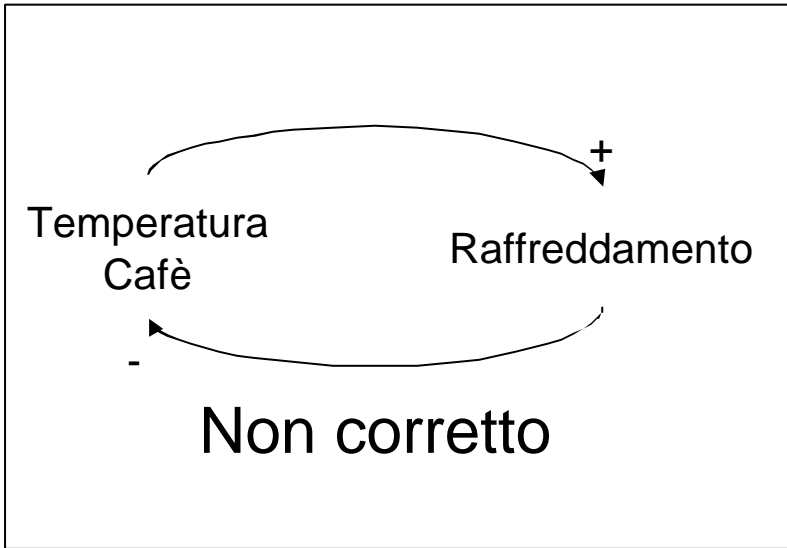
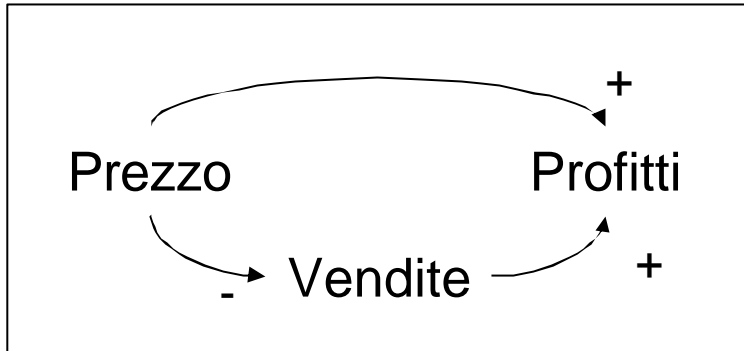
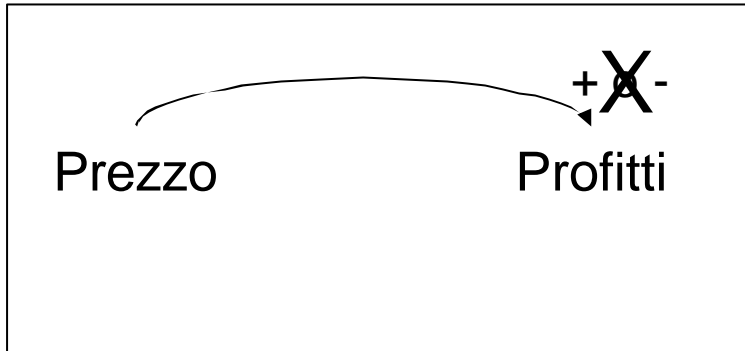
Circolo auto-rafforzante



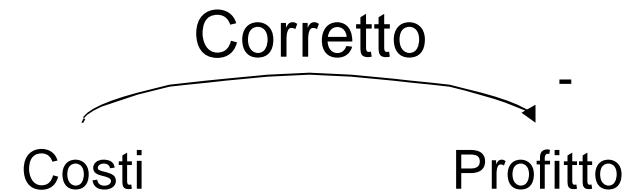
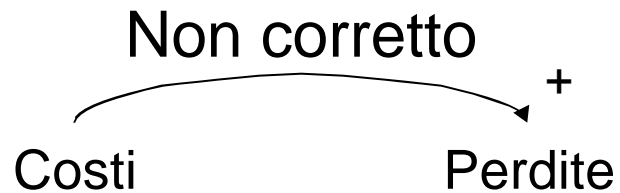
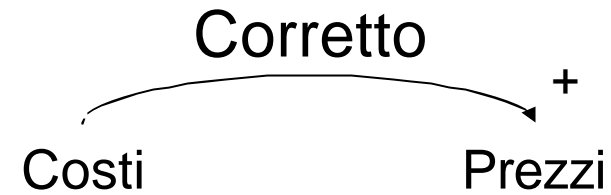
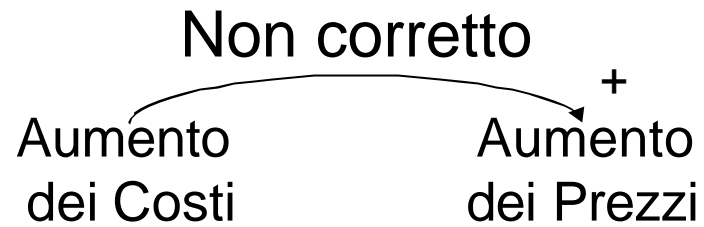
Circolo auto-bilanciante



