

SVILUPPO PROGETTAZIONE E GESTIONE DEI SISTEMI COMPLESSI

Attività della Commissione dei Sistemi Complessi dell'Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma

Marco Regi, Francesco Sintoni, Michele Nava

e-mail: marco.regi@tiscali.it, f.sintoni@alice.it; michelenava510@hotmail.it

SOMMARIO/ABSTRACT

Il presente articolo tratta e analizza i principali aspetti dei Sistemi Complessi. Il termine può apparire contemporaneamente sia semplicistico che ridondante, ma in realtà non lo è. Infatti, un qualsiasi Sistema Ingegneristico, dovendo rispondere ad una serie di requisiti e fornire prestazioni efficienti e sicure, presenta un notevole grado di complessità. Inoltre, esiste un processo strutturato e articolato, che va dalle esigenze di un potenziale utilizzatore, al *design*, alla realizzazione, alla logistica fino ad arrivare alla dismissione finale. Il tutto accompagnato da un fattore parallelo, ma altrettanto importante, che è quello del *business* e *management*: aspetti, questi, ampiamente discussi e analizzati all'interno del lavoro.

Quindi, la parola "Complesso" diventa il termine attraverso il quale, a questo punto, effettivamente in qualche modo semplificativo e riduttivo si vuole esplicitare tutto l'universo che sta dietro un apparato, dispositivo ingegneristico/tecnologico o impianto.

Ci sono due aspetti ulteriori che vanno considerati. Il primo è che intrinsecamente nel tempo ogni Sistema diventa più prestazionale, più capacitivo, più efficiente e, quindi, di fatto più Complesso, ma, secondo, lo diventa anche il contesto economico, politico, sociale all'interno del quale il prodotto si colloca.

L'ultima parte dell'articolo è dedicata, infine, all'analisi dei potenziali e possibili scenari futuri dei Sistemi Complessi.

Parole chiave: *Sistemi Complessi, Business e Management, Processi Evolutivi*

Introduzione

Un *Sistema Complesso* è un'entità nella quale molteplici assieme sono interconnessi fra loro e con il mondo esterno attraverso una serie d'interazioni di cui non se ne può prevedere uno stato futuro.

Il filosofo francese **Edgar Morin** sostiene che "*nei Sistemi Complessi l'imprevedibilità e il paradosso sono sempre presenti ed alcune cose rimarranno sconosciute*" e che "*la complessità è una **parola-problema** e non una **parola-soluzione***".

Aristotele afferma che "il tutto è maggiore della somma delle parti".

Da qui si capisce che maggiore è la quantità e la varietà delle relazioni fra gli elementi di un Sistema, maggiore è la sua complessità.

Un'altra caratteristica di un Sistema Complesso è che può produrre un comportamento così detto **emergente**, cioè un comportamento complesso non prevedibile e non desumibile dalla semplice sommatoria degli elementi che lo compongono (non linearità e sovrapposizione degli effetti). Quindi, un Sistema non-lineare è tanto più complesso quanto maggiori sono i parametri necessari per la sua descrizione.

Dunque, la complessità non è una sua proprietà intrinseca del Sistema, ma è un attributo che si riferisce sempre ad una sua descrizione. Essa è, quindi, legata sia al modello utilizzato nella descrizione, sia alle variabili indipendenti.

Esistono le "**teorie della complessità**" il cui scopo è studiare, capire e predire il comportamento dei Sistemi Complessi (caratterizzati tanto da elementi numerosi – e diversi tra loro – quanto da connessioni interattive numerose e non lineari).

Esistono i **Sistemi Complessi Adattativi (CAS – Complex Adaptive Systems)**, cioè Sistemi Complessi in grado di adattarsi e cambiare in seguito all'esperienza (gli organismi viventi ne sono un esempio in quanto caratterizzati dalla capacità di evoluzione adattativa), che, come tali, quindi, diventano autonomamente dinamici.

Il comportamento globale del Sistema Complesso non può essere compreso a partire dai singoli elementi che lo compongono e che interagiscono fra loro. Va però osservato che l'interazione tra i singoli elementi determina il comportamento assoluto che definisce la proprietà complessiva di Sistema. Essa è denominata **Comportamento Emergente**, nel senso che dalle interazioni dei singoli componenti

del sistema emerge un "**comportamento globale**" non definibile dallo studio dei singoli sottoassiemi. Ritornando ai Sistemi Complessi Adattivi (CAS) va evidenziato come la loro caratteristica dinamica ne permette un'auto-organizzazione attraverso l'interazione non lineare dei suoi elementi costituenti, che dà luogo a comportamenti globali difficilmente "modellizzabili". Alcuni esempi di CAS sono:

- le comunità di persone interagenti nel traffico
- il cervello umano
- i sistemi biologici.

È assolutamente interessante osservare come il comportamento di un Sistema Ingegneristico potrebbe essere modellato e rappresentato per analogia attraverso quello di uno fisico/biologico. La proprietà auto – organizzatrice è sfruttata in varie applicazioni pratiche, come, ad esempio, le reti radio militari e i sistemi anti-intrusione delle reti informatiche.

La complessità è, inoltre, fortemente legata al caos (i sistemi caotici sono considerati complessi, sebbene abbiano pochi gradi di libertà). La capacità ad operare/funzionare/performare in ambienti fortemente indeterminati (ovvero caotici) dipende da una forma di raggiungimento del **confine del caos**, cioè quello stato dove si massimizzano le possibilità di evoluzione e adattabilità alle condizioni esterne ed interne, cioè dal mettersi in una ipotetica posizione di equilibrio tra l'eccessivo ordine (staticità assoluta) e un totale disordine (dinamismo casuale). Questo viene definito **Spazio delle possibilità**, poiché è l'insieme degli stati in cui un CAS può arbitrariamente o meno scegliere di persistere all'interno di più comportamenti e configurazioni alternative possibili. È in questo particolare stato, infatti, che questi Sistemi diventano e agiscono di fatto in maniera complessa e adattiva (una sorta di "creatività"), realizzando evoluzioni grazie alle proprie peculiari capacità di apprendimento e adattamento. Tale **evoluzione complessa** è caratterizzata da un cambiamento discontinuo e impreveduto, che si svolge secondo una dinamica detta **biforcazione**.

In questo tipo di evoluzione il cambiamento avviene in maniera improvvisa: il Sistema raggiunge un punto critico in corrispondenza del quale può risultare fortemente instabile e il suo comportamento futuro è puramente randomico. La destabilizzazione del Sistema può verificarsi a causa di due fattori, forti perturbazioni provenienti

dall'esterno o variazioni interne allo stesso che avvengono in maniera più o meno graduale. È impossibile di una **biforcazione** prevederne la tempistica e l'esito: il Sistema può stabilizzarsi ma allo stesso modo tornare allo stato di partenza, o addirittura assumere nuovi stati/configurazioni completamente diversi. La particolarità di questo tipo di dinamica evolutiva è che il risultato finale può non essere necessariamente un'ottimizzazione del Sistema o un suo miglioramento, ma anche una regressione o nel peggiore dei casi la sua inutilizzabilità.



fig. 1 – rete di neuroni (esempio di Sistema Complesso naturale Evolutivo a livello microscopico)

La gestione del Sistema Complesso costruirà, quindi, l'elemento centrale per un suo impiego efficiente, così come risulterà evidente dalla lettura di prossimi paragrafi.

I Sistemi Complessi

Oggi giorno la realizzazione di un progetto è qualcosa che richiede l'intervento e la collaborazione di molteplici aree scientifiche, perché i Sistemi stanno diventando sempre più "tecnologici", il che si traduce in un aumento di complessità degli stessi.

Quando si parla di Sistema Complesso, per **complessità** si intende il numero e il tipo di relazioni tra gli elementi del sistema.

Basti pensare alle grandi moderne opere tecnologiche, dal Boeing 787 tutto in composito alle missioni spaziali, in cui sono coinvolti un gran numero di discipline e una molteplicità di figure umane (scienziati, ingegneri, matematici, fisici, etc). Necessariamente per portare avanti Progetti e Sistemi di elevata complessità è fondamentale la collaborazione interdisciplinare e fra le varie industrie. Tuttavia, ogni disciplina e ogni industria hanno i propri metodi, i propri software di sviluppo, il proprio hardware, i propri ingegneri, e così via.

In un progetto tutti questi elementi lavorano bene fin quando si richiede loro di rimanere confinati nella propria disciplina, ma se il progetto assume un carattere interdisciplinare e di collaborazione inter-

industriale, sarà necessario un interfacciamento e un coordinamento tra le varie discipline ed industrie coinvolte. E quando si parla di diverse discipline, ci si riferisce non solo alle aree del *management*, tecnica, *marketing* e così via, ma all'interno di una delle stesse, ad esempio, l'area tecnica, alle diverse specializzazioni scientifiche in essa allocate.

Il **Systems Engineering** è una prospettiva, un processo e una professione, come illustrato dalle tre definizioni qui di seguito riportate [1] [2] [3]:

1) *Il Systems Engineering è una disciplina che si concentra sulla progettazione ed applicazione del tutto (il Sistema) come distinto dalle sue parti. Esso implica il guardare un problema nella sua interezza, tenendo conto di tutte le sfaccettature e tutte le variabili, e relazionando l'aspetto sociale a quello tecnico.* (definizione di Simon Ramon, un ingegnere americano che è stato anche a capo di diverse aziende statunitensi)

2) *Il Systems Engineering è un processo iterativo di sintesi top-down, sviluppo e operazione di un sistema reale che soddisfa, in modo vicino all'ottimo, la gamma completa di requisiti per il sistema.* (definizione di Howard Eisner, l'autore del libro "Essentials of Project and Systems Engineering Management")

3) *Il Systems Engineering è un approccio interdisciplinare ed un insieme di metodi per consentire la realizzazione di Sistemi con esito positivo. Esso si focalizza sulla definizione dei fabbisogni del cliente e delle funzionalità richieste all'inizio del ciclo di sviluppo, sulla documentazione dei requisiti, procedendo successivamente con la sintesi di progettazione e la validazione del Sistema, in considerazione del problema nel suo complesso: funzionamento, costo e tempistica, prestazioni, addestramento e supporto, test, realizzabilità e dismissione. Il Systems Engineering considera sia le esigenze commerciali sia quelle tecniche di tutti i clienti con l'obiettivo di fornire un prodotto di qualità che soddisfi le esigenze dell'utente.* (definizione di INCOSE - **International Council On Systems Engineering**), un'associazione *no profit* fondata nel 1990 il cui scopo è di presentare lo stato dell'arte sulle pratiche dell'ingegneria dei Sistemi nelle industrie, nelle Accademie, e nei Governi, e promuovere gli approcci interdisciplinari per la produzione di soluzioni tecnologiche che soddisfino i bisogni della società).

