

Progettazione di sistemi complessi tramite il 'Systems Engineering' e interoperabilità tra modelli funzionali e numerici

*Original*

Progettazione di sistemi complessi tramite il 'Systems Engineering' e interoperabilità tra modelli funzionali e numerici / Brusa, Eugenio; Ferretto, Davide. - ELETTRONICO. - (2015), pp. 1-10. (Intervento presentato al convegno 44° Convegno Nazionale AIAS tenutosi a Messina nel 2-5 Settembre, 2015).

*Availability:*

This version is available at: 11583/2630597 since: 2016-02-10T08:50:01Z

*Publisher:*

Associazione Italiana per l'Analisi delle Sollecitazioni (AIAS)

*Published*

DOI:

*Terms of use:*

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

*Publisher copyright*

default\_conf\_editorial [DA NON USARE]

-

(Article begins on next page)

## PROGETTAZIONE DI SISTEMI COMPLESSI TRAMITE IL 'SYSTEMS ENGINEERING' E INTER-OPERABILITÀ TRA MODELLI FUNZIONALI E NUMERICI

E. Brusa, D. Ferretto

*Politecnico di Torino – Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale,  
Corso Duca degli Abruzzi 24, 10129 Torino, e-mail: eugenio.brusa@polito.it, davide.ferretto@polito.it*

### Sommario

La crescente richiesta del mercato verso prodotti intelligenti, capaci di adattarsi autonomamente a condizioni di esercizio variabili, motiva l'incremento di complessità di molti sistemi. Il 'Systems Engineering' si propone come efficace metodologia per affrontare il problema dello sviluppo e della gestione di sistemi complessi. I modelli che introduce si soffermano, infatti, sull'analisi dei requisiti e degli scenari operativi e sulla preliminare definizione di blocchi funzionali e di architetture del sistema che prescindono dai componenti utilizzabili, per permettere un'ottimizzazione della configurazione. Questo lavoro propone una panoramica del metodo applicato a due casi, di ambito meccatronico e aeronautico, esponendo come le attività di modellazione numerica e funzionale si integrano tra loro, anche a livello di software, per raggiungere la cosiddetta interoperabilità tra strumenti di lavoro.

### Abstract

The growing demand of market towards smart products, being able of self-adapting to variable operating conditions, motivates some increased complexity of several systems. The 'Systems Engineering' is proposed as an effective methodology to face the difficulties related to the development and management of complex systems. Models applied by this approach are specifically focused on a deeper requirement analysis, on the operating scenarios and on a suitable definition of functional blocks and architectures, being uncoupled to the selection of components and devices, to allow an optimization of the system configuration. This paper shows an overview of the methodology applied to two test cases, namely a mechatronic and an aerospace system, respectively. It investigates how functional and numerical modeling activities are integrated, by considering even the software used for this purpose, thus performing the so-called interoperability among the design tools.

**Parole chiave:** Progettazione dei sistemi, 'Systems Engineering', modellazione funzionale, simulazione numerica e validazione, analisi dei requisiti.

### 1. INTRODUZIONE

La metodologia del 'System Engineering' è stata concepita per supportare tutte le attività inerenti la progettazione di sistemi complessi, al fine di aiutare il progettista a definire l'architettura del sistema, con una visione globale sull'intero ciclo di vita del prodotto, dalla concezione al ritiro dal mercato [1]. La sua formulazione è giustificata da una crescente complessità dei sistemi industriali e dei loro scenari operativi. Questi rendono difficile il controllo delle persone coinvolte, della documentazione e degli strumenti, anche software, che sono utilizzati, in un processo integrato di sviluppo prodotto che include concezione, progettazione, produzione e post vendita. La complessità del sistema spesso deriva dal numero di funzioni implementate, che richiedono di articolarne l'architettura in vari

sottosistemi e componenti, la cui interazione in esercizio non è facilmente prevedibile. Ne segue che una modellazione sia qualitativa delle funzioni e delle parti che quantitativa, basata su modelli matematici (in questo ambito impropriamente detti ‘fisici’), permette una simulazione a priori del comportamento del sistema e di definire una configurazione ottimale, quanto a soddisfacimento dei requisiti di progetto. Si è dimostrato che proprio un’incompleta identificazione dei requisiti sta alla base di tardive e costose reingegnerizzazioni di prodotto e motiva l’accento che il ‘Systems Engineering’ pone sull’investimento di risorse più consistente nelle fasi di analisi dei fabbisogni del cliente, di definizione dei requisiti di sistema e di progettazione concettuale, secondo la pratica del ‘left shifting’ della curva di investimento economico sull’asse temporale [2]. In questo lavoro si vuole rappresentare l’impatto che questo approccio può avere sulla progettazione di sistemi e macchine, facendo ricorso a due esempi pratici, sviluppati dagli autori, in altrettanti progetti industriali.