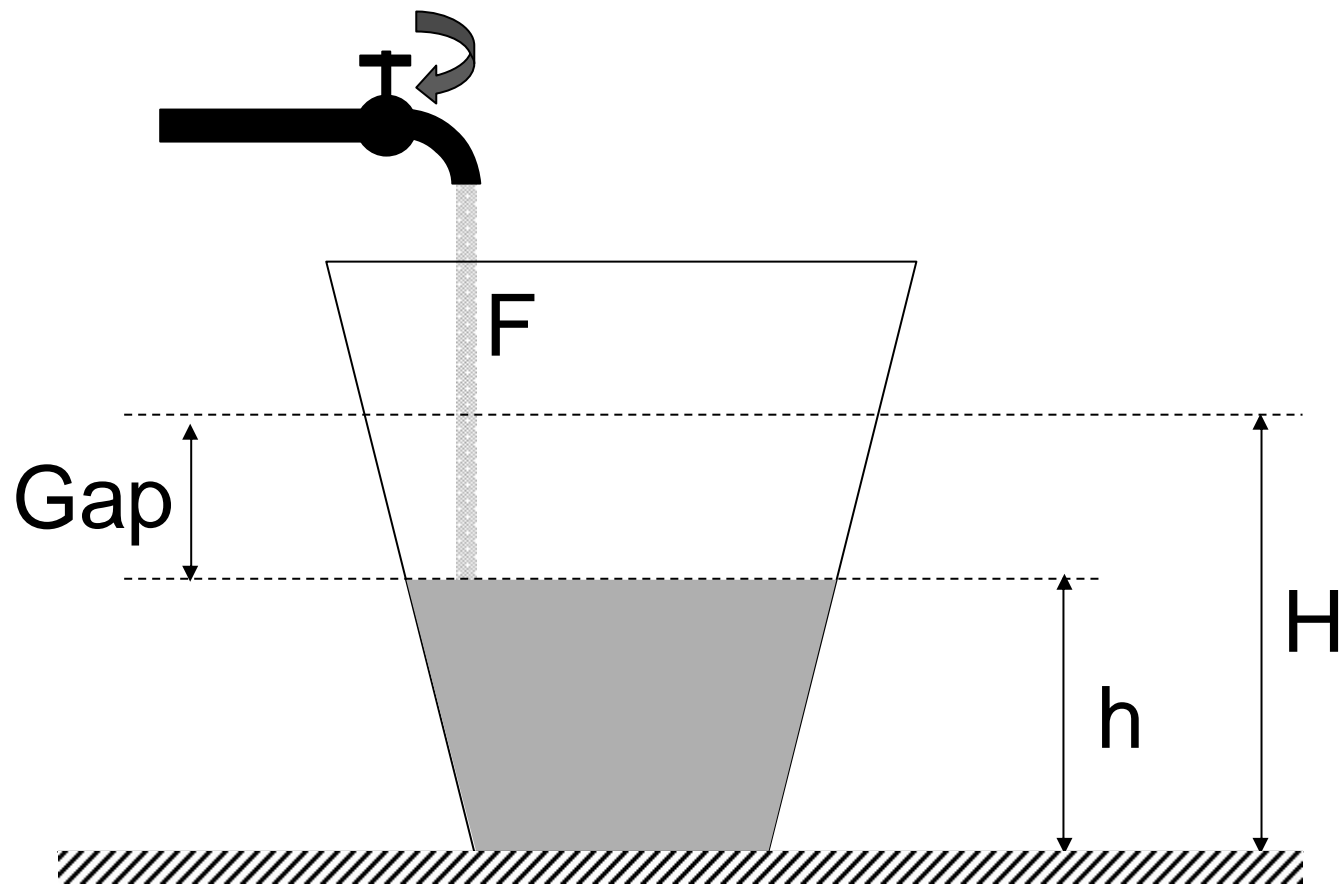
Esempi di ambiguità



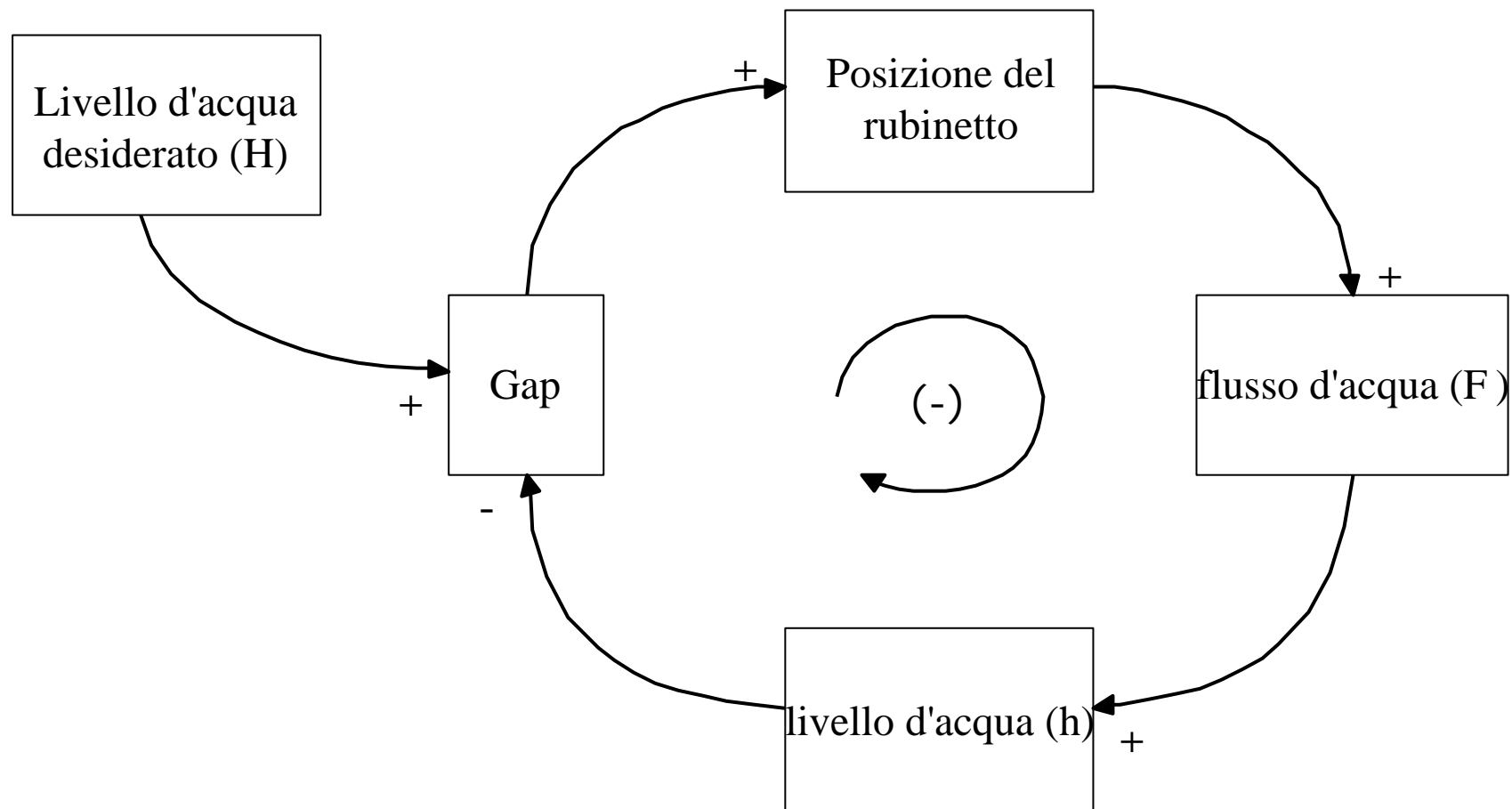
Come denominare le variabili



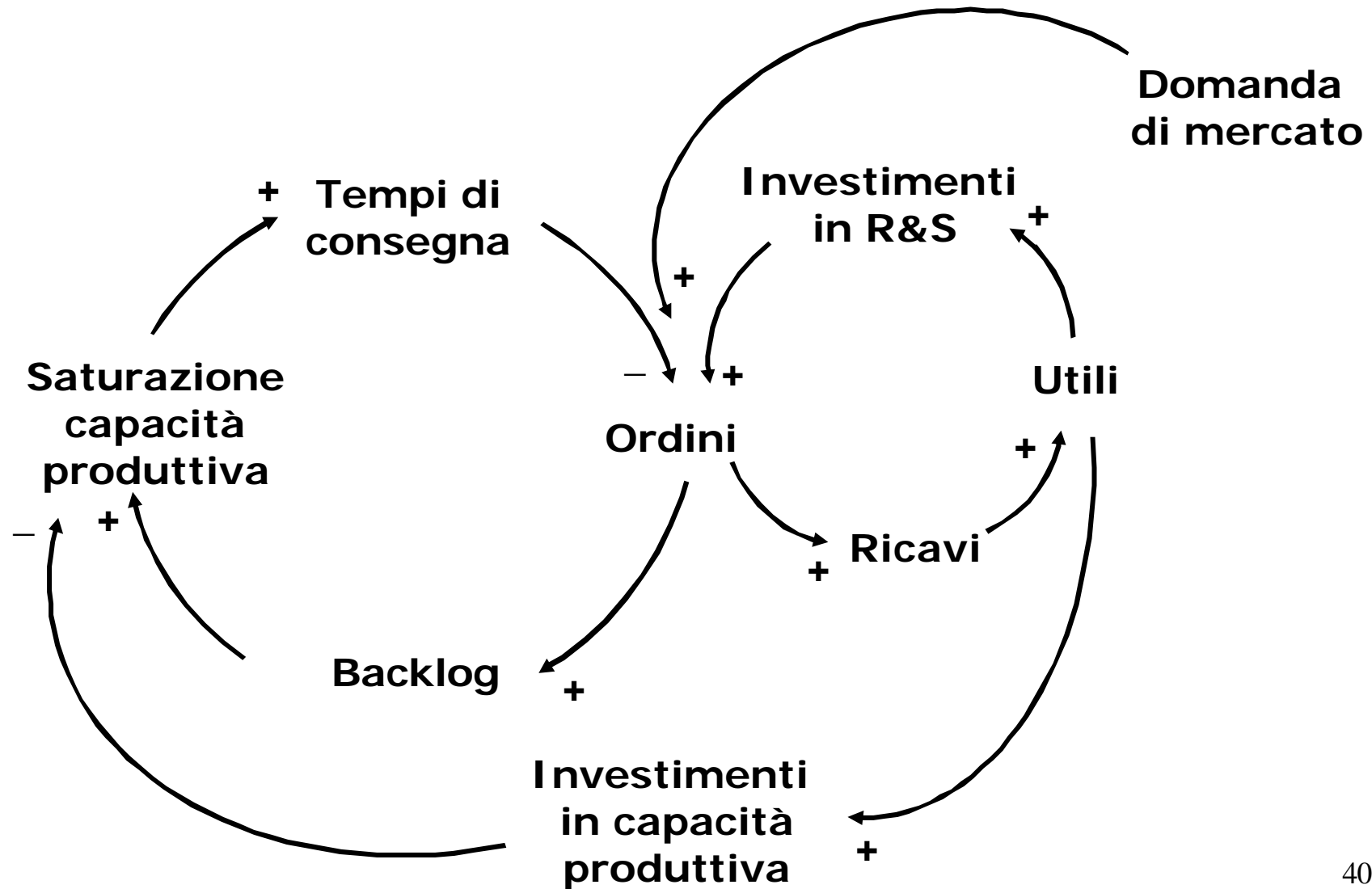
Esempio: Il processo di riempimento di un bicchiere



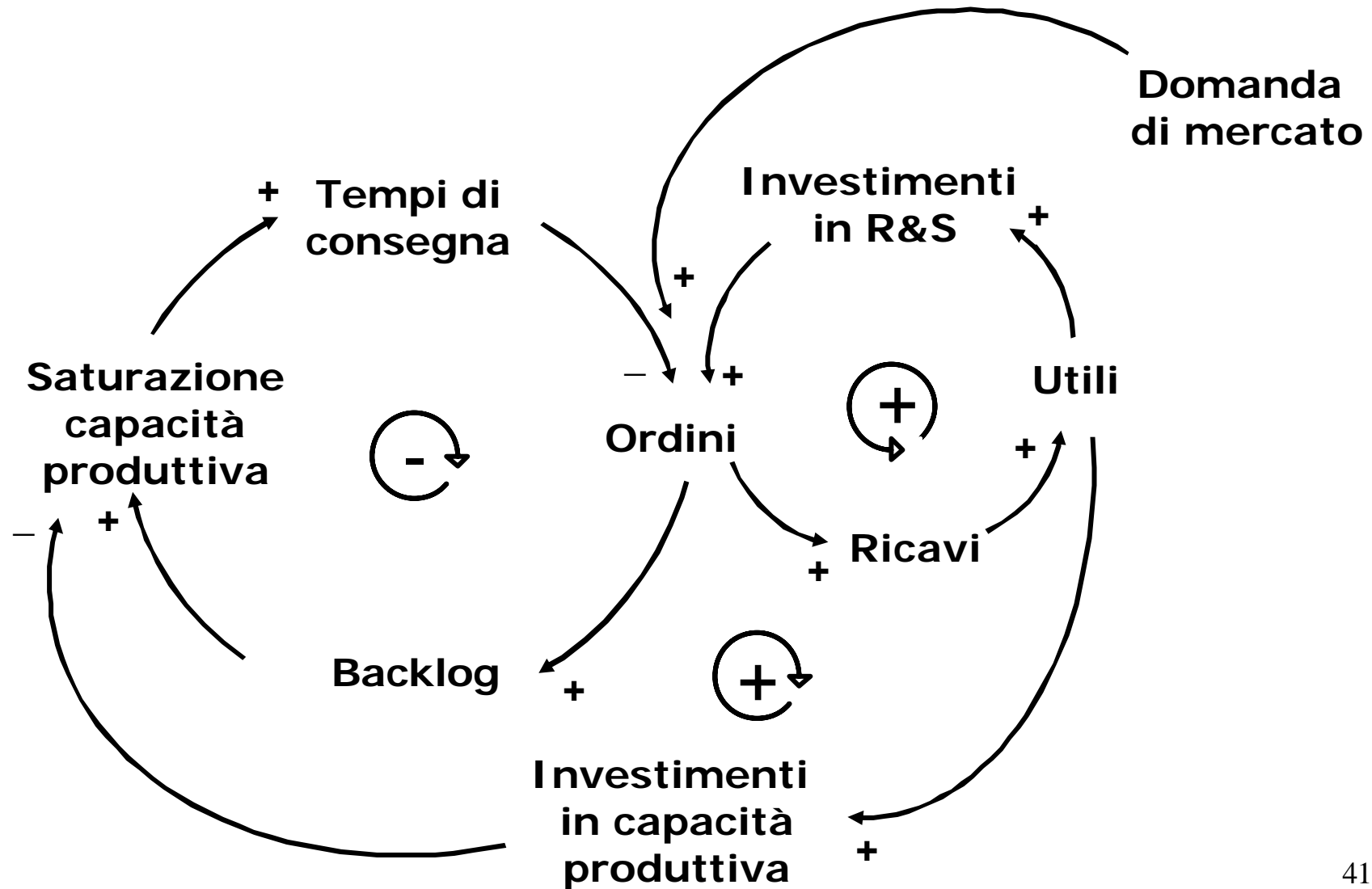
Esempio: Mappa causale per il processo di riempimento di un bicchiere



Introducendo le polarità nell'esempio precedente...



... ottengo la mappa causale



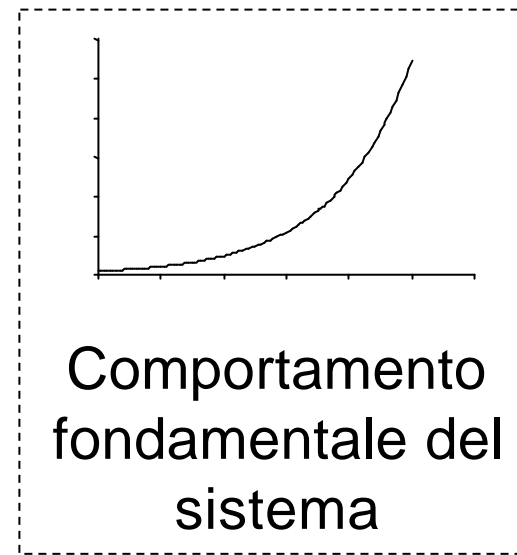
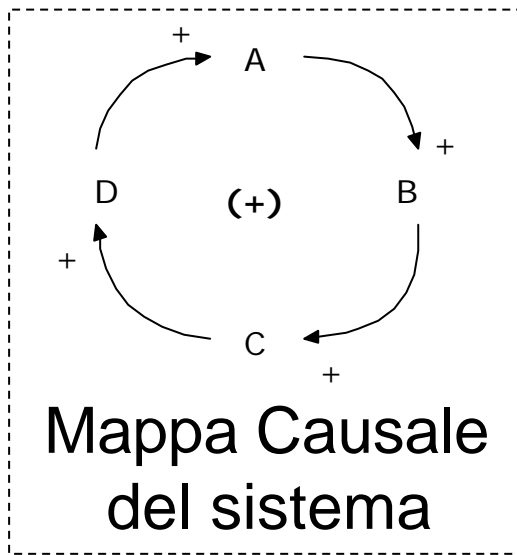
La mappa causale

- Rappresentazione della struttura retroattiva
- Non può essere usata istantaneamente per determinare il comportamento dinamico ...
- ... ma può essere utile per associare ad una struttura un'evoluzione dinamica nota
→ *vedi archetipi*

Approccio qualitativo

Prospettiva sistemica

Prospettiva dinamica



archetipo

AGENDA

- Introduzione
- Principi base della System Dynamics
- Prospettive di analisi
 - PROSPETTIVA SISTEMICA
 - PROSPETTIVA DINAMICA
- Altro principio base della System Dynamics
 - ACCUMULI E FLUSSI
- Altra prospettiva di analisi
 - PROSPETTIVA STRUTTURALE

PROSPETTIVA DINAMICA

Tipi di Sistemi:

- Sistemi Statici
- Sistemi Iperstatici
- Sistemi dinamici

Esempi di ambiti diversi:

- Chimica
- Fisica
- Meccanica
- Idraulica
- Elettronica

EVENTI ...