Come si evince dalle tre definizioni, nonostante i termini sistemi (**systems**) e ingegneria (**engineering**) siano in generale ben noti, la loro combinazione ha

un significato diverso da quello che la logica umana potrebbe indurre a pensare.

Quindi, dall'unione delle due parole nasce il termine **ingegneria dei sistemi** (dall'inglese **Systems Engineering**), intesa come quella disciplina nata per descrivere i metodi atti a sviluppare Sistemi Complessi con successo.

L'Ingegneria dei Sistemi riguarda la definizione e la documentazione dei requisiti di Sistema nella fase iniziale di sviluppo, la preparazione del progetto, i test. Si occupa inoltre di pianificazione, creazione, prova, operazione, costi, supporto e ritiro del sistema.

L'Ingegneria dei Sistemi integra molteplici discipline e descrive un processo di sviluppo ben strutturato, **dal concetto del problema al prodotto finale come soluzione del problema**. In realtà essa è definita come una meta disciplina proprio perché riguarda l'intero processo, dall'idea per la creazione, allo sviluppo fino alla realizzazione, uso e ritiro del Sistema. Quindi, coinvolge sia l'aspetto tecnico sia quello economico, entrambi concorrenti allo sviluppo di un Sistema che soddisfi i bisogni e desideri dell'utente finale.

In fig. 1 vengono riportate alcune delle discipline coinvolte nell'Ingegneria dei Sistemi.

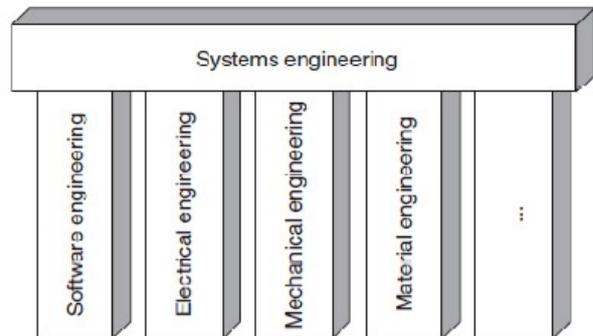


fig. 2 – il System Engineering

e in fig. 2 ne sono esplicitare le Operazioni caratteristiche.

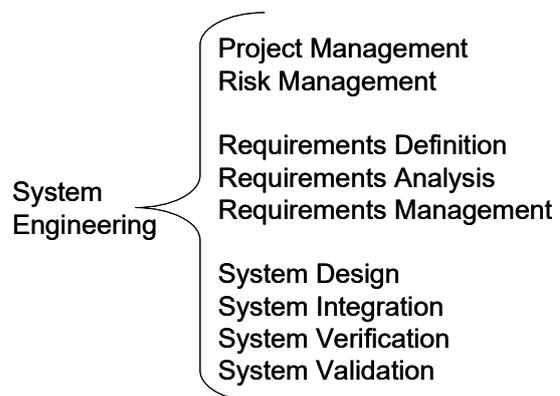


fig. 3 – operazioni caratteristiche del System Engineering

Dalle discipline e dalle operazioni svolte si evince che nei Sistemi Complessi le professionalità coinvolte sono molteplici e variegate; per questo motivo è fondamentale che vi sia una figura in grado di coordinare tutto, ovvero il **Project Manager** coadiuvato dal suo team, ed un'altra figura in grado di analizzare i rischi tecnici/finanziari/ambientali in ogni singola attività che cocorre a formare il sistema di sistemi.

Le attività successive elencate riguardano i Requisiti, ovvero l'insieme degli *statement* che *definiscono* cosa si vuole un Sistema faccia. A tali attività è necessario che segua l'analisi degli stessi per stabilirne la coerenza dal momento che in corso d'opera essi possono essere modificati per le motivazioni più varie come il *descoping* o il rafforzamento di alcune funzionalità.

Una volta definiti e gestiti i requisiti si passa alla progettazione del Sistema, il **System Design**, ed ovviamente, essendo il Sistema composto da più sottosistemi che dovranno interagire fra loro, saranno necessarie le fasi di integrazione, verifica e validazione, che stabiliranno il corretto funzionamento del Sistema nella sua Complessità.

Queste fasi e queste operazioni sono le stesse indipendentemente da quale sia il Sistema, sia esso un Sistema Aerospaziale, un Impianto Industriale, un Sistema di Trasporto o un Sistema di Difesa militare, etc..

Al fine di avere una maggiore comprensione del macro processo che coinvolge un qualsiasi Sistema Complesso si riportano a seguire le principali fasi che vanno dalla definizione dell'esigenza dell'*end user* finale alla dismissione del Sistema stesso.

Esigenza:

il Cliente esprime la necessità di effettuare una serie di attività ed operazioni (che a seguire per semplicità verranno chiamate "azioni")

Requisito:

le suddette azioni vengono eseguite secondo una serie di parametri e condizioni di riferimento (questo nell'accezione più generale del termine) che debbono essere soddisfatte, altrimenti dovrà essere previsto un funzionamento in deroga, ovvero "fuori requisito"

Trattativa tecnico/commerciale:

il Cliente può soddisfare al suo requisito attraverso un Sistema (Complesso o meno che sia). Quindi,

devono iniziare una serie di attività (trattative) sia di carattere tecnico, che puramente commerciali, con le Ditte per definire il "PRODOTTO SISTEMA" richiesto.

Contratto:

una volta definita tutta la *road map* del "PRODOTTO SISTEMA" (Sviluppo, Qualifica, Produzione, attività logistica, etc.) ed il relativo *effort* economico, tra *Cliente e Ditta* viene stipulato un Contratto con tutte le condizioni afferenti al Programma del "PRODOTTO SISTEMA".

Supporto Logistico/Dismissione:

nel corso della vita operativa del Sistema, le Ditte forniranno il supporto logistico completo fino alla dismissione finale dello stesso

Sviluppi Futuri:

ancor prima che il Sistema arrivi a dismissione le Ditte provvederanno, con un lavoro sinergico con il Cliente, all'*upgrade* del Sistema e allo sviluppo di nuovi Sistemi in sostituzione dei vecchi, una volta dismessi.



Va messo in evidenza che un Sistema – a parte la propria complessità intrinseca - opera in un ambiente estremamente articolato difficilmente predittibile. A volte si richiedono scelte rapidissime in condizioni di ridottissima disponibilità di dati e parametri.

In questo contesto interviene il **Decision Making**, approccio metodologico basato su "probabilità e scelta razionale" che, per la estrema articolazione che ne è alla base, può essere considerato un vero e proprio settore formativo di alto livello nel quale convergono discipline e contenuti tra i più avanzati nell'ambito dell'elaborazione scientifica e sperimentale.

Il percorso formativo del *Decision Making* mira a fornire efficaci strumenti teorico/pratici atti a supportare il processo decisionale e a rimuovere quegli ostacoli di ordine concettuale, psicologico e dottrinale che non consentono di risolvere in modo rapido ed efficace problemi complessi afferenti a sistemi complessi.

L'obiettivo formativo di un *Decision Maker* è quello di mostrare prima di tutto come, a seguito di un possibile evento (critico), per deliberare ragionevolmente siano necessari tre passaggi fondamentali:

1. quantificare le incertezze in termini probabilistici;
2. descrivere le conseguenze delle azioni possibili in termini di utilità;
3. scegliere quella decisione che ha la massima utilità prevista rispetto alle probabilità precedentemente valutate.

L'approccio è focalizzato sui processi logici che devono essere seguiti per prendere decisioni "coerenti". Vanno evidenziati i principi logici alla base della scelta di ogni azione (tenendo conto dei fattori di tipo psicologico e dei processi mentali che portano a prendere decisioni, siano esse razionali o irrazionali in contesti fortemente indeterministici).

In questo stesso ambito diventa essenziale prendere in considerazione il rapporto tra etica e dottrina/necessità, ovvero gli aspetti che riguardano la contrapposizione tra le decisioni personali/morali e quelle dettate dalla necessità di rispondere in modo efficace ad una potenziale evento.

Ovviamente, la forte criticità sta nel saper in maniera rapida e univoca determinare se un evento rappresenti o meno una minaccia (lo sviluppo di una tecnologia, l'immissione sul mercato di un nuovo prodotto concorrenziale, un evento politico, ecc.) e le relative azioni da intraprendere.

La teoria delle decisioni

Nella teoria delle **decisioni razionali** innestate in un contesto che si connota per le sue condizioni di incertezza, l'incertezza stessa abbraccia diverse fasi del processo decisionale: ci può essere incertezza sia sulle azioni da intraprendere, sia sulle relative conseguenze, sia sui criteri per preferire una conseguenza rispetto ad un'altra. Inoltre, il termine incertezza può riguardare diversi ambiti: quello probabilistico (un'azione può avere diversi esiti), quello cognitivo (non si conosce tutto sulle opzioni e sui relativi esiti) e quello psicologico (non si sa sempre dire cosa preferiamo e perché).

La **teoria delle decisioni** riguarda così differenti discipline, quali il calcolo delle probabilità, la logica, l'inferenza statistica, l'economia, la psicologia, le neuroscienze e, come tale, diventa uno strumento metodologico di rilevante potenza nello sviluppo ed analisi di sistemi complessi.

Gli elementi concettuali principali del **Decision Making** sono:

Primo step:

- Approccio *bayesiano* alla probabilità e alle scelte razionali
- Concetto di *Decision Making* e relativo impianto logico.
- Strumenti di attribuzione della misura numerica a tutti gli eventi incerti (Tali strumenti saranno basati sulla nozione di probabilità soggettiva).
- Definizione del grado di fiducia che un individuo attribuisce al realizzarsi di un evento (questa stima è usata per guidare la decisione ad agire in un modo piuttosto che in un altro, a preferire una alternativa di azione ad un'altra).
- Concetto di probabilità e di inferenza *bayesiana*.
- Le reti bayesiane.
- Le relazioni di dipendenza condizionale tra le variabili in gioco.
- Modellizzazione della realtà in situazioni di incertezza.

Secondo step:

- Problematiche di tipo psicologico e relative allo studio dei processi mentali che portano a prendere decisioni, siano esse razionali o irrazionali.
- Metodi atti a favorire creatività e innovazione nelle organizzazioni.
- Base neurologica e cognitiva di scelte innovative e creative.
- Metodi atti a stimolare la capacità di prendere decisioni innovative.
- Strumenti di supporto allo sviluppo delle capacità di prendere le decisioni e risolvere problemi basato sul modello dell'"*innovative thinking*".