## 2. OBIETTIVI E CONTENUTI DEL ‘SYSTEMS ENGINEERING’

Il ‘Systems Engineering’ presenta alcuni aspetti rilevanti. Il primo consiste nella *metodologia* che propone un preciso percorso di sviluppo del sistema, tipicamente rappresentato dal cosiddetto diagramma a ‘V’ di Fig.1. Esso sottolinea come il processo debba partire dall’analisi dei requisiti, svolta in funzione dei fabbisogni del committente, e procedere dall’analisi dell’intero sistema verso quella di dettaglio dei componenti. Contemporaneamente ogni attività di progettazione (a sinistra in Fig.1) è correlata (a destra) con un’azione di collaudo e verifica o di fattibilità in termini di produzione e assemblaggio, per cui il progettista è chiamato a prevedere tra i requisiti, per ogni elemento introdotto, anche opportuni test di funzionamento e verifiche per la sua realizzazione e integrazione nella produzione, nonché indici di prestazione in esercizio.

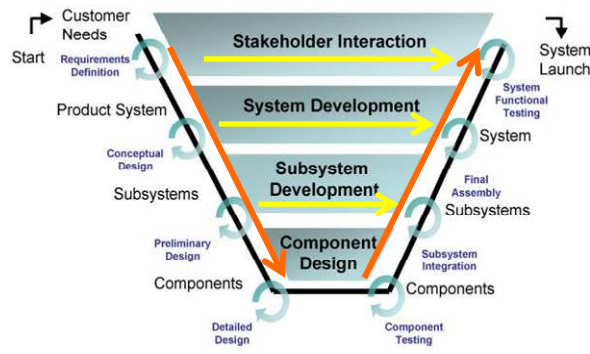


Figura 1: Diagramma standard di sviluppo prodotto secondo il ‘Systems Engineering’ [1,2]

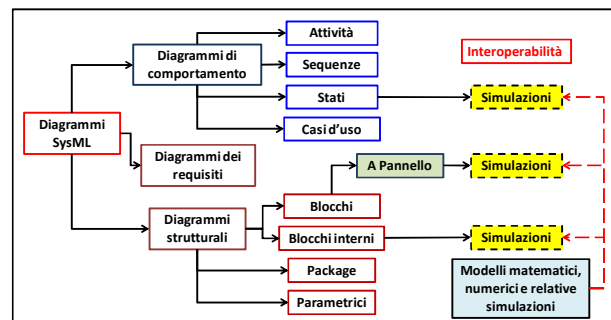


Figura 2: Sinossi dei diagrammi utilizzati dal ‘System Engineering’ e nodi di interoperabilità.

In molti casi la scrittura dei requisiti è difficile, anche per effetto di una malintesa loro classificazione. In molti campi si attribuisce un’importanza esclusiva alle richieste del cliente (*customer needs*) oppure ai requisiti imposti dalla normativa tecnica, trascurando sia vincoli più propriamente tecnologici, tipici del contesto tecnico, che gli obiettivi di innovazione che si vogliono cogliere. Un tipico esempio è il campo della meccatronica, in cui l’impiego di molte funzioni di controllo attivo implica un utilizzo intensivo di dispositivi di conversione dell’energia, per i quali talora non esistono normative tecniche di riferimento. Lo stesso concetto di intelligenza (*smartness*) dei sistemi meccatronici non è implementato in modo univoco, nonostante alcune definizioni condivise in letteratura [3]. Questo aspetto è affrontato dal ‘Systems Engineering’ con l’introduzione di un percorso dedicato all’analisi dei requisiti, del comportamento e dell’architettura di tipo sinottico (Fig.2). Un secondo rilevante aspetto del ‘Systems Engineering’ è l’esistenza di un *linguaggio standard* (System Modeling Language, SysML) derivante dall’ingegneria dei sistemi informatici. Esso si basa sulla rappresentazione di diagrammi, che, pur non avendo contenuto matematico, delineano le funzioni espletate dai vari attori e dagli elementi del sistema nelle varie fasi di esercizio, in relazione ai requisiti, che sono *allocati* sulle funzioni e sui componenti stessi. Ciò realizza la loro *tracciabilità*. Il