Livello del magazzino
al tempo t



al tempo $t+1$

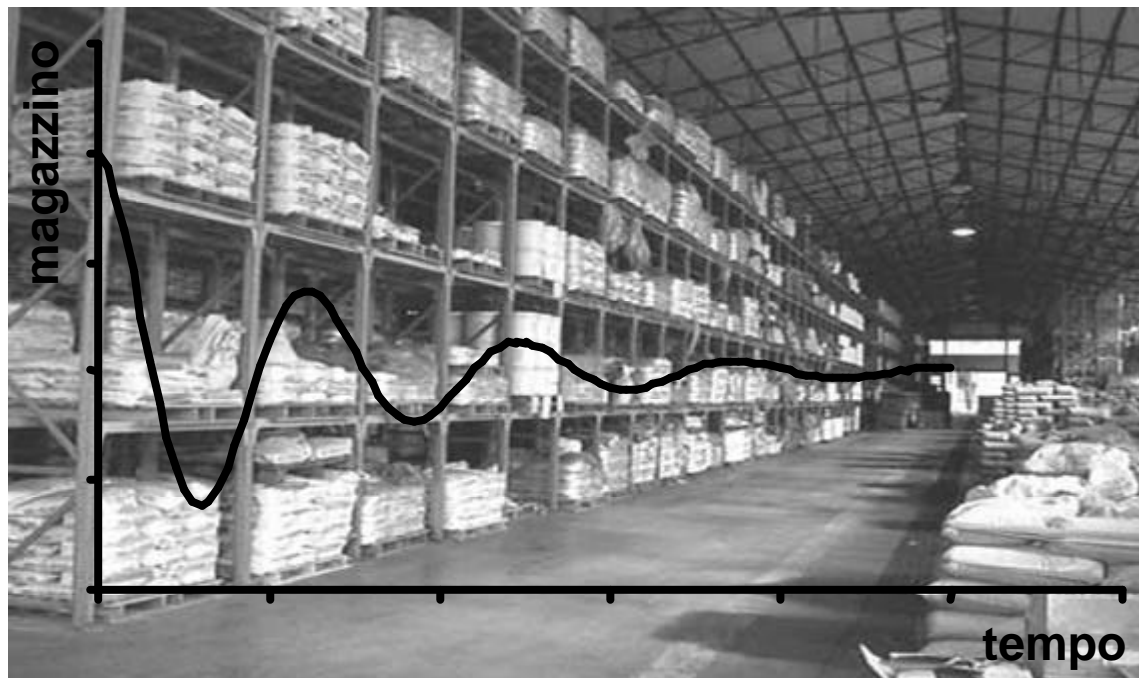


al tempo $t+2$

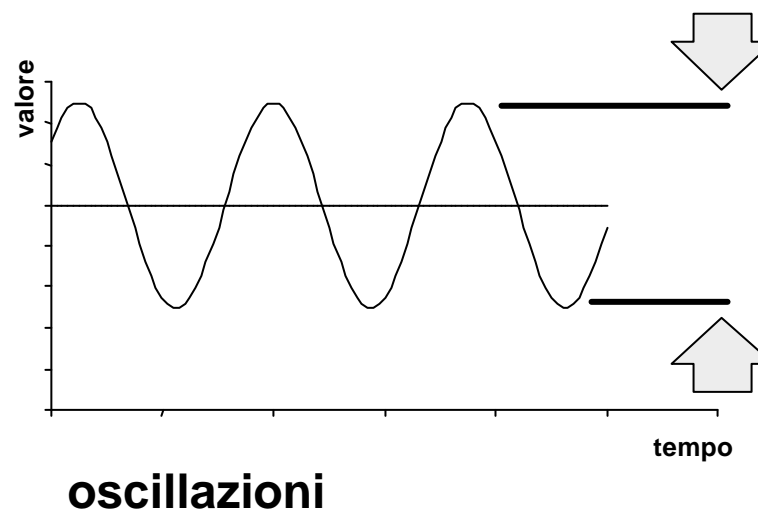
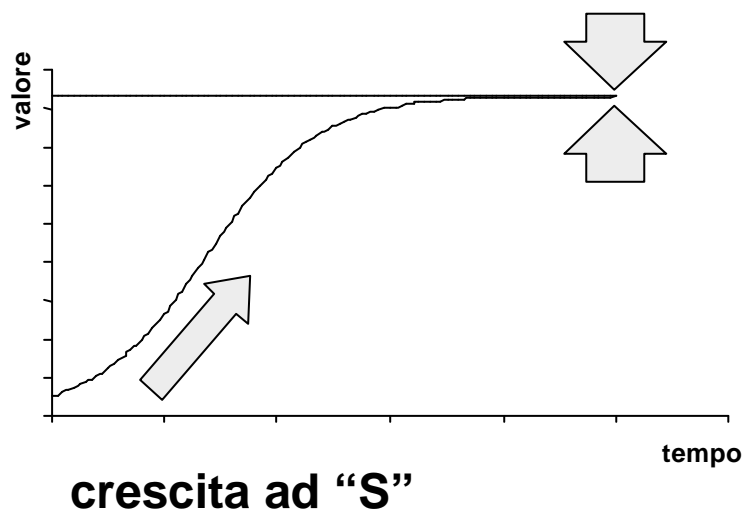
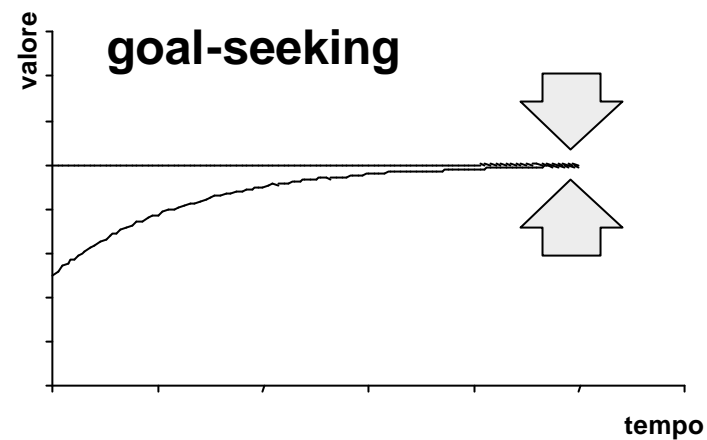
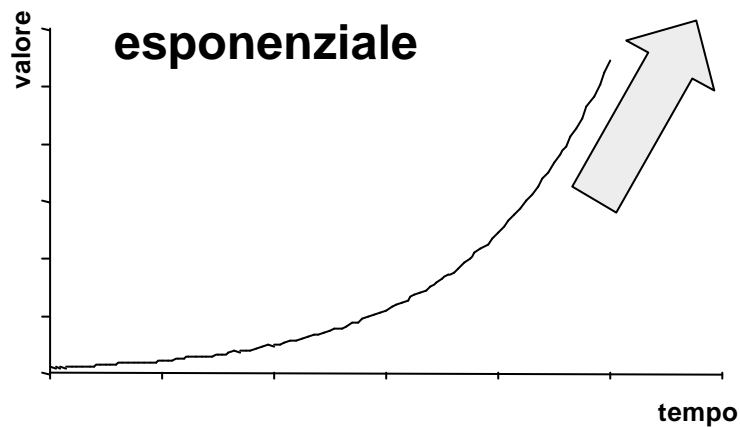


al tempo $t+3$

... ed EVOLUZIONI TEMPORALI



SINTESI COMPORTAMENTI FONDAMENTALI



ARCHETIPI

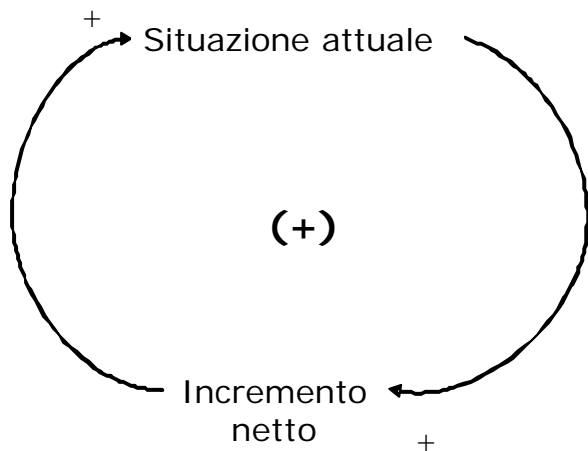
L'***archetipo*** è una struttura retroattiva generica, illustrata da una mappa causale, che è associata ad un comportamento fondamentale.

L'archetipo rappresenta un fenomeno che compare frequentemente nella realtà.

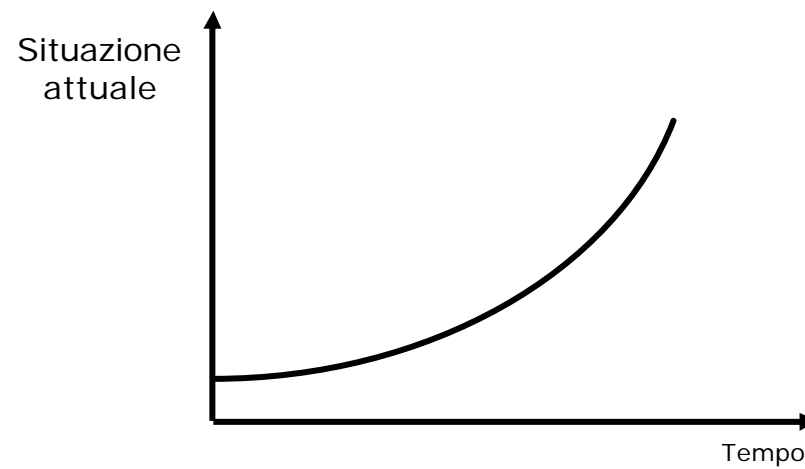
Ne descriveremo 4

Primo archetipo : “*auto-rafforzamento*”

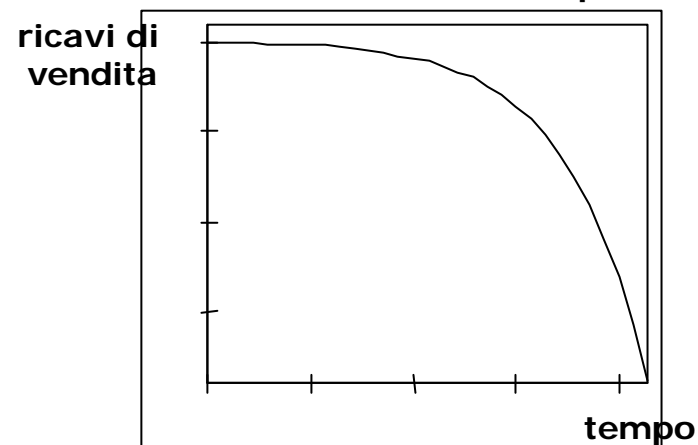
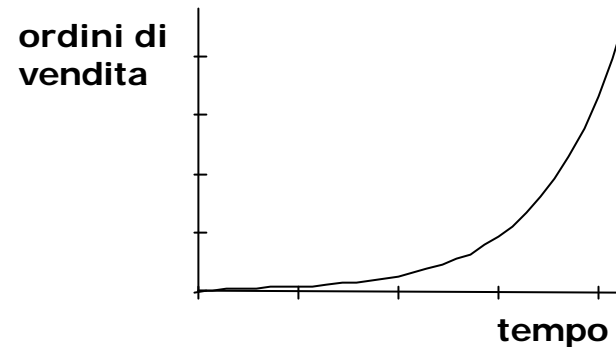
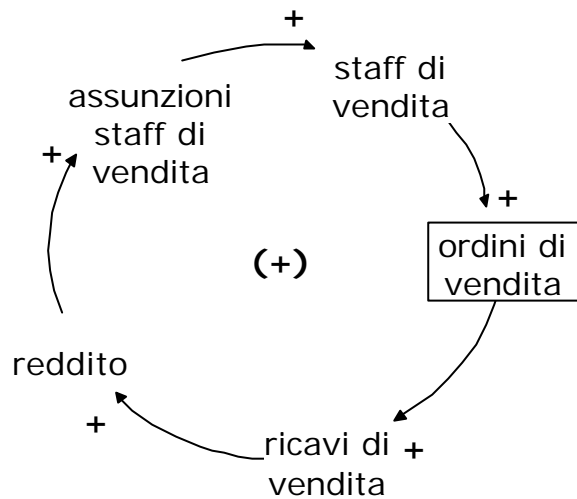
Prospettiva
sistemica