Terzo Step:

- La teoria dei giochi e le problematiche di carattere etico:

- Introduzione alle decisioni in condizioni di interdipendenza (o teoria dei giochi).
- Etica e Dottrina.
- I principi della teoria delle decisioni in base alle applicazioni non soltanto tecniche, ma anche culturali (indirizzo e imposizione verso una gestione consapevole dell'incertezza e in generale del processo della scelta).
- Rapporto tra scelte razionali e scelte "giuste"
- durata
- affidabilità
- costi e tempi.

Quarto step:

- Definizione di *Case Studies* relativi agli sviluppi storici e pratici della scelta razionale e del concetto di utilità.
- Sistemi decisionali multi criterio (metodologie dell'*Analytic Hierarchy* e *Network Process*) per la risoluzione di problemi complessi destrutturati.

Quindi, tutto il processo di **Decision Making** si basa in estrema sintesi su:

- valutazione della probabilità soggettiva di eventi di interesse
- aggiornamento della probabilità tramite il teorema di *Bayes*
- calcolo del valore atteso di una decisione
- utilizzazione delle funzioni di utilità e calcolo dell'utilità attesa di una decisione
- costruzione degli alberi decisionali
- enucleazione dei più importanti tipi di errore di carattere psicologico in ambito decisionale
- strutturazione di un problema decisionale con il supporto di metodologie multi-criterio.



Aerospazio

Il Settore Aerospaziale, da sempre vicino a quello della Difesa, presenta rispetto a quest'ultimo, aspetti criteri e approcci pressoché identici.

In entrambi i casi le linea guida sono:

- prestazioni
- efficienza

Quest'ultimi possono essere la discriminante nell'attivare o meno un Programma.

Appare evidente che non saranno più possibili periodi storici dove la singola Nazione impegna da sola risorse umane, tecnologiche ed economiche pressoché illimitate per lo sviluppo di un sistema complesso(es. missioni Gemini e Apollo) .

Quindi le parole chiave dello sviluppo di un nuovo programma cambiano e diventano:

- efficienza
- sinergia
- riuso e comunalità
- costi e tempi compatibili con le limitate risorse finanziarie.



fig. 4 – missione Gemini

In accordo a queste mutate condizioni il percorso '*from concept to launch*' viene gestito in ottica diversa: passo dopo passo sarà necessaria una costante *review* atta a definire non solo lo stato di avanzamento del Programma dal punto di vista tecnico, ma anche - e soprattutto - un controllo di quanto speso.

Da sempre l'Aerospazio e la Difesa sono caratterizzati da tempi che si allungano in modo "incontrollato" con un conseguente incremento (a volte drammatico) dei costi associati, aspetto questo fonte di critiche da parte dell'opinione pubblica.

Creare un Sistema Aerospaziale Complesso vorrà dire, quindi, sempre di più essere in grado di evitare le deriva dei tempi e dei costi, garantendo, comunque, il successo di Missione.

Vanno ricordati due fattori fondamentali che contraddistinguono la pressoché totalità delle missioni spaziali:

1. la non riparabilità del Sistema
2. la presenza umana nel Sistema

Sebbene questi due elementi possono essere presenti entrambi o singolarmente, in ogni caso si presentano come critici.

A parte casi “eccezionali” come fu quello della riparazione del telescopio *Hubble* con una missione *Shuttle*, un qualsiasi Sistema spaziale una volta lanciato è di fatto non riparabile (sia per aspetti esclusivamente tecnici, sia per quelli economici).

A questo si aggancia il secondo punto, ovvero la presenza dell’uomo. La missione va condotta con successo e l’equipaggio riportato alla base sano e salvo requisito, questo, banale, ma estremamente critico in termini di progettazione. Un sistema *manned* richiederà coefficienti di sicurezza superiori rispetto ad uno *unmanned*.

I due incidenti della navicelle *Shuttle* sono un drammatico esempio del problema della riparabilità e della necessità di avere un Sistema, di fatto, perfetto (*vds. i concetti di safe life, fail safe e damage tolerance*).



fig. 5 – riparazione del Telescopio Hubble

Uno strumento guida che può supportare, sia in termini tecnici che economici, tutta la vita di un Sistema è la *learning curve* che ne definisce nel tempo l’evoluzione nell’apprendimento.

In questa sede viene solo citata in quanto richiederebbe un approfondimento non oggetto del presente lavoro.

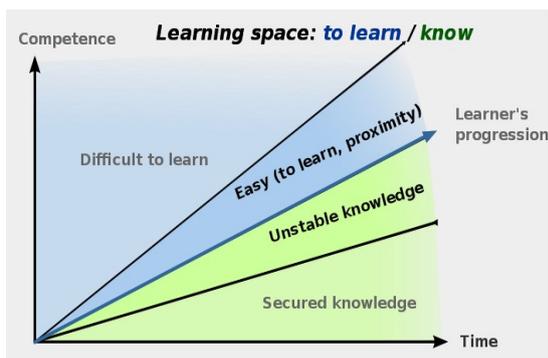


fig. 6 – la *learning curve*

Il Sistema Aerospaziale è di fatto un Sistema Complesso e sempre lo sarà, per cui richiederà ogni volta considerevoli impegni finanziari e scenari temporali di lungo periodo. Allora la domanda intrinseca a questa configurazione di sistema è: “*come deve evolvere?*”

La risposta potrebbe essere banalizzata....”*deve essere efficiente, affidabile, economico e su tempi medio/brevi*”facile a dirsi...complicato a farsi!

Bisogna individuare i fattori che possono costituire la chiave di volta, in particolare con:

- approccio strategico multinazionale (nessuna Nazione ad oggi è più in grado di sostenere da sola un Programma aerospaziale)
- usare, dove possibile, prodotti commerciali (*COTS*)
- accedere a risorse economiche al di fuori del settore aerospaziale dimostrando, però, che il Programma darà benefici anche in altri comparti tecnologici (*approccio dual use, multipurpose*).

Impianti Industriali

L’industria per la produzione di prodotti finiti[4]: (packaging, componentistica da stampaggio o da iniezione, ecc.) e semiprodotto (nastri, barre, tubi in acciaio, alluminio, combustibili, tessuti, plastiche, ecc.) destinati ai beni di largo consumo o quella di fornitura di servizi (energia, suo trasporto e distribuzione, trasporti, ecc.) risponde anche essa appieno al paradigma che è alla base della definizione di “sistema complesso”.

Lo fa sia in relazione alla molteplicità dei fattori “endogeni” che incidono sulla produzione e sulla qualità del prodotto, non sempre prevedibili a priori e riconducibili talvolta a pratiche operative applicate con puntualità e precisione, ma implicanti effetti non adeguatamente valutati, sia per la ancor più ampia numerosità dei fattori “esogeni” che intervengono nel ciclo di vita del prodotto, dalla concezione fino al suo esaurimento, sia, infine, per la interconnessione tra i fattori interni ed esterni stessi.

Il concetto di “*Global Factory*”, che va, infatti, ben al di là della semplice operazione di esternalizzazione di un servizio tecnico o amministrativo, si fonda sulla espansione solo in apparenza semplicemente concettuale del confine della fabbrica all’intero contesto in cui il ciclo produttivo va ad allocarsi, dalla miniera intesa come punto sorgente del *raw material* (minerale, rottame, ecc.) al consumatore finale, che in una economia

avanzata si presenta anche nella veste aggiuntiva di generatore di materie prime secondarie (figura 7). Vedere la fabbrica come una *Global Factory* implica la introduzione di una molteplicità di parametri caratterizzati da gradi di variabilità e di indeterminazione marcati, nonché da interconnessioni che rendono i processi non certo lineari e certamente rappresentabili in modo raffinato mediante l'impiego di modelli auto adattivi.

A titolo di esempio, si citano di seguito solo alcune delle variabili a cui si fa riferimento nelle considerazioni sopra fatte, a cui vanno ad aggiungersi quelle più specificatamente tecniche o tecnologiche:

- *Approvvigionabilità, accessibilità e variabilità delle materie prime anche in termini di costo*
- *Impatto di fattori legislativi e politici diversi da paese a paese*
- *Standard sociali diversi*
- *Modelli logistici in forte cambiamento ed impatto dei loro costi sul modello produttivo*
- *Delocalizzazione delle fabbriche vicino al baricentro delle risorse minerarie ed energetiche anziché al centro dei baricentri dei consumi*
- *Disponibilità di risorse umane ad elevato skill intellettuale a prezzi concorrenziali, ecc.*
- *Normative e coscienza ambientale diversa tra paese e paese ed in forte e rapida evoluzione*
- *Ecc.*

Riconducendo quanto detto alle considerazioni sulla complessità sviluppate all'inizio del presente articolo ne emerge che la produzione di beni di consumo non può che essere essa stessa un sistema "complesso".

Infatti, da una parte, sebbene nel suo esercizio una linea produttiva automatizzata risponda ad uno *scheduling* e a *pratiche operative predefinite* che vanno a "settare" le macchine in relazione al prodotto che deve essere processato, dall'altra, l'ambito in cui lo stesso ha genesi sia immateriale (la sensibilità ed il gusto del cliente, o l'innovazione tecnologica, ad esempio) che materiale (le materie prime, i *consumables*, nuovi olii lubrificanti, ecc.) introduce un elevato grado di indeterminazione, di multivariabilità e di squilibrio dinamico.

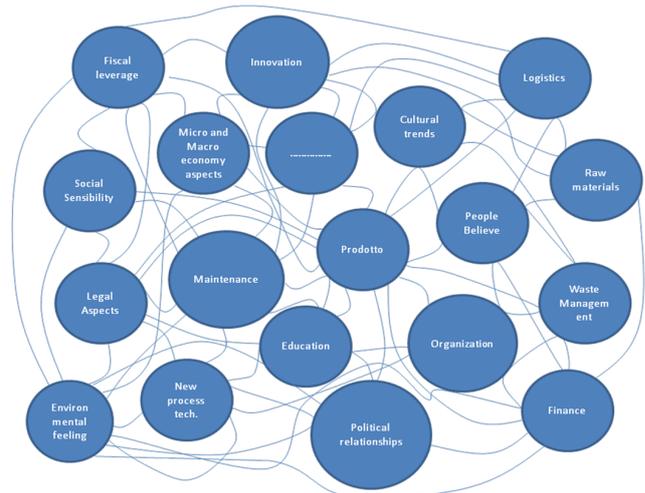


fig. 7 – La fabbrica globale

Quindi, ad esempio, il successo sul mercato di un prodotto viene ad essere rappresentabile come un funzione di una *n-pla* di variabili in cui

- tutte giocano allo stesso tempo il ruolo di "variabile di stato" e di "variabile di controllo"
- vanno ad incidere in modo diretto ed indiretto sulle altre
- non esiste di principio un ordine gerarchico
- ecc.