limite di questa rappresentazione è che non rappresenta quantitativamente il comportamento del sistema, anche se ne coglie le criticità in termini di funzioni o componenti mancanti, erronee sequenze di attivazione, incerte gerarchie di controllo, o conflitti nei flussi delle informazioni o della potenza. Questo strumento permette di eseguire l'*analisi funzionale* del sistema, da integrare con quella più nota che ne descrive il comportamento (indicata come *fisica*). Esistono già *software dedicati*, che implementano il linguaggio, mentre sono attualmente allo studio estensioni per connetterli con strumenti quali, ad esempio, MATLAB/Simulink®. Questi connettori sono un importante oggetto di ricerca, in quanto è essenziale per una completa integrazione del metodo con le tecniche di indagine, anche numeriche, utilizzate per la progettazione di macchine e sistemi. Ulteriore aspetto di interesse è la *documentazione*. In passato tutta l'opera di investigazione concettuale pregressa alla realizzazione di disegni preliminari era poco documentata, cosicché i progettisti ne erano unici depositari, non offrendo garanzia di una completa trasmissione tra generazioni. I modelli funzionali e logici del "Model Based Systems Engineering" (MBSE) permettono di condividere tra progettista, committente e fornitore, già in avamprogetto dettagli sufficientemente nitidi del sistema da evidenziarne le criticità, anche se non sono quantitativamente definiti. Il processo di ingegneria approntato per un prodotto potrà essere ampiamente *riutilizzato* in fase di rinnovamento, in occasione della creazione di nuovi modelli, abbattendo ulteriormente i costi di sviluppo. Ogni modifica in fase di progettazione potrà essere inoltre registrata, accolta o scartata, con evidenza motivata e trascritta, operando così un efficace *controllo sulle variazioni progettuali*.

In termini di infrastrutture l'implementazione del MBSE esige la creazione di una *piattaforma* per la condivisione e l'immagazzinamento dei dati in una rete aziendale, configurata con vari server, e la loro elaborazione, attraverso un lavoro collaborativo operato con specifici strumenti di lavoro, in una cosiddetta '*tool chain*' informatica. Essa permette di superare l'approccio documentale, benché non siano poche le criticità da affrontare nella sua realizzazione, specie se si mira ad utilizzare un ambiente '*cloud*' anziché confinato, per accedere al nuovo mondo della tecnologia di '*internet of things*'.

### 3. ESEMPI DI APPLICAZIONE E STUDIO

Impatto e benefici sul processo di progettazione di un sistema complesso saranno esaminati nel seguito per mezzo di due esempi, risultato delle attività svolte in due diversi settori industriali.

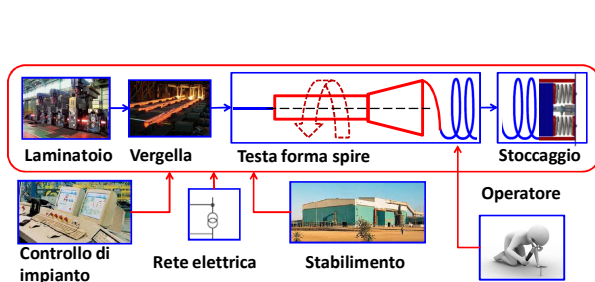


Figura 3: Caso meccatronico, formazione di spire da vergella in acciaio.

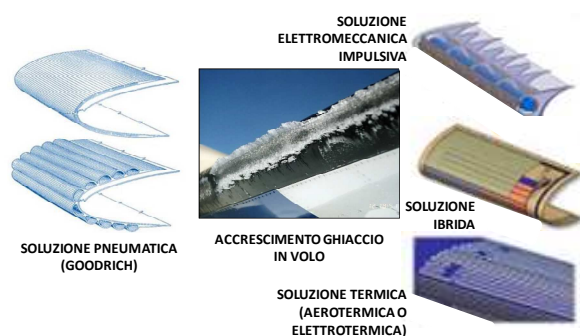


Figura 4: Caso aeronautico, impianto di sghiacciamento o antighiaccio.