Prospettiva
dinamica



Esempio di archetipo “*auto-rafforzamento*”

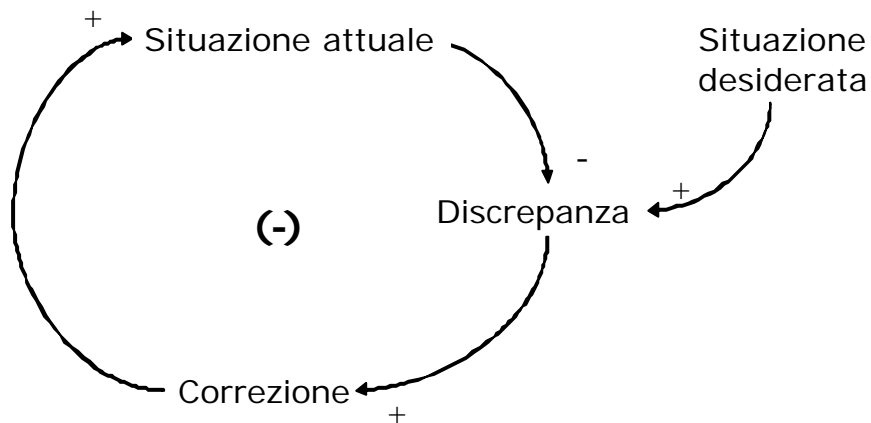


Altri esempi:

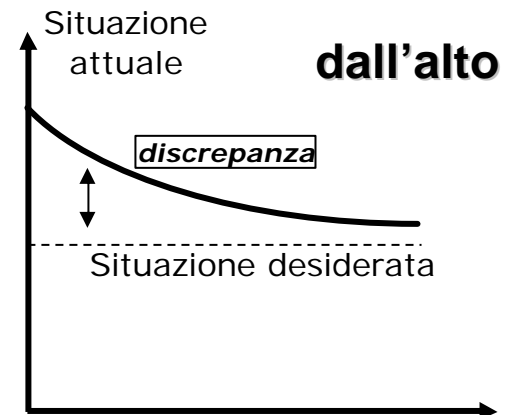
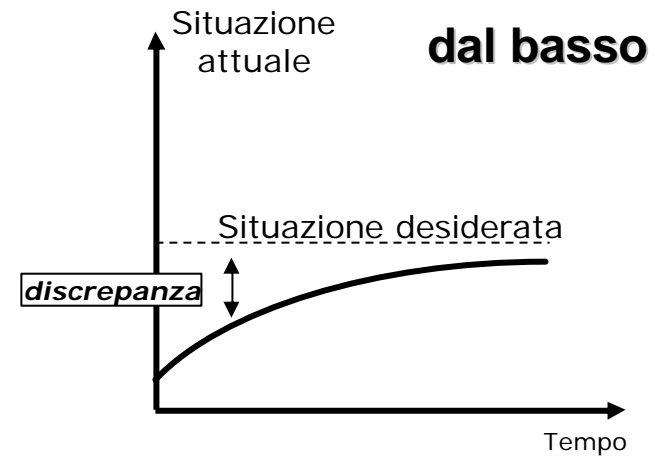
- Popolazione mondiale
- Velocità dei processori

Secondo archetipo : “*auto-bilanciamento*”

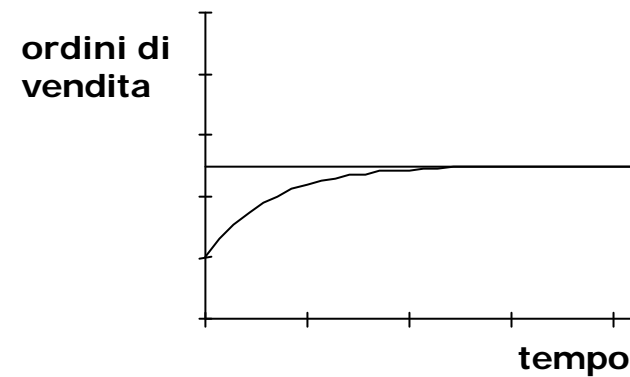
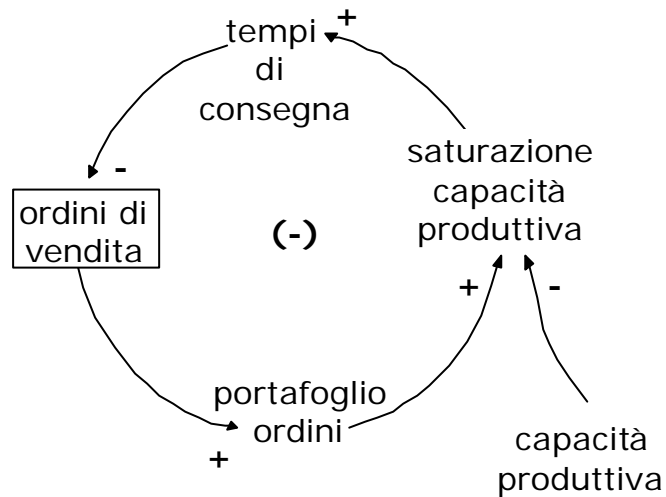
Prospettiva sistemica



Prospettiva dinamica



Esempio di archetipo “*auto-bilanciamento*”



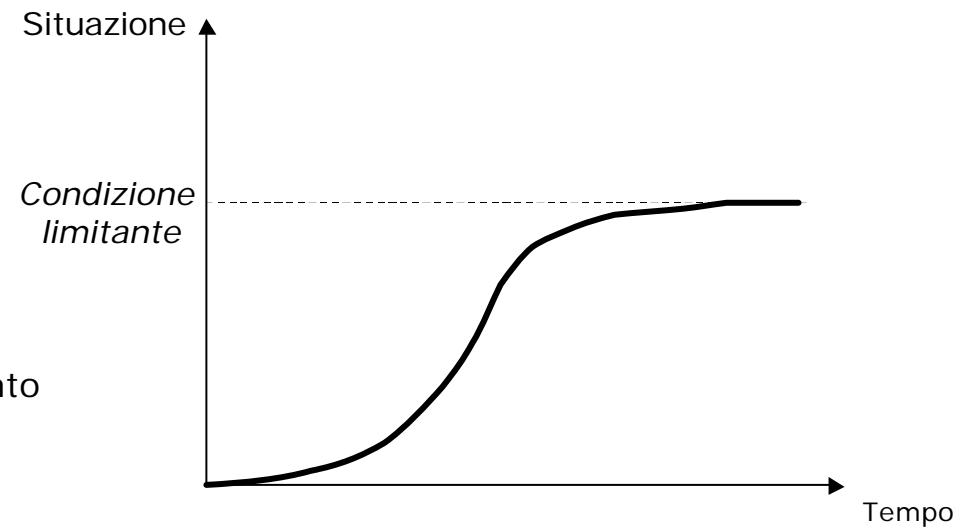
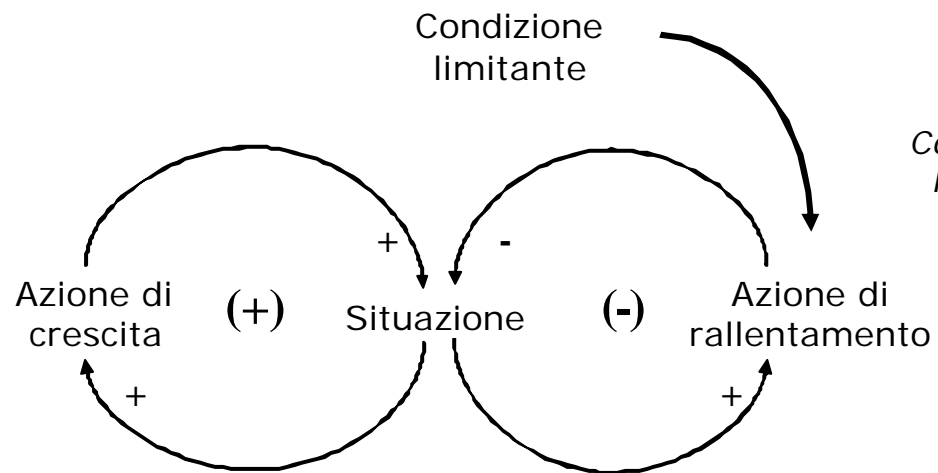
Altri esempi:

- Numero incidenti/(auto x km)
- Difettosità nei processi produttivi

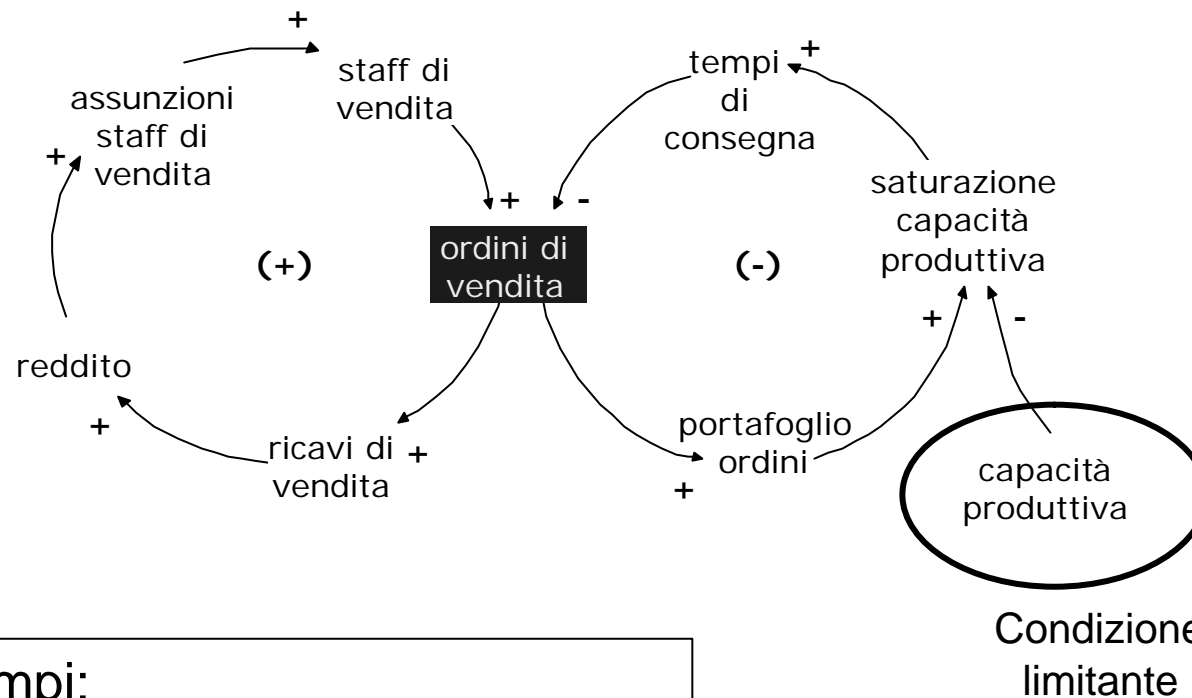
Terzo archetipo : “*limiti alla crescita*”