Considerazioni del tutto analoghe vanno fatte analizzando l'ambito in cui il prodotto va a proiettarsi una volta uscito dal *manufacturing* e la concatenazione degli eventi a cui esso sarà assoggettato nella fase di consumo, esaurimento e smaltimento.

Ciò impone alla fabbrica la necessità di un continuo adattamento a condizioni esterne cangianti, talvolta anche rapidamente ed in modo imprevedibile, in cui l'evoluzione del sistema sembra camminare *ex-post* secondo un processo innovativo continuo ordinato, ma che è, al contrario, il risultato di una interpolazione di eventi che impongono decisioni anche improvvise, cambiamenti organizzativi penetranti, approcci al mercato molto diversi rispetto alle esperienze consolidate, ecc.

Si pensi, ad esempio, all'introduzione in ambito siderurgico del processo di colata continua verticale ed il passaggio immediatamente successivo alla tipologia "curva" o il significato dell'introduzione delle leghe in alluminio e durante la seconda guerra mondiale di tecniche industriali di fabbricazione di aerei modulate dalla cantieristica navale, per quanto riguarda il settore aerospaziale (figure 8 e 9).

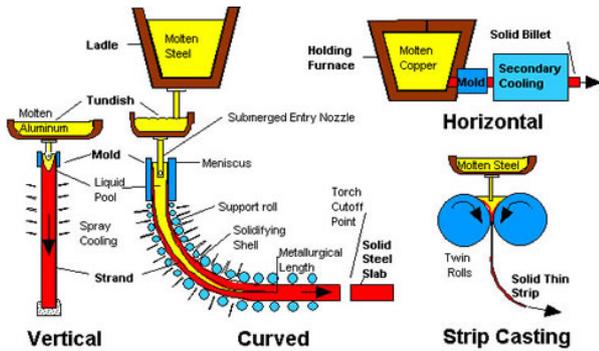


fig. 8 – Continuous Casting Machine lay-out

Si pensi, ancora ad un'organizzazione della produzione che è passata da strutture piramidali che parcellizzavano le diverse funzioni (la produzione, la manutenzione, la consuntivazione, ecc.) a forme organizzative di tipo "cellulare" che integravano la responsabilità e la gestione di singoli sottoinsiemi della produzione, lasciandone altri a funzioni centralizzate.

La produzione industriale vista, interpretata e progettata secondo una accezione moderna è un sistema complesso che vive cicli di evoluzione quasi – stabili convergenti verso punti di criticità (o di biforcazione) che sono seguiti da fasi di in-stazionarietà di durata non esattamente prevedibile ed il cui esito, comunque sia, porta ad una configurazione diversa dell'impresa.

Visto il problema dalla visuale del sottoinsieme "linea produttiva", basti pensare al fatto che i tempi di avviamento di un nuovo impianto non sono infatti così sempre facilmente rispettabili, che il raggiungimento del livello target di qualità di prodotto è una fase di evidente in-stazionarietà e che a tutto ciò sono connessi aspetti finanziari a loro volta condizionati da altri fattori non sempre prevedibili, se non con un elevato grado di aleatorietà, ma che introducono sicuramente elementi di non linearità evidenti.

Visto dalla visuale della **Global Factory**, le in-stazionarietà insite nel ciclo di produzione industriale come sistema complesso sono dimostrate anche dai più che evidenti effetti registrati nella seconda metà del secolo scorso in ambito sociale, territoriale e, finanche, culturale i quali, a loro volta,



fig. 9 – Linea industrial di fabbricazione di aerei civili

hanno generato in termini di *feed-back* nuovi prodotti, nuovi modi di produrre, nuove tecnologie ed approcci metodologici, nuovi gusti ed attitudini sociali ed artistiche.

E' indubbio, infatti, che il genere musicale Hip-Hop è figlio della crisi dell'industria automobilistica di Detroit e il cult-movie Full Monty è stato espressione del processo di deindustrializzazione subito dalla città inglese nell'ultimo ventennio del secolo scorso (figura 10).



fig. 10 – Scena tratta dal film Full Monty

Quello che evolve è, quindi, l'intero sistema di cui la **Global Factory** ne è un elemento.

Quanto sopra detto viene visto secondo visuali diverse per raffinatezza di analisi a seconda delle specificità del problema: ad esempio, una innovazione di *breakthrough* di processo/prodotto rappresenta quell'estremo (o *situazione limite*) in cui la modellazione si avvicina a quella di un sistema complesso per lo meno in termini qualitativi (nelle analisi della probabilità di successo sono prese in considerazione molte variabili o entità) , mentre l'innovazione continua (o marginale), la quale il più delle volte è finalizzata al superamento di specifici problemi proiettati sullo sfondo della continua ricerca della riduzione dei costi, ne è l'altro estremo generalmente condotto al di fuori di valutazioni tecniche di tipo più complessivo ed interdisciplinari. *In questo secondo contesto sebbene l'approccio è normalmente lineare, le conseguenze per lo meno in generale no.*

La sostituzione di una cinghia di trasmissione a catena con una di tipo diverso e meno costosa, ad esempio, sembra essere un problema sufficientemente banale: basta al massimo ridisegnare la "trasmissione"! In realtà nell'operare tale scelta la valutazione della probabilità dell' "entità-vantaggio economico" associata al cambiamento ingegneristico è il risultato "statistico" di una relazione di interdipendenza complessa con le altre n entità del sistema (entità-sollecitazione a fatica, entità usura, entità – skill ingegneristico,

entità-controllo qualità, entità-gestione fornitori, ecc.) che va ben al di là delle valutazioni legate alle sole caratteristiche geometriche e di elasticità. Se la risonanza non è certo un processo lineare, la propagazione del guasto sicuramente no!

La variabile “riduzione del costo di produzione”, infatti, può introdurre all’atto del momento decisionale “sostituire la cinghia di trasmissione precedente con una di nuovo tipo perché meno costosa, più facilmente acquisibile sul mercato, più facilmente sostituibile, ecc.”, una concatenazione di eventi concomitanti ed interconnessi che possono rendere la stima dei vantaggi conseguibili con la scelta estremamente complessa, instabilizzante il sistema e, a volte, non quantizzabile con precisione nemmeno sulla base dei consuntivi di esercizio.

Di fatto, se si indicasse con $g(x)$ la funzione “vantaggio economico”, in cui

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n)$$

è un vettore costituito da “variabili *random* misura delle entità del sistema”, pensata in modo tale che se $g(x)$ è positiva si verifica il vantaggio economico, mentre se è negativa no, $g(x) = 0$ viene a definire una *iper – superficie* di uno spazio n-dimensionale che separa il dominio del “successo” F da quello dell’ “insuccesso”.

Nel primo la probabilità di successo P_s è esprimibile tramite la equazione

$$P_s = \int_{dx_1 dx_2 \dots dx_n} f_1(x_1) f_2(x_2) \dots f_n(x_n) dx_1 dx_2 \dots dx_n$$

in cui $f_i(x_i)$ rappresenta la densità di probabilità della variabile x_i , e la sua costruzione permette la definizione della funzione vantaggio economico come

$$g(x) \propto P_s$$

La struttura matematica sopra riportata, benché di per se stessa presenti un certo grado di complessità, di fatto affronta il problema dell’analisi del sistema con un approccio del primo ordine in cui le funzioni densità di probabilità $f_i(x_i)$ sono stocasticamente indipendenti.

Ben altra complessità sarebbe assunta dalla funzione “probabilità di successo” se si vanno a considerare entità interdipendenti in cui la probabilità con cui si verifica l’evento *i-esimo* misurato tra x_i ed $x_i + dx_i$ dipende dalla probabilità con cui si verificano gli altri eventi e dalla modalità con cui gli uni condizionano o sono correlati agli altri (probabilità condizionata).

Sistemi di Trasporto

Un esempio che può spiegare il concetto di Sistemi che operano in più contesti, è sicuramente il *Global Positioning System* (GPS), ovvero la geolocalizzazione mediante triangolazione satellitare, che, se da una parte, è parte integrante della sistema di navigazione a bordo di un aeromobile, dall’altra costituisce un Sistema autoconsistente a tutti gli effetti, non secondo per complessità rispetto al sistema di trasporto aereo.

Tale esempio serve a spiegare un’altra caratteristica dei *Sistemi di Sistemi*, ovvero che i loro Sistemi componenti possono essere parte integrante di altri sistemi: il GPS, per esempio, può essere considerato una parte integrale di Sistemi di navigazione delle automobili.

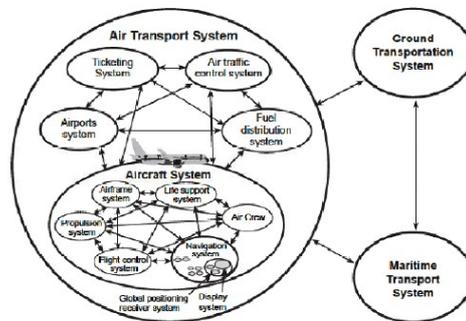


fig. 11 – Sistemi di Sistemi

Il tipo di complessità appena descritto fa capire l’importanza di affrontare in maniera sistemistica la realtà.

E’ come se ogni elemento del Sistema di Trasporto descritto è una *black box*, o se si vuole, un nodo funzionale che può far parte di più insiemi e rappresentarne un’interfaccia.

Inoltre, è possibile anche scendere ad un livello di dettaglio inferiore dal momento che il Sistema Aereo, che fa parte del Sistema di trasporto Aereo, è di per sé un Sistema Complesso, come è ben facile immaginare.

Il *trasporto*, ovviamente, oltre che delle persone, può essere anche intenso come l’accezione più generale di:

- trasporto di beni e merci
- trasporto di dati e informazioni
- trasporto di notizie

la generalità, quindi, di sistema complesso implica, inoltre, che le diverse forme di *trasporto* dovranno essere:

- sicure

- *certificate*
- *efficienti*

oltre che a basso impatto economico e ‘ambientale’.

Una volta estrapolato e generalizzato il concetto, comunque, poiché di qualunque tipologia di trasporto si parli, di ‘mezzi’ (anche di natura diversa) ne sono normalmente operativi in simultanea un numero elevatissimo (es. trasporto dati attraverso il web) è indispensabile verificare per il coerente funzionamento di un sistema di trasporto complesso che quest’ultimo risponda ai criteri di:

- interdipendenza
- non sovrapposibilità
- assenza d’interferenza
- compatibilità e protocolli.

Ovvero, il sistema di trasporto deve configurare un network differenziato che sussiste simultaneamente e che deve garantire in ogni caso l’avvenuta realizzazione dell’elemento-trasporto, qualunque esso sia: in parole povere un Sistema Complesso.