Il primo caso consiste di una testa forma spire rotante per lo stoccaggio di vergelle in acciaio e costituisce un'applicazione meccatronica di progettazione di impianti industriali. E' un rotore modulare a sospensione attiva, di cui si è inteso verificare la completezza dei requisiti e delle funzioni, in assenza di un completo panorama normativo. Il secondo caso, invece, è relativo al sistema antighiaccio aeronautico, imbarcato su un velivolo da trasporto regionale, utilizzato per la protezione delle velature e delle prese d'aria dei motori durante il volo. Di questo esempio si intendono evidenziare le criticità di progettazione nell'ambito del sistema velivolo e della sicurezza. Esso è fortemente condizionato dall'applicazione di norme tecniche internazionali, che ne regolano il funzionamento, specie in relazione alle condizioni atmosferiche. Il MBSE è stato utilizzato per

impostare una selezione della soluzione costruttiva, confrontando attuazioni di tipo pneumatico ed elettrico e integrando modelli funzionali e fisici del sistema, sviluppati per entrambe le soluzioni.

### **3.1 Sistema mecatronico (caso A)**

La vergella, prodotta da un laminatoio, giunge a fine percorso con una velocità lineare di circa 125 m/s e necessita di essere immagazzinata e trasportata a destinazione. Pertanto si converte il suo moto di traslazione in uno rotazionale, in modo da realizzare ampie spire, così da frenarne la corsa e creare bobine di facile trasporto. La vergella entra in un albero rotante cavo, collegato ad una testa che, per la sua conformazione, la conduce a formare una spira centrifugandola verso la corona esterna, da cui poi esce per essere immagazzinata in bobine. Il rotore, composto di albero e testa, è soggetto a severa usura, specie nei supporti, a causa dello squilibrio a cui è esposto per effetto del passaggio della vergella e dal contatto tra i materiali. L'usura è critica quando non vi è sincronizzazione tra il moto della vergella e la velocità angolare del rotore. Lo squilibrio del rotore è cospicuo a causa dell'irregolare distribuzione della massa della vergella all'interno della testa. L'esigenza espressa dal costruttore è quella di ridurre sensibilmente l'usura dei materiali e dei cuscinetti, ma anche di aumentare la sicurezza del sistema, attuando controlli attivi sulla sincronizzazione, sulla stabilità dinamica e sulla velocità di rotazione del rotore. Nel caso specifico, si richiedeva la verifica dell'impatto di una sospensione magnetica attiva nel contesto siderurgico, in carenza di un chiaro riferimento normativo [5].

### **3.2 Sistema aeronautico (caso B)**

L'ambito aeronautico è da più tempo orientato all'impiego del 'System Engineering', in quanto eredita molte delle conoscenze in uso dal settore spaziale e si avvale dell'organizzazione in consorzi internazionali di costruttori. Tuttavia, questo esempio offre un approfondimento dei temi della creazione della piattaforma di sviluppo prodotto e del cosiddetto *trade-off* della configurazione. L'impianto antighiaccio è applicato ad un nuovo turboelica per il trasporto regionale. Tale velivolo è notoriamente esposto all'accumulo di ghiaccio in crociera, in quanto vola a quote in cui l'acqua contenuta nelle nubi è sopraffusa in sospensione, liquida anche sotto lo zero termico, e ghiaccia istantaneamente quando impatta contro le superfici del velivolo. Ciò provoca un aumento di peso, di resistenza aerodinamica e una diminuzione di portanza. Tra le soluzioni utilizzate per contrastare l'accrescimento di ghiaccio su velature, prese d'aria dei motori e impennaggi, una tipica è il sistema aeromeccanico Goodrich, che utilizza sacche gonfiabili per rompere gli strati di ghiaccio superficiali, quando raggiungono un certo spessore. Tuttavia, sono in fase di sviluppo nuovi sistemi che combinano l'azione del riscaldamento ottenuto per effetto Joule ad azioni meccaniche applicate da attuatori piezoelettrici, installati all'interno della struttura, oltre ad altri che utilizzano un recupero di aria calda dalla propulsione. Le nuove soluzioni richiedono minore potenza, in confronto con gli impianti esistenti e hanno masse e volumi più contenuti. Peraltro, le azioni prodotte sulla struttura devono evitare danneggiamenti o l'instaurarsi di pericolosi effetti dinamici [6].