Prospettiva
sistemica

Prospettiva
dinamica

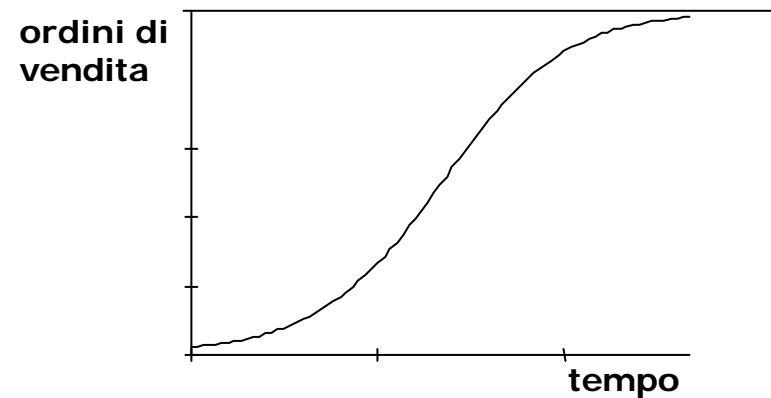


Esempio di archetipo “*limiti alla crescita*”



Altri esempi:

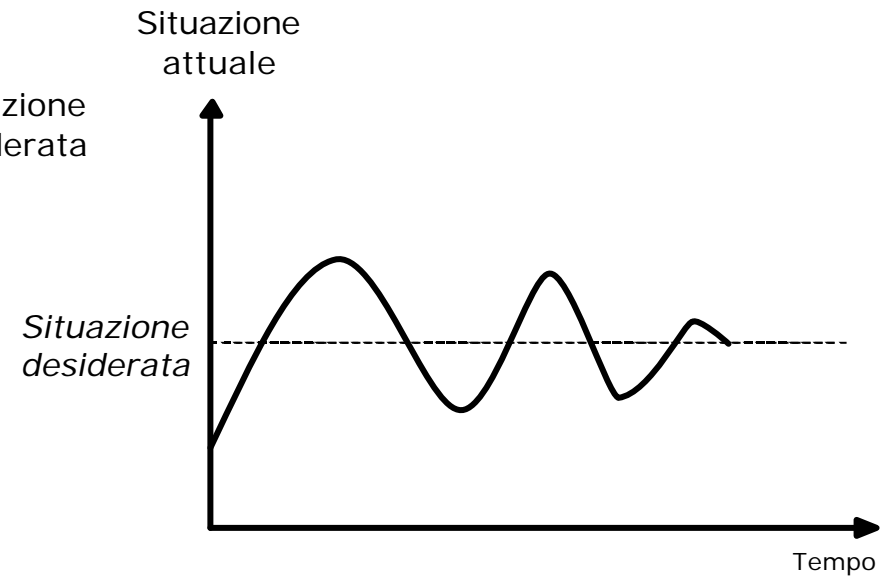
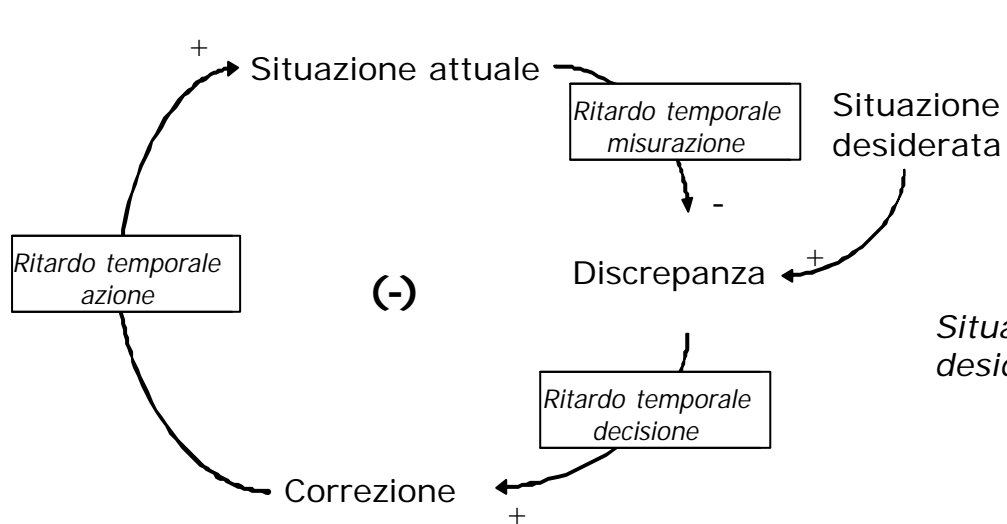
- Crescita vegetali
- Numerosità interventi pacemaker
- Sottoscrizioni a nuovi servizi (cellulari)



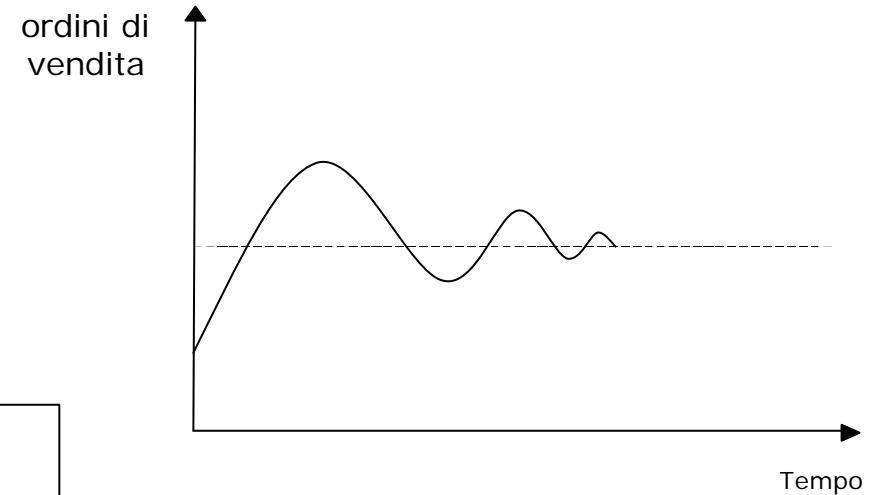
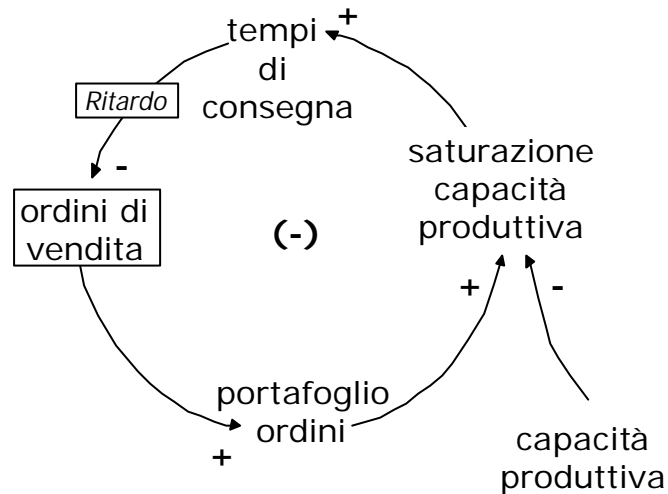
Quarto archetipo : “processo di riequilibrio con ritardo”

Prospettiva sistemica

Prospettiva dinamica



Esempio di archetipo “processo di riequilibrio con ritardo”

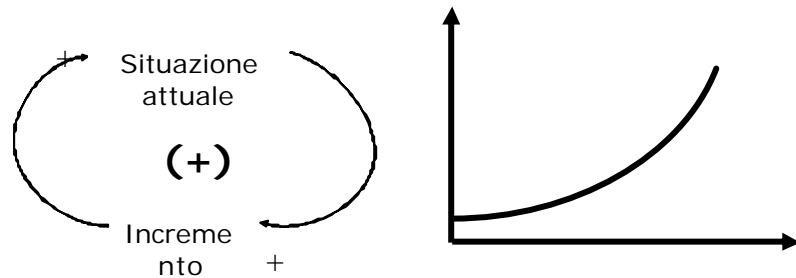


Altri esempi:

- Pendolo
- Inesperienza del fenomeno (neopatentati, nuovi business,...)

SINTESI Archetipi

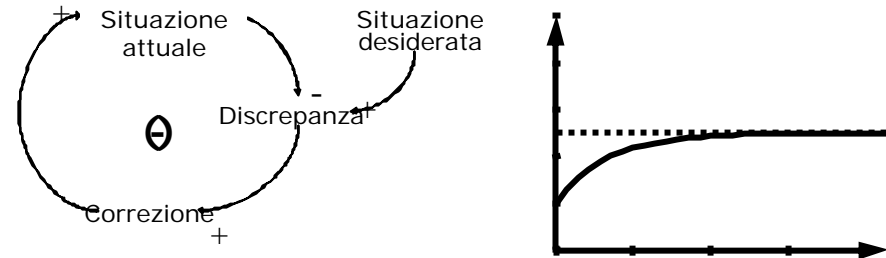
Auto-rafforzamento



Circolo positivo

esponenziale

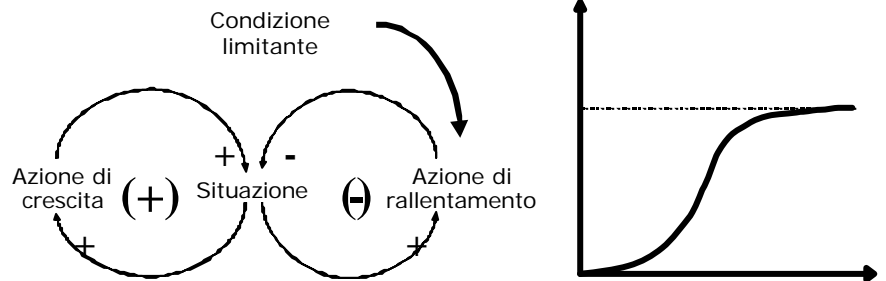
Auto-bilanciamento



Circolo negativo

goal-seeking

Limiti alla crescita

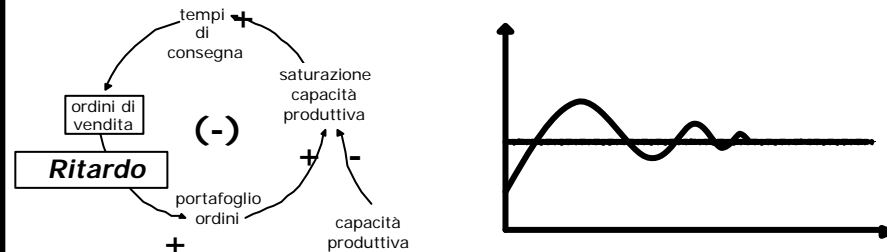


Circolo positivo

Circolo negativo

crescita ad "S"

Riequilibrio con ritardo



Circolo negativo

oscillazioni

LIMITI delle mappe causali

- Impossibilità di determinare il comportamento del sistema dalla sola osservazione della mappa causale che lo rappresenta
- Non si distingue tra i diversi tipi di variabili
- Non sono specificate le formule che legano le variabili

AGENDA

- Introduzione
- Principi base della System Dynamics
- Prospettive di analisi
 - PROSPETTIVA SISTEMICA
 - PROSPETTIVA DINAMICA
- Altro principio base della System Dynamics
 - ACCUMULI E FLUSSI
- Altra prospettiva di analisi
 - PROSPETTIVA STRUTTURALE