L’informatica è uno strumento importante in tutto questo, poiché con dispositivi relativamente semplici e poco costosi (PC, reti, etc.) permette la gestione di enormi moli di dati.

Essa impone, però, di affrontare un concetto quanto importante altrettanto spesso trascurato.....quello dell’affidabilità e della persistenza dei dati all’interno di un sistema informatico *netcentrico*.

A questo riguardo, infatti, si consideri che un foglio di un codice di Leonardo ormai vecchio di cinquecento anni resta, comunque, ancora accessibile e consultabile, mentre, per contro, un formato o supporto informatico di soli pochi anni fa può diventare all’improvviso, per effetto di un cambio di protocollo o HW/SW, inutilizzabile. A questo va aggiunto che, inoltre, un Sistema che si basa tutto sull’informatica e sul relativo supporto energetico necessario ad alimentarlo, con un banale *black-out* può ‘crashare’ all’improvviso e paralizzare un’intera Società.

Le *ridondanze* sono importanti e, nel breve periodo, risolutive,.....ma non risolvono il problema nel lungo periodo se non attraverso una preventiva azione cautelativa di trasferimento graduale di tutto il sistema di ‘trasporto’ (e *informazioni* associate) dal vecchio al nuovo modello/protocollo usato: operazione – questa – non banale, lunga e costosa.

A questo riguardo è importante parlare di ‘*safety*’, ovvero dell’elemento costituito da tutte le azioni

(preventive, correttive, cautelative) necessarie affinché un ‘entità generica’ venga trasportata, con successo e senza impatti negativi, da uno ‘stato’ di partenza ad uno finale.

È interessante concludere questo paragrafo osservando come i concetti appena illustrati e di cui si rimanda il Lettore ad ulteriori approfondimenti, siano del tutto generali e applicabili a qualsiasi forma di *trasporto*. Un esercizio utile di verifica e di comprensione della tematica è quello di prendere due esempi (concettualmente molto lontani tra loro, es. invio di una mail e un viaggio in treno) e applicare ad entrambi quanto sopra detto. Si noterà un perfetto parallelismo e come alcune soluzioni di uno possano, di fatto, essere completamente applicate all’altro e viceversa. Ancora una volta emerge il concetto che il Sistema Complesso in realtà è un’unica entità concettuale estrinsecabile ad un qualunque ‘*applicativo reale*’.

Sistemi di Difesa

I Sistemi di Difesa moderni sono costituiti dalle più avanzate tecnologie che l’Ingegneria possa oggi offrire. L’approccio utilizzato nell’assieme un Sistema d’Arma è interdisciplinare, dal momento che oltre ai sottosistemi ‘standard’ facili da immaginare come la munizione in quanto tale, sono presenti evoluti calcolatori necessari per determinarne tutte le prestazioni (es. le traiettorie). All’interno di questi calcolatori sono implementati complessi software ingegnerizzati che devono avere margini di errori inferiori a 10^{-12} , praticamente 0.

Nell’interdisciplinarietà dell’Integrazione di un Sistema del genere gioca una partita importante la tecnologia dei materiali usati, che devono garantire il giusto mix di affidabilità, resistenza, leggerezza, etc.

Per ultimo, ma non per importanza, va ricordato il *Sistema delle Telecomunicazioni a radio frequenza criptato* che permette il dialogo fra i vari attori, o meglio fra i sottoinsiemi coinvolti, evitando intercettazioni da parte di fonti esterne non desiderate ed ostili.

Quanto sopra, ancorché descritto in maniera estremamente sintetica, rappresenta forse il caso che più facilmente esplicita la complessità intrinseca di un Sistema Ingegneristico.

Il percorso che porta ad arrivare alla realizzazione di un Sistema per la Difesa parte dalla definizione di uno Scenario, di una Minaccia e, quindi, di un Requisito che stabilisca come contrastare efficacemente tale minaccia.

Da questo concetto parte un cammino lungo e articolato all'interno del quale la Forza Armata e Industria sinergicamente definiranno il Sistema, la Logistica, il tempo di vita, le regole di dismissione, e tutti gli aspetti economici ad esso connesso.

Anche i fattori di *safety* degli operatori dovranno essere analizzati e implementati, così da garantirne una gestione in piena sicurezza, anche dopo la dismissione dello stesso.

Logistica, Manutenzione, Obsolescenze

Una volta consegnato un Sistema al Cliente iniziano le attività di logistica (anche dette di *In Service Support*) necessarie per mantenerlo in efficienza [5]:

I principali fattori logistici sono:

- assistenza per guasti, anomalie, mal funzionamenti
- monitoraggio e risoluzione delle obsolescenze
- riparazioni e manutenzione
- dismissioni *post phase – out*.

In tutto questo, le parti di ricambio (anche dette Parti Di Rispetto – PDR) sono molto importanti in quanto costituiscono la riserva di magazzino necessarie per garantire la possibilità di sostituire ciò che si rompe all'interno del Sistema. S'intuisce che non è possibile un numero di parti di rispetto enorme (in pratica n duplicati del Sistema stessa) per ragioni di costi, d'immagazzinamento, di scadenza delle stesse.

Esistono modelli matematici specifici (ad es. quello di *Weibull*) mediante i quali è possibile definire il giusto set di parti di ricambio che un sistema deve avere in base ai seguenti parametri:

- MTBF (*Mean Time Between Failures*) del Sistema
- operatività (*full* o in degradato)
- obsolescenze
- *budget* allocato o allocabile.

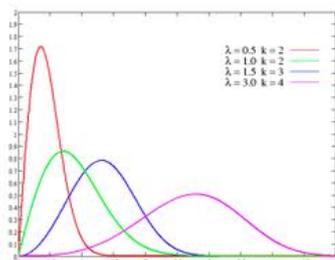


fig. 12 – esempio di Distribuzioni di Weibull

L'obsolescenza è uno degli aspetti più critici, in quanto si ha quando un pezzo/assieme/apparato non è più riproducibile e/o reperibile sul mercato. Ci sono settori quali l'informatica che evidenziano un insorgere di obsolescenza rapidissimo a causa di una rapidissima evoluzione e cambiamento dei prodotti; essa va monitorata periodicamente nel corso della vita operativa di un Sistema.

A volte aziende acquistano *stock* interi (magazzino preventivo) di parti in previsione della loro successiva non reperibilità per obsolescenza. Analogamente gli utilizzatori finali del Sistema "cannibalizzano" proprio i Sistemi stessi per recuperare PDR da usare su altre unità. Significativo è stato l'esempio della US Navy che ha comprato dalla Marina britannica i velivolo Harrier dismessi per usarli come PDR della propria flotta.

Le scelte al riguardo, comunque, dipendono fortemente dalla tipologia di produzione, oltre che dal pezzo di ricambio : nel caso di produzioni di prodotti di beni di consumo, come ad esempio, i tubi, si persegue la riduzione a livelli minimali degli utensili di lavoro tenuti a magazzino, costituendo quest'ultimi un elevato valore di capitale immobilizzato

La risoluzione di un'obsolescenza può essere conseguita, oltre che con il suddetto magazzino preventivo, in due modi.

Il primo è realizzato sostituendo la parte con una che sia del tutto compatibile, adottando la strategia denominata **form, fit and fuction** in cui:

- **Form:** *the shape, size, dimensions, mass and/or other visual parameters which uniquely characterize an item. This defines the "look" of the part or item. Sometimes weight, balance and center of mass are considerations in 'form'. Color is not generally considered in 'form', except when it has a specific functional meaning.*
- **Fit:** *the ability of an item to physically interface or interconnect with or become an integral part of another item or assembly. This relates to the associativity of the part in relation to the assembly, or to other parts, and includes tolerances.*
- **Function:** *the action[s] that an item is designed to perform. This is the reason for the item's existence, which also includes secondary applications.*

Il secondo metodo prevede il **re – design** della parte. Questo richiede

- un nuovo sviluppo
- un nuovo processo di qualifica e certificazione
- il riavvio delle linee di produzione

e la valutazione della sua compatibilità con tutti i vecchi Sistemi e affidabilità.

Tutto questo spesso presenta costi non trascurabili tali da portare addirittura alla dismissione del Sistema e alla sua sostituzione con un altro.

Questo processo logistico dovrà essere caratterizzato da

- approccio integrato tra tutti gli apparati (ottica del Sistema dei Sistemi)
- valutazione dell'impatto economico (spesso i supporti logistici hanno dei costi esorbitanti rendendo il Programma/Sistema difficilmente gestibile)
- interventi rapidi e compatibili con i tempi di operatività del Sistema tali da ridurre al minimo i fermi (massimizzazione del *due time* o disponibilità)

Dall'analisi di quest'ultimo punto s'intuisce come gli aspetti logistici vadano pensati nel momento stesso in cui si fa il *design* del Sistema o addirittura prima, quando ne se ne definiscono i requisiti e le relative specifiche tecniche.

Nonostante l'adozione dei principi guida sopra enunciati dovrebbero riflettersi positivamente nella progettazione di sistemi di manutenzione impianti e relativa logistica affidabili e, come tali, in grado di minimizzare sia i tempi di fermo – impianto (*line downtime*) che i costi ad esso associati, la molteplicità delle variabili che entrano in gioco, gestite attualmente secondo una architettura logica complessiva che non risponde al concetto di "complessità", impedisce di coglierne appieno in generale i "frutti".

Questo, se è già vero a livello impianto, lo è ancora di più nel caso in cui i siti produttivi di una singola società o gruppo industriale sono distribuiti in un territorio esteso (addirittura, transnazionale); a livello del singolo sito produttivo la complessità di principio è espressione di agglomerati tecnologici di impianti e macchine anche molto diversi tra di loro (si pensi, ad esempio, ad una raffineria o ad un impianto siderurgico) o di cicli produttivi in parte externalizzati (ad esempio, i ripristini, il minuto mantenimento, ecc.).

Basti pensare a gruppi come, ad esempio, Tenaris – leader mondiale nella produzione i tubi per il settore Oil&Gas e per la meccanica - che ha impianti distribuiti in tutto il mondo dal Sudamerica al Giappone, oppure ad un impianto siderurgico a ciclo integrale che vede coesistere impianti chimici e per la termica con laminatoi, colate continue ed altre facilities.