## **4. IMPLEMENTAZIONE DELL'APPROCCIO 'MBSE'**

### **4.1 Analisi preliminare dei requisiti**

Nel caso B, i requisiti provengono sostanzialmente dalle normative emanate dalle Agenzie internazionali per la sicurezza del volo, dalle richieste del cliente, che individua un tipico profilo di missione, nonché dai costruttori delle interfacce che il sistema prevede con altri equipaggiamenti (alimentazione elettrica/pneumatica, installazione, vincoli strutturali...). Essi sono confrontati con la tradizione aziendale del costruttore del velivolo. La classificazione è operata in base al contenuto che il requisito esprime, indipendentemente dalla provenienza. Un software per la gestione dei requisiti, come ad esempio IBM Rational DOORS®, li raccoglie in un'unica lista, suddivisi per categorie, tipicamente in 'funzionali', 'operazionali' e 'costruttivi', anche se questo settore prevede dettagli distinti per gli aspetti di performance, caratteristiche fisiche, sicurezza, affidabilità e manutenzione. La completezza della lista, in questa fase, è spesso incerta, per cui l'analisi funzionale che segue aiuta a

dettagliarne meglio i contenuti e ad allocarli in funzioni e componenti del sistema. Questo avviene ancor di più nel caso A, maggiormente atipico, in quanto a fronte di alcune specifiche generali sul contenimento dell'usura e sull'implementazione di un sistema di sospensione e controllo attivo del rotore, il cliente esprimeva altri fabbisogni, relativi a peso, volume, impatto ambientale, manutenibilità, affidabilità e monitoraggio del processo, non meglio dettagliati, né facilmente correlabili a normative puntuali di riferimento. In questo caso gli obiettivi di innovazione legati alla 'smartness' applicata alle funzioni di controllo attivo dei parametri del rotore non erano noti, se non in modo generico, come può suggerire la letteratura del settore.

#### 4.2 Analisi funzionale e operativa del sistema

Il linguaggio SysML prevede l'impiego, secondo una sequenza consigliata [4], di almeno alcuni dei diagrammi standard di Fig.2, dopo che una preliminare lista di requisiti è stata definita da un'indagine condotta sui fabbisogni del committente o del mercato. Questa analisi funzionale, in genere, incrementa il dettaglio dei requisiti e porta in luce esigenze talora sfuggite ad una prima osservazione. L'analisi funzionale è stata svolta per entrambi i casi di studio, con modalità leggermente diverse, in quanto nel caso B si è seguito l'approccio Harmony©IBM [4], mentre in quello A si è sperimentata qualche variante, per mantenere alcune prassi di sviluppo già consolidate nel settore. Il punto di partenza è il *diagramma dei casi d'uso*, nel quale i "portatori di interesse" (*stakeholder*), ovvero gli attori animati e inanimati che interagiscono con il sistema, sono evidenziati come figure antropomorfe ai margini del perimetro del sistema stesso, all'interno del quale sono elencate le varie attività che svolgono (casi d'uso) e le funzioni che definiscono ogni interazione (Fig.5). Questa rappresentazione, apparentemente banale, ha il pregio: di evidenziare i limiti del sistema rispetto a quello che eventualmente lo contiene o ad altri che coesistono nello stesso; di identificare attori talora misconosciuti che hanno un ruolo importante sul funzionamento o sulle disfunzioni del sistema; di distinguere tra varie condizioni operative, per le quali si applicano requisiti differenti.