TIPI DI VARIABILI

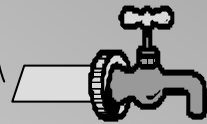


VARIABILI

- ***ACCUMULI***
- ***FLUSSI***
- ***AUSILIARIE***
- ***COSTANTI***

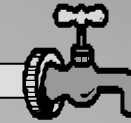
ACCUMULI E FLUSSI – metafora idraulica

FLUSSO
ENTRANTE



Variabile
di flusso

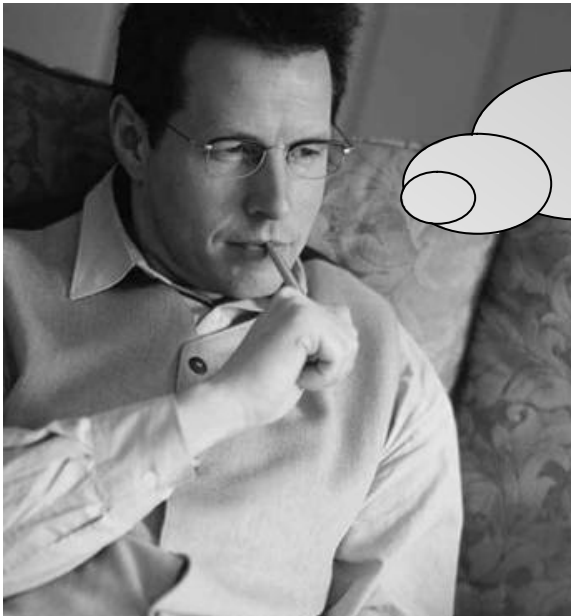
FLUSSO
USCENTE







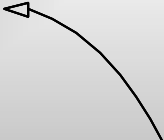
Variabile
di flusso

Variabile di
accumulo

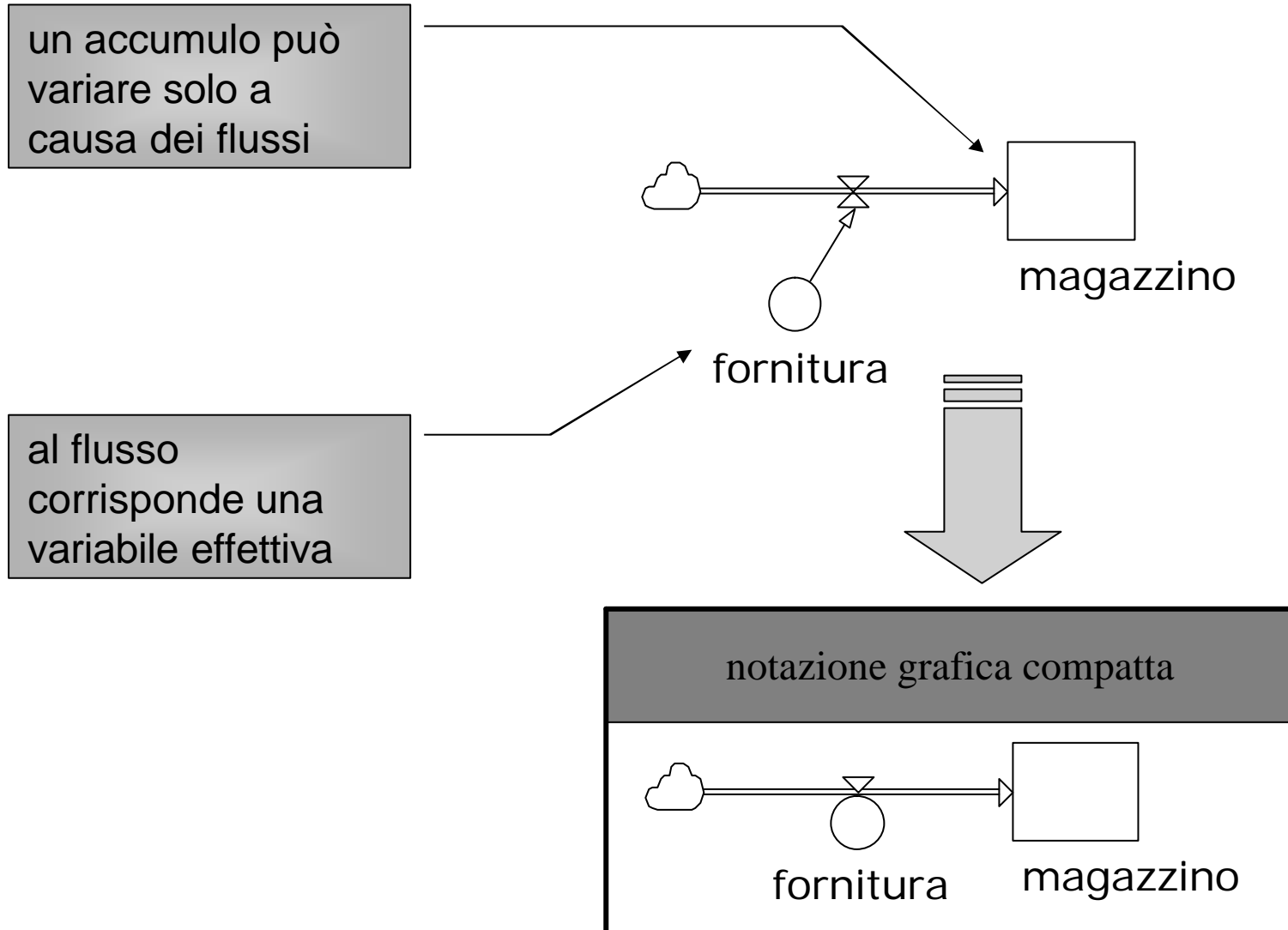
ACCUMULO



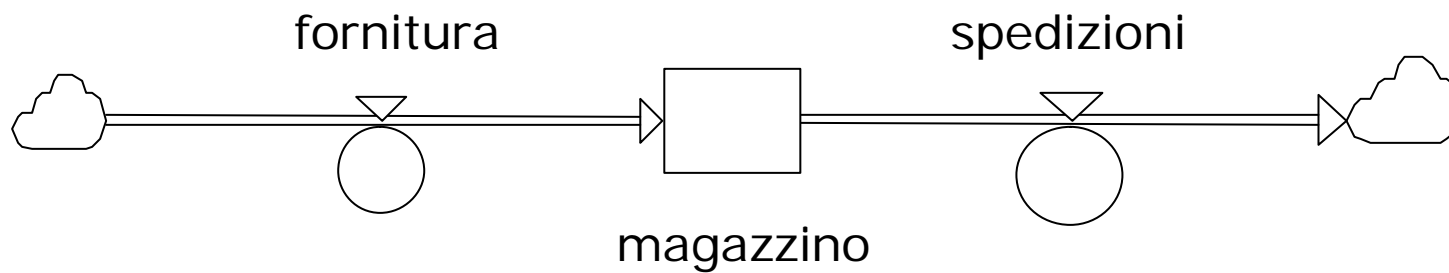
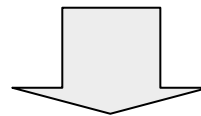
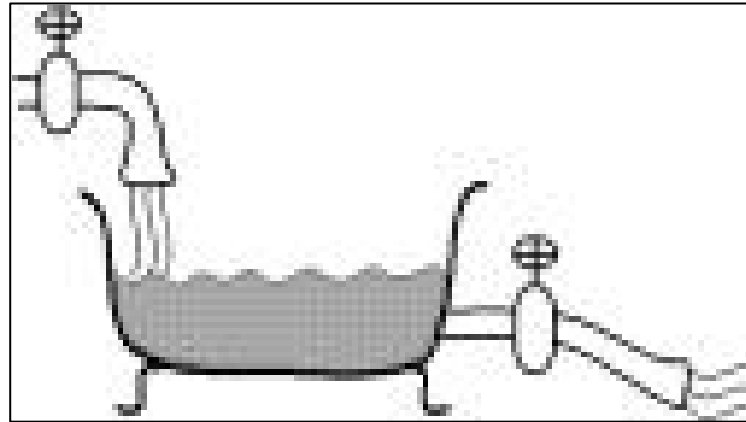
ACCUMULI E FLUSSI – notazioni grafiche e definizione

SIMBOLO	SIGNIFICATO
 Accumulo	Variabile di accumulo Il suo valore si modifica in base all'entità dei flussi.
 Ausiliaria	Variabile ausiliaria generica Il suo valore è determinato da un'equazione algebrica.
 Costante	Variabile ausiliaria costante Il suo valore non cambia nel tempo.
	Link di flusso Simbolo che identifica la direzione dei flussi.
	Link informazione Rappresenta la relazione causale tra due variabili.

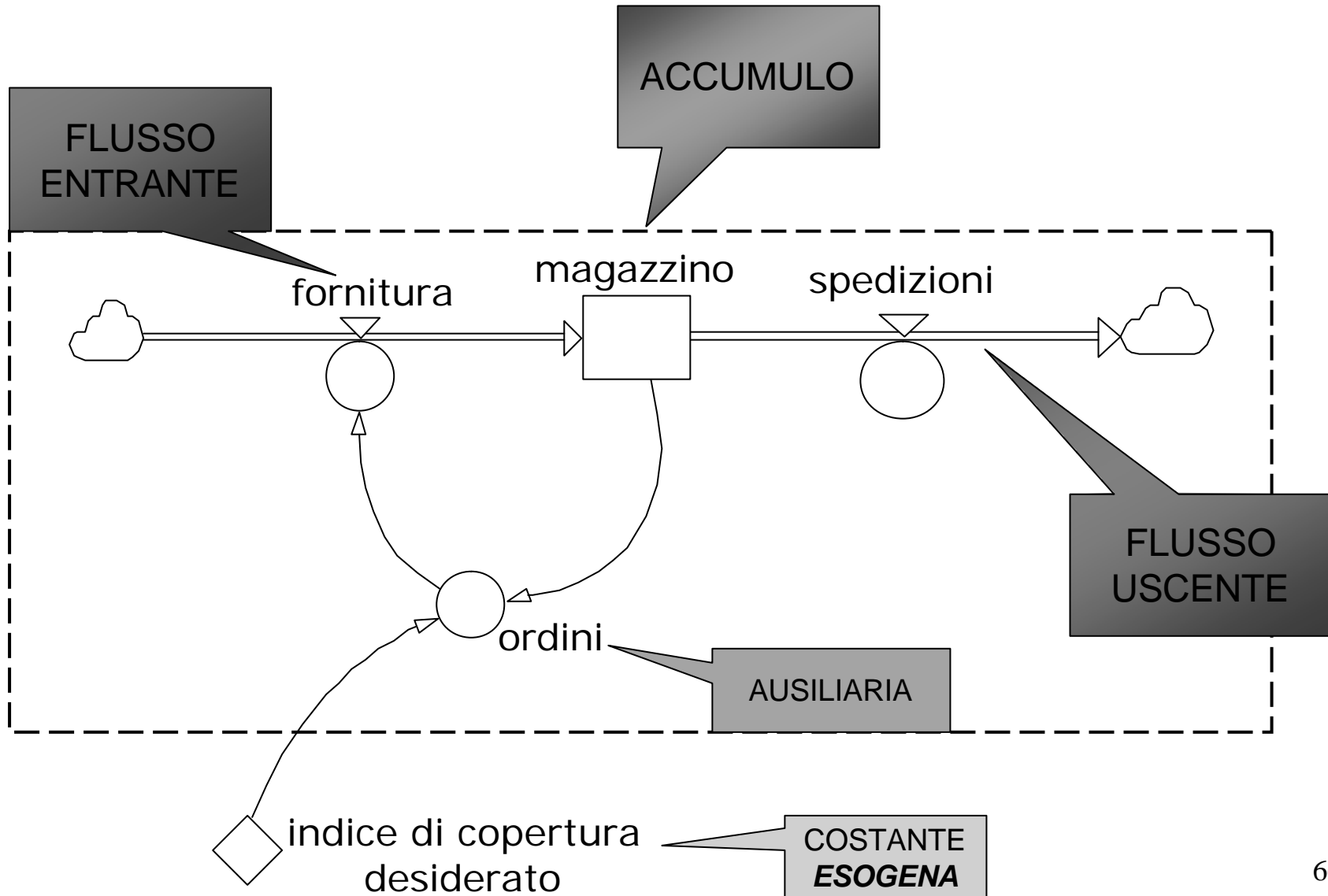
ACCUMULI E FLUSSI – uso delle notazioni grafiche