Solo restringendo le considerazioni precedenti al ristretto dominio della singola linea produttiva, la ricerca, ad esempio, della causa della "non idonea qualità del prodotto" si traduce, in generale, nella ricerca di una semplice correlazione lineare causa-effetto, quando, invece, molto spesso le variabili che entrano in gioco sono molteplici e tra di loro correlate ed interdipendenti: *nella valutazione del "non conseguimento della qualità del prodotto" si è preso in considerazione il fatto che il terzo turno (variabile umana) stressa maggiormente le linee e che i componenti delle stesse (per lo meno alcuni) subiscono una usura maggiore (variabile tecnica)? Si è valutato che un eccesso di ripristini dei componenti usurati ne peggiora la prestazione (fattore umano e tecnico)? Che incidenza ha la contestazione del cliente in termini economici (fattori economici)? E sui rapporti interpersonali all'interno della ditta (fattori umani)? Sugli incarichi e le deleghe (fattori organizzativi)? Lo standard qualitativo della ditta esterna incaricata ad eseguirli va ad incidere sulla qualità di quest'ultimi (variabile formazione)? Esistono tecnologie di ripristino più performanti e materiali migliori allo scopo (variabile tecnologica)? Quali sono le procedure di controllo della qualità del prodotto e dei consumables (variabile tecnico-economica e culturale)? Qual è il livello di pax sociale interna ed esterna all'impianto?.*

Quanto sopra detto diventa rilevante nel caso di produzioni di massa (figura 13) che, pur assurgendo a valore strategico per un paese o un'area geografica, fanno riferimento a prodotti "saturi" e per le quali la "riduzione del costo" costituisce una *driving force* non trascurabile.

Di fatto quanto sopra detto mette in evidenza che l'assunzione "conseguimento della qualità del prodotto" disegna di per se stessa un sistema complesso e che la delimitazione del suo "recinto" richiede la definizione delle "entità (materiali ed immateriali) che lo compongono in termini qualitativi e della loro interdipendenza":

- Sottoinsiemi/componenti/elementi e loro numero
- Interazioni e loro forza

- Formazione/Operazione e loro scala temporale
- Diversità/variabilità
- Ambiente e sue “demand”
- Attività e loro obiettivi.

Un Sistema manutentivo e la sua logistica ottimizzati passano attraverso, quindi, una inquadratura dello stesso come “entità complessa” e questo richiede, come primo passo, la definizione delle sottocategorie che lo compongono, tra cui quelle sopra riportate solo ad esempio e non certamente esaustive.

Il secondo *step* implica la necessità di qualificare e quantificare le stesse: la definizione di una modalità di “conteggio” delle caratteristiche delle stesse diventa, quindi, centrale nella definizione del modello rappresentativo del sistema, come lo è stabilire le interrelazioni di dipendenza delle une sulle altre.

La numerosità delle variabili da sola, infatti, non definisce un sistema come “complesso”; perché si passi dalla “articolazione” alla “complessità” si rende necessario conoscere come il sistema si comporta nel suo insieme, come si comportano le sotto entità e come tutti essi – sistema e sue sotto-entità – interagiscono tra di loro.

In realtà, però, non è infrequente nelle produzioni basate su cicli di processo che precedono molti *step* che già i singoli impianti di uno stesso sito, anche identici o simili, operino al di fuori di adeguate sinergie, anche perché la scarsità di risorse e la non omogeneità formativa del personale, ad esempio, ha come conseguenza che la “base informativa”, cioè i dati sorgente sulle *failure dei componenti*, è lontana dall’essere completa ed aggiornata in tempo reale.

Questo porta nella manutenzione e nella logistica a operazioni su diversi impianti anche simili eseguite con approcci metodologici parzialmente diversi e, quindi, tali da provocare ridondanze non necessarie (se non antieconomiche).

Come conseguenza di ciò la scelta gestionale si orienta, in particolare nelle produzioni il cui output è un prodotto “saturo”, verso approcci alla manutenzione che lasciano prevalere l’intervento *on-condition* perché considerato – erroneamente a nostro giudizio – il più scarno ed il meno costoso; conseguenza di questo ritardo culturale è che le stesse produzioni passano attraverso successive eccedenze produttive e ristrutturazioni di impianti.



fig. 13 – Produzione acciaio a Benxi (Cina)

Un approccio alla manutenzione (ed alla logistica) che sia realmente “complesso”, se è vero che in apparenza è più oneroso richiedendo l’acquisizione e la gestione di dati statistici in quantità superiore a quella che è la prassi attuale, nella realtà fornisce uno strumento di gestione della manutenzione che la va ad immettere in un sistema più complesso dove il comportamento dei singoli elementi più ribaltare i “paradigmi” che sono alla base delle decisioni normalmente prese.

Solo a livello di esempio, possono essere di seguito elencate alcune considerazioni non certo esaustive sui limiti concettuali di una tipologia di organizzazione manutentiva principalmente basata sull’intervento “*on – condition*” :

- *accettare una logica manutentiva incentrata sull’intervento su condizione non è correlata ad un “costo globale” che, invece, è diverso a seconda del livello di remuneratività del mercato la quale, a sua volta, dipende da altri elementi essi stessi varianti nel tempo*
- *non si può non ritenere che il livello di “resilienza” dell’impresa ad un cambiamento della propria “complessità conseguenza di un investimento tecnologico” possa prescindere dalla cinetica dell’elemento-finanza o dell’elemento–remuneratività del prodotto o, ancora, dell’elemento-innovazione di breakthrough, ecc.*
- *un cambiamento organizzativo introduce instabilità meglio definibili in termini di intensità e di durata se viene adottato un approccio da “sistema complesso”.*
- *ecc.*

Queste semplici e limitate (in numero) considerazioni lasciano facilmente intuire come un

approccio alla manutenzione ed alla sua logistica basato sul concetto che entrambe sono parti di un “sistema complesso” possa essere solo in apparenza antieconomico, mentre approcci più semplici solo apparentemente possono sembrare più vantaggiosi dal punto di vista economico.

Senza entrare nel merito di approfondimenti che richiederebbero tempi e spazi di scrittura che vanno al di là di un semplice articolo, va ricordato a questo punto la esistenza di strumenti metodologici ed analitici quantitativi (analisi di affidabilità, tecniche bayesiane, ecc.) o semiquantitativi (ad es., la **FMECA- Failure Mode Effect and Criticality Analysis**, ecc.) raffinati permettono un approccio alla problematica “manutentivo – logistica” da “Sistema Complesso”.

Essi richiedono la determinazione delle parti del sistema o del componente che subiscono rottura o degrado della funzionalità, dei modi con cui ciò avviene e l’effetto che si ha sull’intero sistema: naturalmente quando si parla di componente o sistema non ci si riferisce in modo automatico ad una entità osservabile “materiale”!

Ciò che è vero è che al crescere della complessità del sistema aumenta la numerosità e la tipologia di interazioni tra gli elementi dello stesso: la statistica, l’algebra booleana ed i teoremi di **Bayes** mettono a disposizione processi logici formali idonei ad identificare e classificare gli effetti.

La costruzione del modello passa attraverso i seguenti *steps* progressivi:

1. sviluppo di un diagramma logico di dettaglio che descrive la combinazione degli eventi che portano all’effetto considerato sul sistema
2. raccolta dei dati “base” attraverso i quali determinare i “ratei” degli eventi base prima e le probabilità con cui si manifestano ed il livello della loro criticità; questi possono essere raggruppati in due grosse famiglie:

- dati di rottura o degrado del componente
- altri dati tra cui quelli connessi al fattore “uomo”

questi possono essere valori numerici ricavati da “data-base”, ma anche valori stimati sulla base dell’esperienza dagli operatori

3. calcolo delle probabilità con cui gli eventi hanno luogo

La struttura logica permette di esprimere la probabilità che avvenga al livello superiore l’evento A , cioè $P(A)$, come effetto di n eventi X_i , cioè $P(X_i)$, tra loro correlati attraverso operatori logici **AND**, **OR**, ecc., che ne definiscono la interdipendenza funzionale:

- l’operatore **AND** implica che le probabilità dei sotto-eventi sono indipendenti tra di loro, ovvero che

$$P(A) = \prod_{i=1}^{i=n} P(X_i)$$

- l’operatore **OR** implica che le probabilità dei sotto-eventi sono dipendenti tra di loro, cioè

$$P(A) = 1 - \prod_{i=1}^{i=n} [1 - P(X_i)]$$

- Ecc.

4. Determinazione delle “criticalities”

Per “criticality” si intende una *misura della importanza relativa degli effetti conseguenza del manifestarsi degli eventi*. Essa, basata su valutazioni ingegneristiche di tipo qualitativo ed analisi quantitative, consiste nell’assegnare valori (numerici) a ciascun evento *in relazione alla sua probabilità di verificarsi e al suo contributo all’effetto preso in considerazione sul sistema*. Da un punto di vista analitico viene ad essere espressa come segue

$$CR = P(X_i)P(H|X_i)$$

In cui il primo fattore dà la probabilità che si verifichi l’evento X_i e $P(H|X_i)$ è la probabilità che si verifichi l’evento di sistema (globale) verificatosi l’evento base X_i stesso.

5. Stesura delle “raccomandazioni” sulle azioni correttive

Questo *step* consiste nell’analisi e rivisitazione dei dati acquisiti aventi lo scopo di fornire i suggerimenti correttivi. Allo stato dell’arte esse riguardano l’area della *riprogettazione*, la *scelta della parte del componente*, la definizione dei *criteri di*

progettazione e procurement, le procedure di manutenzione, ecc.

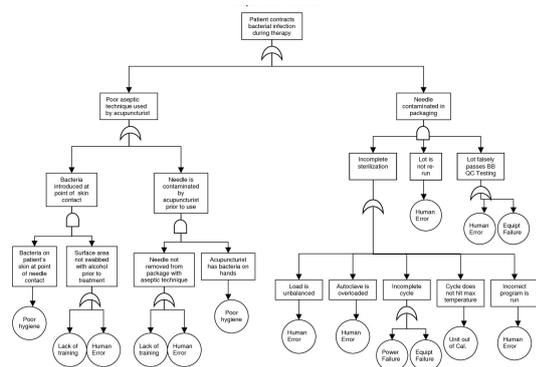


Fig. 14 – Struttura logica di analisi dell'evento di sistema

La figura 14 fornisce un esempio della struttura logica costruita al fine di analizzare e valutare la probabilità dell'evento "Patient contracts bacterial infection during therapy". L'esempio riportato ha lo scopo di mettere in evidenza la generalità del metodo.

Calando le considerazioni fatte ad una realtà produttiva - ad esempio, la produzione siderurgica - è pensabile poter, per esempio, concorrere per i paesi occidentali con la infrastruttura produttiva cinese quando questa, al di là di certe sue attuali inefficienze retaggio del passato, non solo può contare su un costo della mano d'opera più basso, su minori tutele sociali, ma anche su impianti di produzione più moderni e con soluzioni ingegneristiche più compatte, meno dispendiose dal punto di vista energetico e manutenibili in tempi più brevi e con minor costo? Ma l'esperienza che la Cina sta cumulando in ambito siderurgico secondo questi criteri non sarà estesa ad altri cicli produttivi, come ad esempio, quello aeronautico (figura 15).