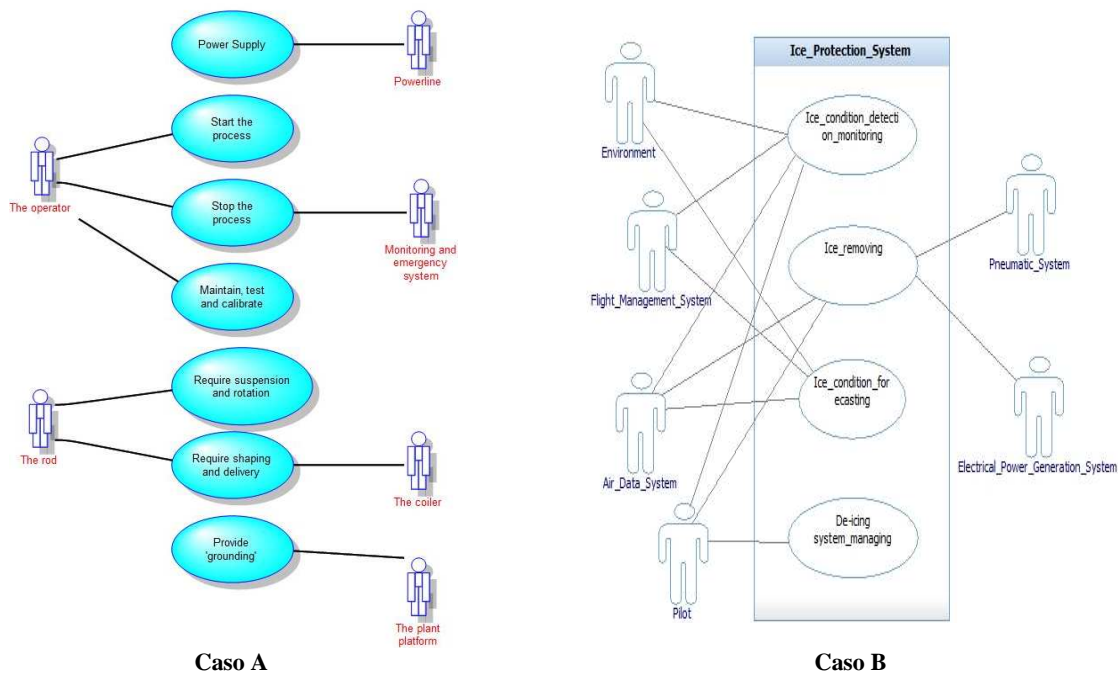


Figura 5: Diagrammi dei casi d'uso, con stakeholder e funzioni.

Nel caso A, ad esempio, questo diagramma evidenzia come la mancanza di alimentazione di rete elettrica sull'impianto può causare una condizione di guasto sulla testa forma spire in levitazione magnetica, senza un'unità di continuità. Parimenti la funzione di supporto che offre la piattaforma dello stabilimento può essere origine di due effetti indesiderati, se si considera che essa fissa al terreno il rotore, ovvero la trasmissione di eccitazioni di natura sismica e di vibrazioni ambientali, e problemi

di natura elettrica correlati con la fase neutra. Quest'ultimo aspetto ha rivelato al costruttore l'origine di problemi di cortocircuito tra rotore e statore per effetto del contatto simultaneo della vergella con l'interno dell'albero in rotazione, in assenza di un isolante, e con il piano di trasporto della vergella. Nel caso B il diagramma evidenzia problemi di gerarchia nel controllo di certe funzioni, come l'ordine di eseguire lo sghiacciamento, tra sistema di controllo velivolo e pilota, ma anche la necessità di modellare l'ambiente esterno per adottare modelli di accrescimento del ghiaccio diversi a seconda della combinazione tra quota e condizioni atmosferiche.

Il diagramma consente di allocare i requisiti, correlandoli ai casi d'uso con la semantica appropriata (Fig.6). Per questo serve realizzare un collegamento diretto tra il software che raccoglie le forme verbali di espressione dei requisiti e quello che implementa i diagrammi del MBSE. La piattaforma informatica prevede, quindi, il software di gestione dei requisiti, come ad esempio IBM Rational DOORS®, e un software in ambiente SysML compatibile, come Artisan Studio® di Atego (oggi PTC Integrity Modeler®) (caso A in Fig.5) o IBM RHAPSODY® (caso B, in Fig.5). Questo permette un riversamento dei contenuti della lista dei requisiti in SysML e un loro aggiornamento nel caso di modifiche dei diagrammi collegati (Fig.6). Ogni requisito è codificato, cosicché, nel caso di reingegnerizzazione del prodotto, si possa accedere alla sua revisione a fronte della modifica apportata.