ACCUMULI E FLUSSI – la metafora idraulica ... strutturata

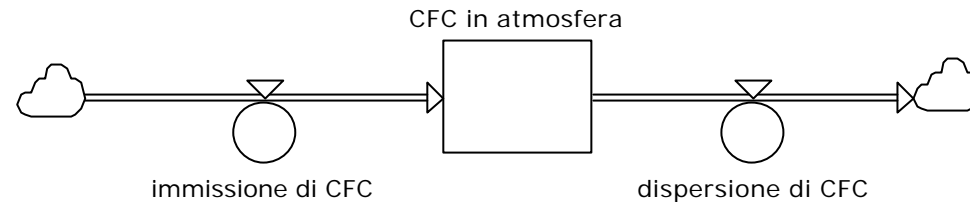


ACCUMULI E FLUSSI – il magazzino

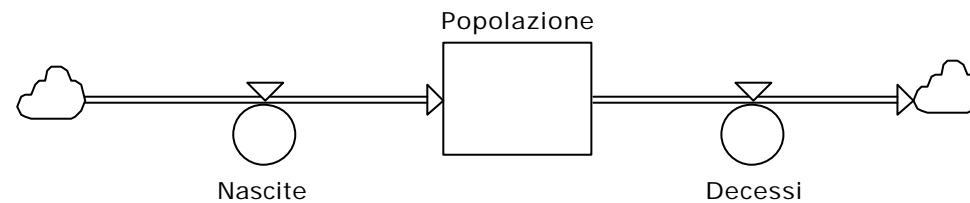


Altri esempi di “protostrutture”

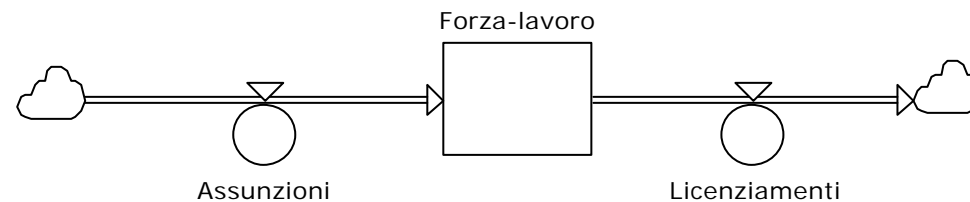
Protostruttura di un accumulo in campo ambientale



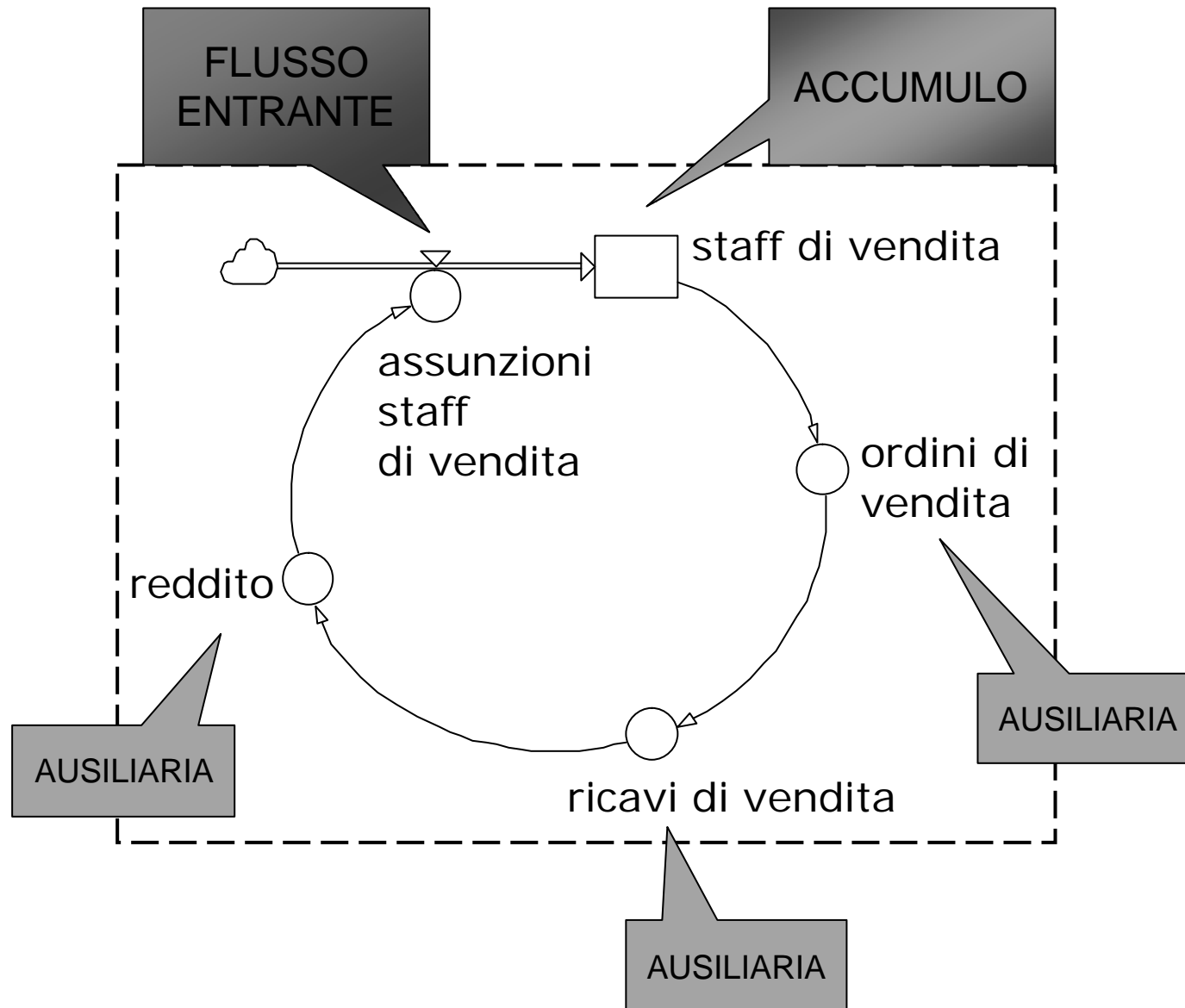
Protostruttura di un accumulo in campo sociale



Protostruttura di un accumulo in campo aziendale – settore RU



ACCUMULI E FLUSSI – le vendite



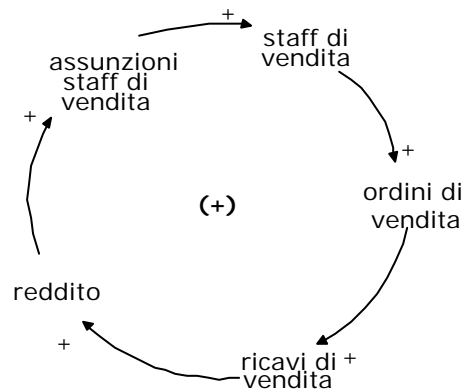
AGENDA

- Introduzione
- Principi base della System Dynamics
- Prospettive di analisi
 - PROSPETTIVA SISTEMICA
 - PROSPETTIVA DINAMICA
- Altro principio base della System Dynamics
 - ACCUMULI E FLUSSI
- Altra prospettiva di analisi
 - PROSPETTIVA STRUTTURALE

Approccio quantitativo

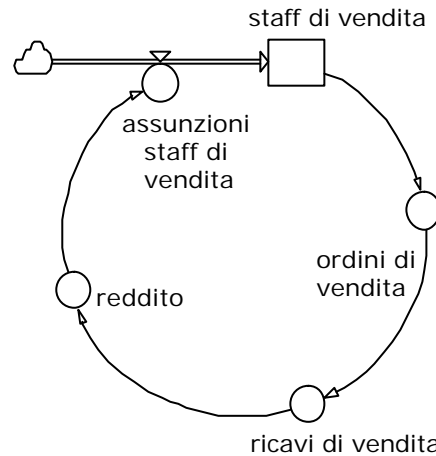
Prospettiva sistemica

Mappa Causale



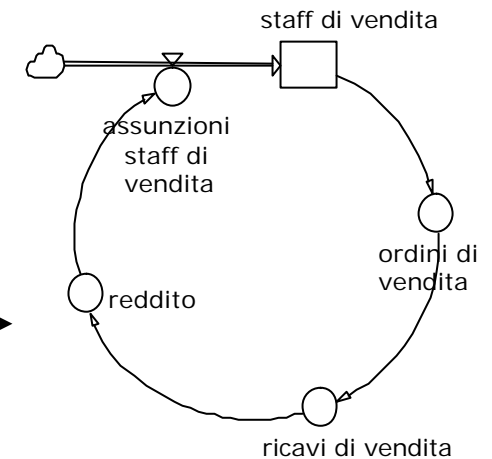
Prospettiva strutturale

Mappa Strutturale



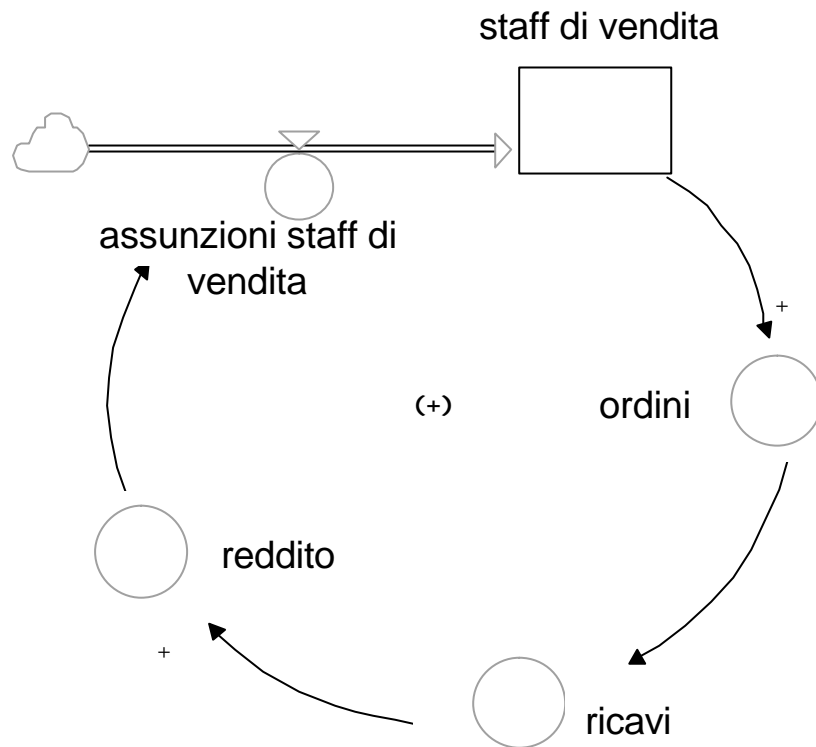
Prospettiva dinamica

Modello di Simulazione

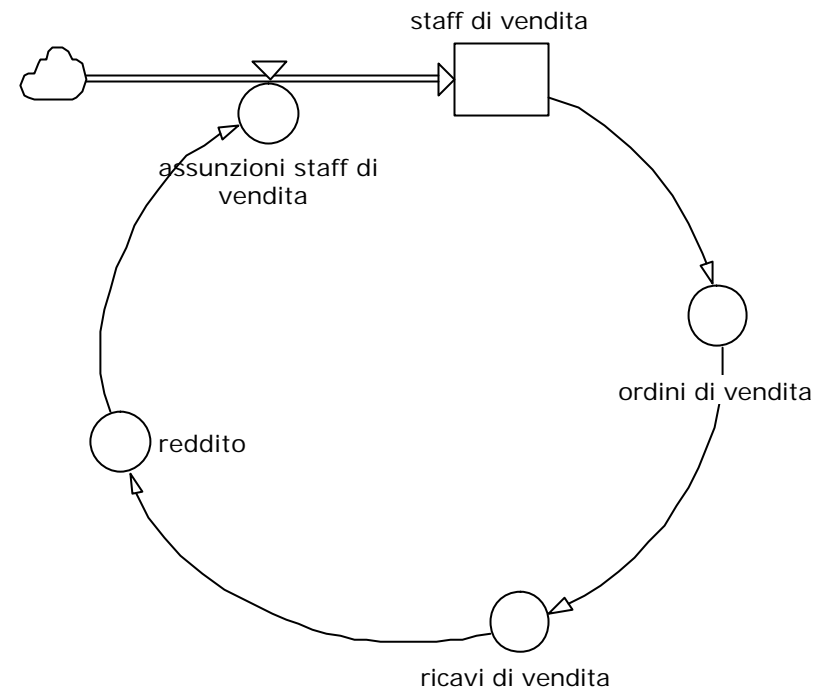


$$\left\{ \begin{array}{l} \text{staff}(t_1) = \text{staff}(t_0) + \int \text{assunzioni}(t) dt \\ \text{ricavi} = \text{ordini} \cdot \text{prezzo} \\ \text{assunzioni} = (\% \text{ invest. staff}) \cdot \text{reddito} \\ \dots \end{array} \right.$$