In quale modo queste due semplici domande hanno a che fare con il nocciolo della questione trattata in questo articolo? Una chiave di lettura potrebbe risiedere nel fatto che la chiave della competitività dell'industria manifatturiera europea va ricercata nello sviluppo di un modello di "Sistema Complesso" basato sulle interconnessioni multiple e multilivello tra un numero di elementi numericamente e qualitativamente ben più ampio di quelli normalmente considerati

Alan Turing, infatti, scrivendo nel 1950 il saggio dal titolo "Macchine calcolatrici ed intelligenza" nel quale esprimeva il concetto secondo il quale "Lo spostamento di un singolo elettrone per un miliardesimo di centimetro, a un momento dato,

potrebbe significare la differenza tra due avvenimenti molto diversi, come l'uccisione di un uomo un anno dopo, a causa di una valanga, o la sua salvezza", precorreva già allora l'esigenza ad un approccio alla conoscenza guardando i sistemi fisici nella loro complessità reale.



fig. 15 – Produzione Airbus in Cina (Tianjin)

L'industria manifatturiera dei paesi ad alto sviluppo economico e tecnologico deve far tesoro di questa intuizione iniziando a guardare all'ambiente in cui opera come ad un insieme di altri elementi che sono a tutto titolo parte di se stessa.

La Commissione Ingegneria dei Sistemi Complessi

Nell'ottica di trattare in maniera trasversale la problematica del *System Engineering* e dei *Sistemi Complessi* nasce la suddetta Commissione all'interno dell'Ordine degli Ingegneri di Roma e Provincia.

Tale Commissione costituisce una novità assoluta per gli Ordini Provinciali, dal momento che affronta in maniera organica le tematiche legate alla progettazione, gestione e messa in opera dei *Sistemi di Sistemi*, che come è stato visto possono essere Aerospaziali, Impianti Industriali, di Trasporto, di Difesa, ecc...

I componenti della CISC (Commissione Ingegneria dei Sistemi Complessi) lavorano in aziende leader in Europa e nel mondo nel settore dell'Aerospazio, Difesa e Ricerca & Sviluppo, e dal punto di vista dell'inquadramento all'interno dell'Ordine appartengo principalmente cosiddetto Terzo Settore, detto anche Ingegneria dell'Informazione, che comprende tutte le "nuove" Ingegnerie (Elettronica, Telecomunicazioni, Informatica, Gestionale, Aerospaziale, ecc..).

L'art. 46 del DPR n. 328/01 specifica che i compiti degli ingegneri del III settore, alias settore dell'ingegneria dell'informazione, e sono: la pianificazione, la progettazione, lo sviluppo, la

direzione lavori, la stima, il collaudo e la gestione di impianti e sistemi elettronici, di automazione e di generazione, trasmissione ed elaborazione delle informazioni.

La *mission* di questa Commissione sarà la Valorizzazione dell'Ingegnere del Terzo Settore, o meglio dell'Ingegnere dell'Informazione.

I punti principali per raggiungere la *mission* e gli obiettivi di medio/lungo periodo della Commissione sono i seguenti:

1) La formalizzazione, o meglio la ri-formalizzazione, di una lettera di Intenti fra AFCEA e Ordine degli Ingegneri di Roma

AFCEA rappresenta un raggruppamento di oltre 100 aziende del settore tecnologico dell'Aerospazio e Difesa e delle Amministrazioni Militari. In questa lettera di intenti si farà esplicito riferimento alla direttiva del CNI del Marzo 2013, che punta alla valorizzazione dell'Ingegnere dipendente e dell'Ingegnere del Terzo Settore.

2) Tavolo programmatico Comune di Roma

- L'iniziativa sarà volta a formalizzare la collaborazione fattiva fra Ordine degli Ingegneri e Comune di Roma proposte di collaborazione e progetti in ambito tecnologico, Il tutto finalizzato a migliorare la vita dei cittadini romani Digitalizzazione della Pubblica Amministrazione
- Formazione Continua per Cittadini e Pubblica Amministrazione anche sull'utilizzo di strumenti dedicati e non (PEC, Firma Digitale, archiviazione informatica e dematerializzazione, etc.)
- Smart City
- Proposte per il settore Aerospazio per la "Tiburina Valley"
- Proposta di un Concorso 10 Idee per Roma in ambito tecnologico

3) Organizzazione di Seminari e Convegni

I Seminari rappresentano lo strumento più efficace e diretto per creare dei momenti di sinergia e discussione sia tra gli esperti di un determinato settore, sia tra chi desidera avvicinarsi alla tematica affrontata.

Il "goal" più importante che è possibile raggiungere con questo tipo di iniziative è quello di avvicinare settori tipicamente distanti tra di loro trovando, attraverso una tematica specifica, punto di interesse e convergenza comune. Spesso si osserva

che un dato settore tecnologico può trovare soluzioni e implementare innovazioni prendendo spunto da altri comparti scientifici a volte, sorprendentemente lontani in termini di scopi e finalità applicative. Uno modello predittivo di un sistema biologico potrebbe ad esempio essere applicato a uno tecnologico, questo semplicemente adattandolo a diverse specifiche dei due.

Quanto sopra serve ad evidenziare come i seminari, costituiscano (soprattutto se interdisciplinari e trasversali) un momento d'incontro, di confronto, ma soprattutto di scambio di idee e soluzioni. Nonché l'opportunità di far nascere collaborazioni tra realtà diverse.

Il concetto della verticalità dei progetti ad oggi non è più vincente da ogni punto di vista sia tecnologico che di business. L'approccio, come appena sottolineato, deve essere trasversale, multidisciplinare con un visione *dual use* – *multipurpose*. Questo si ottiene se e solo se, le diverse linee scientifiche – tecnologiche s'incontra e si parlano fra di loro.

È ed proprio con questo spirito che la Commissione organizzerà una serie di seminari dedicati, nonché iniziative di formazione ed editoriali.

Il seminario (o pubblicazione che sia) sarà inteso come un momento di riflessione costruttivo e non solo come un semplice momento "espositivo" dell'attività di un singolo.

La linea guida potrebbe essere riassunta con la frase "incontrarsi per costruire, confrontarsi per crescere".....soprattutto quanto la competizione è mondiale, non esistono frontiere e barriere di contenimento e la scarsità di risorse economiche rende il confronto serrato e competitivo.....a volte anche in modo pesante.

Il primo seminario che la Commissione vuole realizzare sarà in collaborazione con INCOSE, l'Ente per il System Engineering, presso l'Agenzia Spaziale Italiana ed avrà come titolo "Il System Engineering lo Spazio e non solo...".

Altri seminari sono in fase di valutazione da parte della Commissione e del Consiglio dell'Ordine degli Ingegneri i quali verteranno sulle tematiche delle Comunicazioni Satellitari e sull'Info Mobilità.

I punti cardine delle attività pertanto diventano:

- L'Ordine diventa il referente per Enti e Istituzioni per tutta la formazione finalizzata a implementare le conoscenze tecniche e a agevolare la piena integrazione nei vari settori professionali da parte degli Ingegneri
- corsi scientifici tecnologici con lo scopo di diffondere la cultura ingegneristica, delle tecnologie e scientifica
- Promozione di eventi culturali (workshop, simposi, mostre)
- Promuovere attività editoriali
- Ideare nuovi Progetti compatibili in ambito energia e trasporti
- Creare un team di esperti scientifici.

Scenari Futuri

In un contesto di globalizzazione, d'incremento delle capacità di calcolo (es. crescita esponenziale delle prestazioni dei calcolatori), del contrasto tra la crisi mondiale e la contemporanea crescita di Paesi quali la Cina e l'India, capire il futuro e l'evoluzione dei Sistemi Complessi diventa non facile.

Il primo elemento è quello di capire se si sta andando verso un livellamento, una saturazione o una regressione.

L'ipotesi più intuitiva è quella di una saturazione (seguita da una fisiologica regressione e a seguire ripresa ciclica).

Come riportato in [4] la domanda che alcuni ricercatori del MIT si sono posti è la seguente: "quali sono le condizioni nella quali un qualsiasi Sistema Complesso sottoposto a "stress" raggiunge quella condizione di non ritorno (saturazione), oltre il quale il collasso è inevitabile?". Questo viene analizzato non soltanto da punto di vista dell'evoluzione temporale del Sistema stesso, ma in funzione della distribuzione spaziale dei fattori che ne determinano il potenziale collasso. In tal senso, il Gruppo di Ricercatori del MIT ha definito un nuovo indice per valutare quando un Sistema Complesso (sia esso un ecosistema, uno finanziario, fisico, etc.) sta per subire un repentino cambiamento. Questo nuovo metodo è illustrato su un articolo pubblicato su "*Nature*" a firma Lei Dai, Kirill S. Korolev e Jeff Gore [5].

Gli effetti di un repentino cambiamento nello stato di un Sistema Complesso possono essere drammatici. Si pensi, ad esempio, ad un ecosistema all'interno del quale viene inserito un elemento incompatibile che ne causa la rapidissima distruzione (un alga invasiva in un lago, un organo trapiantato che da rigetto, un Software incompatibile con i protocolli adottati, etc.).

Quando un Sistema Complesso è caratterizzato dal rischio di bruschi passaggi da uno stato stabile a un altro instabile, riuscire a definire la cosiddetta **Resilienza del Sistema** (la soglia di passaggi tra i due stati) è molto difficile. Però, è fondamentale per cercare di prevenire, o al più minimizzare gli effetti negativi derivati.

Fino ad oggi per misurare tale resilienza è stato usato il cosiddetto **Tempo di Recupero**, che rappresenta l'intervallo temporale necessario al Sistema, soggetto ad un disturbo, a tornare nella posizione stabile di partenza. Questo metodo presenta l'inconveniente di conoscere in modo dettagliato e puntuale l'evoluzione temporale, ovvero conoscere a priori (con modelli predittivi e/o dati storiografici) il comportamento del Sistema ad un dato input (che deve essere univocamente noto anch'esso).

Pertanto gli studiosi devono avere disponibili ed elaborare una mole impressionante di dati che devono essere disponibili, reperiti e implementati nel modello.

Per contro è stato sviluppato [6] un nuovo metodo che consente di *by - passare* il problema, utilizzando solo le informazioni che si hanno a disposizione, con una buona capacità di prevedere le "transizioni critiche" che sono l'insieme di eventi che possono dare a volte esiti improvvisi e disastrosi nella dinamica dei Sistemi Complessi di qualsiasi tipo.

Il problema è riuscire a capire tali eventi attraverso analisi opportune, ma spesso la complessità del problema fa sì che sia i modelli che la potenza di calcolo disponibili non sono sufficienti. E alla fine si arriva ad un "dilemma" metodologico: "**descrivere le transizioni critiche senza un adeguato modello matematico richiede un enorme quantità di dati; d'altra parte, costruire un simile modello richiede una mole altrettanto grande di informazioni.**" [6]

Sulla rivista "**PLoS Computational Biology**" [7] Steven Lade (Max-Planck-Institut per la fisica dei sistemi complessi di Dresda, in Germania), e Thilo Gross (Università di Bristol, nel Regno Unito), propongono una nuova metodologia di calcolo in grado di sfruttare al meglio le informazioni disponibili in un Sistema Complesso riducendo la quantità di dati che occorre raccogliere per avere una descrizione soddisfacente del comportamento evolutivo del Sistema stesso.

Il modello si fonda su una sorta di versione

s sofisticata di un'affermazione di buon senso: *'alcune informazioni sono più semplici da ottenere rispetto ad altre'*. [6]

Gli autori aggiungono che *"Il nostro approccio cerca di combinare il meglio dei due approcci: facciamo uso della specifica conoscenza disponibile del sistema senza che ne sia richiesta una conoscenza completa; il nostro principale contributo è nel modo in cui viene utilizzata l'informazione parziale. Non abbiamo perseguito la realizzazione di un modello completamente sviluppato per ogni singolo sistema ma viceversa una sorta di 'trucco matematico' per poter studiare molti modelli in parallelo"*.

Per ulteriori approfondimenti a riguardo si rimanda il Lettore ai riferimenti [6][7].

Quanto sopra costituisce solo un esempio di quanto la tematica sia importante e l'impegno che a livello accademico e industriale viene profuso a riguardo.

Altri fattori che dovranno essere valutati nel capire come i Sistemi Complessi evolveranno riguardano la robotica e l'automazione, perché queste svincolano sempre più il Sistema dal controllo umano (sia un fase di esercizio che di diagnostica), nonché la *cyber security* intesa come tutti quei Sistemi di sicurezza informatici correlati e associati a un qualsiasi apparato.

Forse l'aspetto più notevole dell'argomento è scoprire come un modello sviluppato, ad esempio, per un sistema biologico sia in grado di poter descrivere in modo efficiente anche un sistema ingegneristico e viceversa. Confermando e dimostrando come, in realtà, tutti i Sistemi siano "disegnati" con linee guida comuni.

Conclusioni

Considerando la rapida evoluzione del contesto ingegneristico ed economico internazionale, parlare di Sistemi di Complessi diventa sempre più centrale. Come dimostrato nel presente lavoro, è necessario un approccio sempre più multidisciplinare all'interno del quale s'interfacciano e interagiscono più settori.

Design, Produzione, Logistica, nonché Marketing, Business ed economia sono direttamente legati tra loro. È impensabile che la progettazione di un qualsiasi Sistema (o parte di esso) non tenga conto, ad esempio, di tutti gli aspetti economici o di quelli logistici.

In realtà li considererà tutti simultaneamente e non singolarmente: da qui, quindi, s'intuisce facilmente

la necessità di ottimizzare e di trovare il miglior *trade – off* possibile secondo quanto richiesto dal Cliente e dalle sue Specifiche di riferimento.

Un approccio prestazionale non necessariamente è quello vincente. Infatti, un delta capacità oltre Specifica, conseguito a scapito dell'economicità del prodotto o del suo supporto logistico rende, di fatto, il Progetto "non intelligente".

Può essere quasi definito un assioma l'assunzione che tanto maggiore sarà complesso un Sistema e tanto più semplici e intuitive dovranno essere le soluzioni tecnologiche e d'uso che vengono da esso adottate.

Un approccio eccessivamente complesso e articolato (si pensi ad esempio ad un disegno di *Esher*, vedi fig. 16) potrebbe rendere il Sistema poco "friendly" facendone perdere tutte le potenzialità.

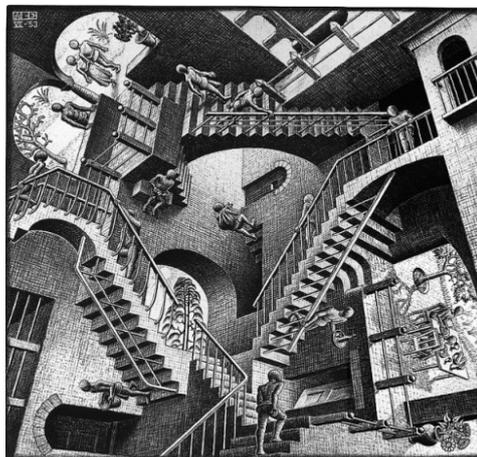


fig. 16 – Disegno di *Escher*

I prossimi anni vedranno una crescita importante nell'implementazione dei Sistemi Complessi, intesi come lo sviluppo e realizzazione di apparati e sistemi produttivi tecnologici in grado di rispondere efficacemente alla sempre maggiore richiesta di soluzioni semplici, efficienti, poco costose e flessibili. Tanto maggiore sarà il grado di raggiungimento di questi risultati/performance e tanto maggiore sarà la complessità del Sistema. Quindi, il *design* sarà la fase più critica alla realizzazione di quanto sopra. E sarà ancor più vera l'assunzione *che tanto più un Sistema è "friendly" tanto maggiore è la sua complessità intrinseca*. Cosa quest'ultima che non ne deve di fatto ridurre l'affidabilità.

L'aspetto forse più interessante da trattare al termine di questo lavoro è quello relativo agli utilizzatori dei Sistemi Complessi. Nei decenni scorsi la tecnologia spinta al limite era caratteristica solo di alcuni

settori di nicchia quali, ad esempio, l'aerospazio e la difesa. Oggi, grazie allo sviluppo di nuove tecnologie (miniaturizzazione dell'elettronica, nuovi materiali, nuovi processi produttivi) il Sistema Complesso entra nella vita e nella quotidianità di tutti. Un cellulare, un *tablet* sono l'esempio più concreto di tutto questo, essendo, infatti, dispositivi con potenze di calcolo e di elaborazione notevolmente superiori agli strumenti elettronici/informatico con i quali si è lavorato in grandi Programmi quali, ad esempio, le missioni Gemini/Apollo. Sembra quasi in contro senso in quanto quest'ultimi, limitati/costosi/ingombrati erano usati da pochissime persone e per applicazioni "al top", mentre i primi sono strumenti ad uso globale e su tematiche che sono le più disparate (basti pensare alle migliaia di App fino ad oggi sviluppate).

È bene concludere, non dimenticando una cosa fondamentale...*che per quanto complesso sia un Sistema, sarà solo il frutto dell'intelligenza umana...che rimarrà sempre e, comunque, superiore e inimitabile.*

Bibliografia

1. *INCOSE (International Council on Systems Engineering), "System Engineering Handbook, a guide for System Life Cycle Processes and Activities" version 3.1, 2007*
2. *Marco Lisi "Cos'è il System Engineering", M. Lisi, Telespazio, 2006*
3. www.incose.org
4. *The Global Industrial Complex: System of Dominations, Steven Best, Richard KahnAnthony J. Novella II, Peter MacLaren- Lixington Books, 2011*
5. *Reliability Centered Maintenance*, R.T. Anderson e L.Neri – 1990, Elsevier Applied Science
6. http://www.lescienze.it/news/2013/04/11/news/sistemi_complexi_soglia_collasso_resilienza_popolazioni-1608130/
7. <http://www.nature.com/nature/journal/v496/n7445/full/nature12071.html>
8. http://www.lescienze.it/news/2012/02/06/news/metodo_matematico_prevedere_collasso_sistemi_complexi-832561/
9. <http://www.ploscompbiol.org/article/info%3Adoi%2F10.1371%2Fjournal.pcbi.1002360#pcbi.1002360-Gross1>

Breve Biografia degli Autori



Marco Regi

Laurea in Ingegneria Aerospaziale
Laurea in Ingegneria Astronautica
Dottorato di Ricerca in Ingegneria Aerospaziale
È Stato Assegnista di Ricerca presso la Scuola d'ingegneria Astronautica dell'Università degli Studi di Roma "La Sapienza"

È Autore di oltre 60 pubblicazioni su Riviste e Congressi nazionali ed internazionali
Docente presso Corsi Universitari, Master e Ordini Professionali
Lavora da oltre dieci anni nel settore dell'Aerospazio e della Difesa
È membro della Commissione Ingegneria dei Sistemi Complessi presso l'Ordine degli Ingegneri di Roma e Provincia, per la quale coordina le attività di Formazione e le Pubblicazioni Scientifiche.



Francesco Sintoni

Laurea in Ingegneria Nucleare presso l'Università degli Studi "La Sapienza"
Specializzazione biennale in Ingegneria Nucleare
Progettista senior di impianti in ambito nucleare
Borsa di Studio presso Centro di Ricerca industriale e ricercatore su problematiche di protezione delle superfici
Corsi di formazione scientifici, tecnici e manageriali presso università e centri di ricerca europei
Responsabile in fasi successive di funzioni (tribologia e materiali funzionali, laminazione e diagnostica, ecc.) e di progetti in qualità di capo progetto
Membro della commissione UNI sulla formazione degli indici di manutenzione
Rappresentante italiano presso comitati europei sia in ambito siderurgico che militare
Market Manager Developer nel settore dell'Aerospazio e della Difesa
Market Manager Developer per l'aerea dell'estremo oriente asiatico
Market Manager Developer nel settore dell'Oil&Gas
Autore di pubblicazioni e brevetti nel settore delle superfici e del manufacturing
Congressi nazionali ed internazionali
Docente presso Corsi Universitari, Master e Ordini Professionali
Correlatore di Tesi di Laurea presso Università italiane
Lavora da circa trent'anni nell'ambito della Ricerca Industriale
Attualmente iscritto al Corso di Laurea in Ingegneria Aerospaziale presso l'Università degli Studi "La Sapienza".
Collabora come Specialista Scientifico Esterno con la Commissione Ingegneria dei Sistemi Complessi dell'Ordine degli Ingegneri di Roma e Provincia, nel quale ha svolto attività di docenza negli anni passati.



Michele Nava

Laurea in Ingegneria delle Telecomunicazioni
È Autore di pubblicazioni sulla Rivista "Media 2000".
Ha svolto delle ore di docenza nel Master in System Engineering presso l'Università di Tor Vergata
Lavora da sette anni nel settore dell'Aerospazio e della Difesa.
E' Presidente della Commissione Ingegneria dei Sistemi Complessi presso l'Ordine degli Ingegneri di Roma e Provincia.