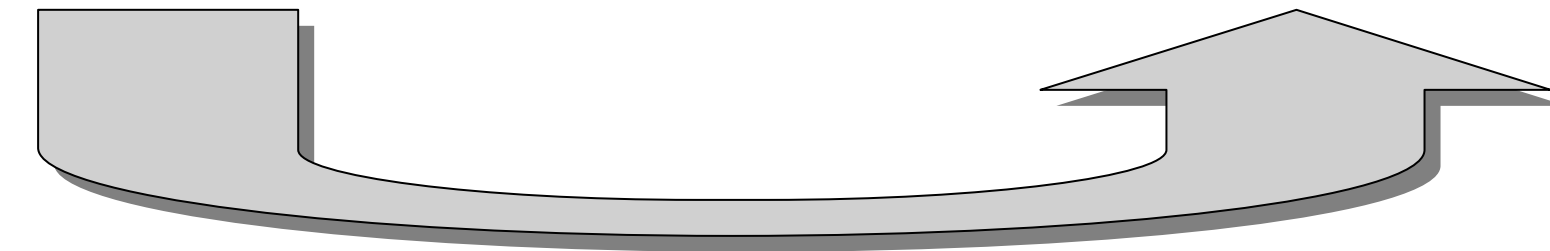
Dalla mappa causale alla mappa strutturale



dalla mappa causale...

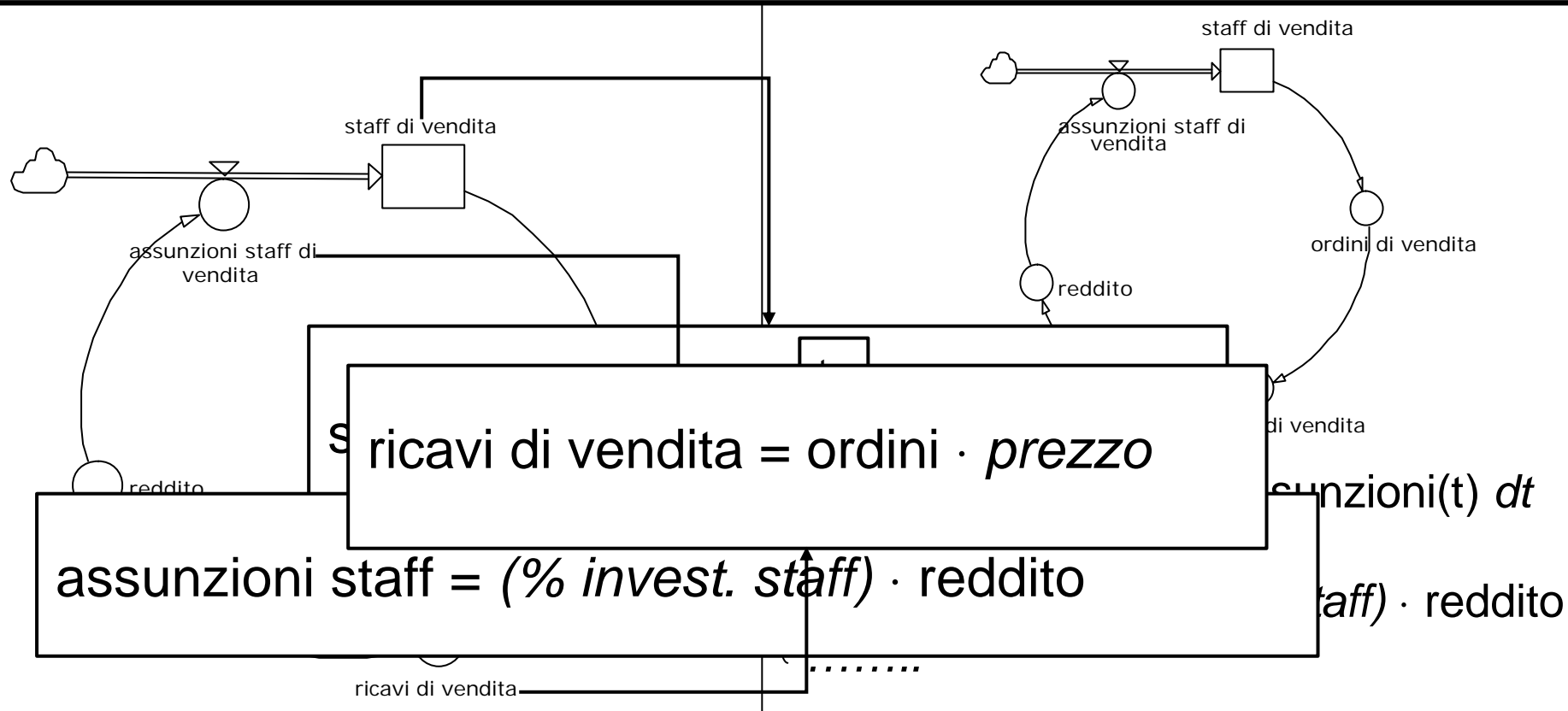


... alla mappa strutturale



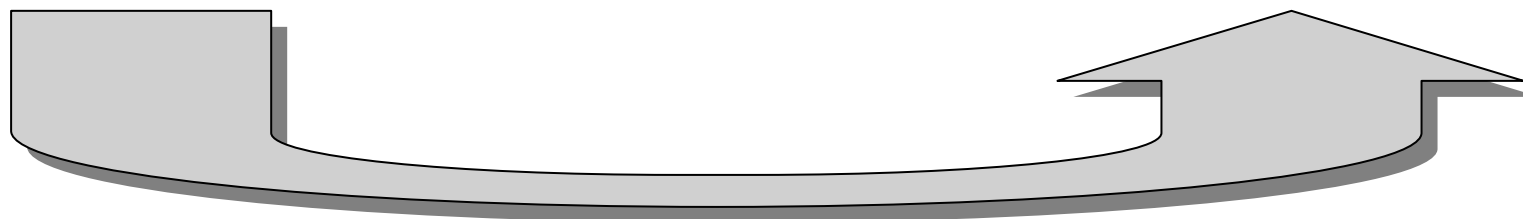
... RICONOSCENDO ACCUMULI, FLUSSI, COSTANTI E AUSILIARIE ...

Dalla mappa strutturale al modello di simulazione



dalla mappa strutturale ...

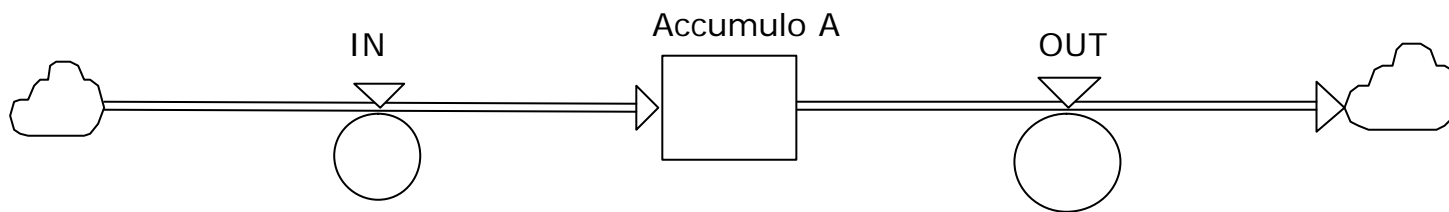
... al modello di simulazione



... ESPLICITANDO QUANTITATIVAMENTE LE RELAZIONI ...

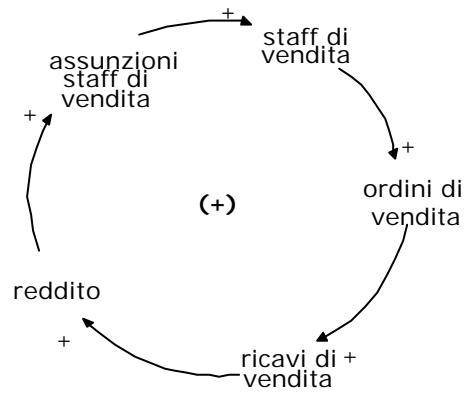
In particolare l'equazione per ogni accumulo sarà del tipo :

$$A(t_1) - A(t_0) = \int_{t_0}^{t_1} A'(t) dt = \int_{t_0}^{t_1} [IN(t) - OUT(t)] dt$$

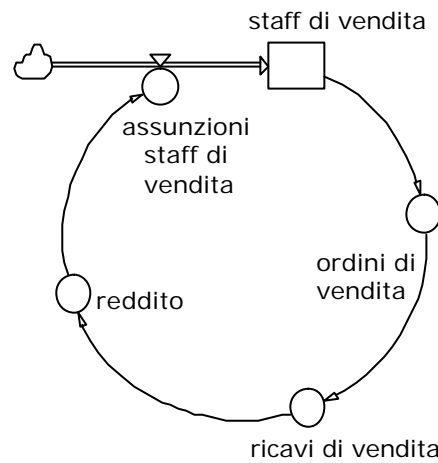


Riassumendo ...

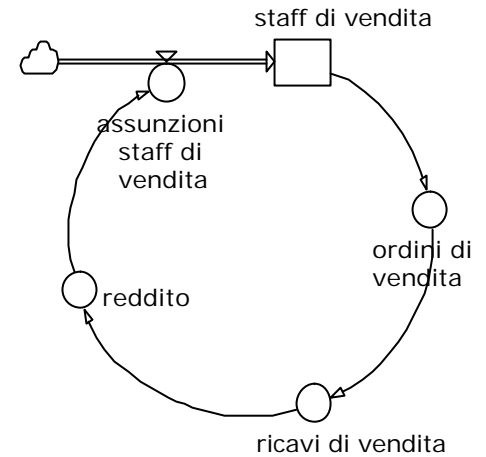
Mappa Causale



Mappa Strutturale



Modello di Simulazione



$$\left\{ \begin{array}{l} \text{staff}(t_1) = \text{staff}(t_0) + \int \text{assunzioni}(t) dt \\ \text{ricavi} = \text{ordini} \cdot \text{prezzo} \\ \text{assunzioni} = (\% \text{ invest. staff}) \cdot \text{reddito} \\ \dots \end{array} \right.$$

+

Accumuli e Flussi

+

Equazioni di struttura