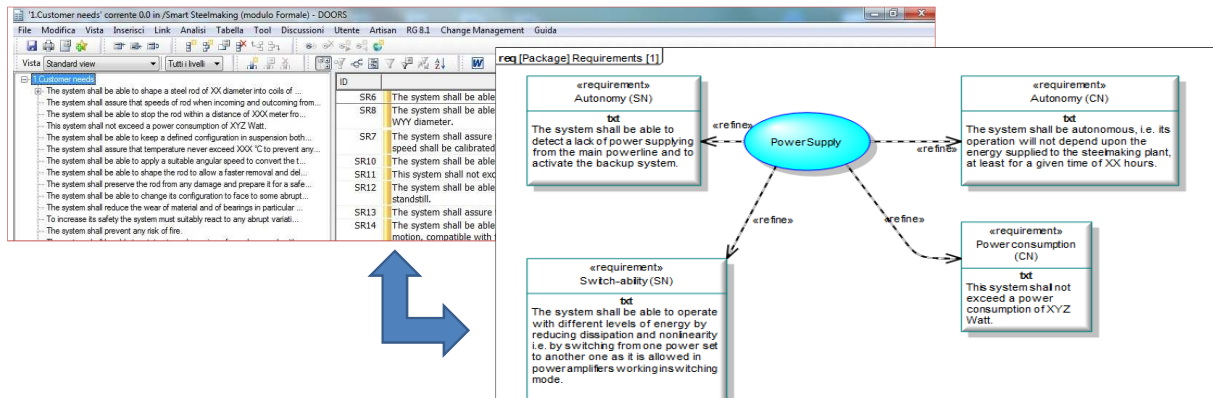


Figura 6: Tracciabilità tra requisiti e casi d'uso del sistema, tramite connessione tra gestore dei requisiti (a sinistra) e diagramma dei requisiti in linguaggio SysML (a destra).

A seconda del percorso seguito dall'utente, dopo la definizione dei casi d'uso, si procede al tracciamento dei diagrammi di attività, delle sequenze (temporali delle operazioni) e degli stati del sistema. Questa fase realizza l'analisi operativa, che evidenzia azioni e funzioni che gli attori eseguono interagendo con il sistema. Le linee guida del metodo Harmony©IBM, seguito nel caso B, prevedono l'analisi dei requisiti, l'analisi funzionale e la sintesi del progetto. Pertanto, esse indicano di eseguire i diagrammi di attività, delle sequenze e degli stati, in quest'ordine. Nel caso A, il sistema si colloca all'interno dell'intero ciclo di laminazione, che procede dalla colata alla distribuzione, e che è monitorato da un controllo di processo, che autorizza le varie operazioni e gestisce allarmi ed emergenze (Fig.3). Poiché in questo caso la sequenza delle operazioni è dominante nel sistema, l'analisi funzionale è stata fondata sul diagramma delle sequenze temporali delle operazioni, che specifica le azioni eseguite lungo un asse temporale verticale dai vari attori, ordinati in colonne (Fig.7). Il diagramma descrive ogni scenario operativo e le interazioni con il sistema, raffigurato sulla colonna di destra, pertanto è parte integrante dell'analisi operativa. Da questo diagramma sono emerse peculiarità del caso in esame, come l'esigenza di autorizzare l'avvio del rotore tramite verifica della torre di controllo dell'impianto, su richiesta di un operatore in linea, che è rilasciata solo se non c'è passaggio di vergelle a monte, se la temperatura ambientale è sotto controllo (contro rischi di incendi) e l'alimentazione dalla rete elettrica è regolare. In questo caso il diagramma di attività è meno significativo, mentre si utilizza una rappresentazione degli stati della macchina, come in Fig.8, derogando dalle linee guida di Harmony©IBM. Tale diagramma focalizza l'attenzione sul sistema, evidenziando le varie fasi operative a cui è sottoposto, come apparirebbe ad un osservatore che periodicamente lo monitorasse (deposto e fermo, levitato, in rotazione ...).

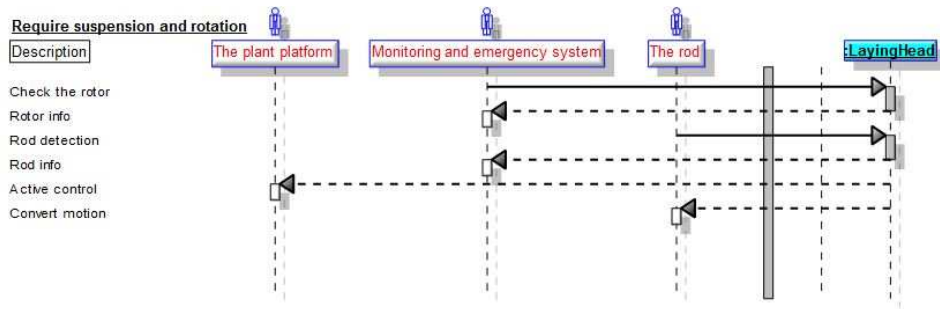


Figura 7: Diagramma delle sequenze per il caso A, nella fase di sospensione e rotazione.

Nel caso A il diagramma degli stati ha evidenziato l'esigenza di operare una calibrazione del centraggio dell'albero a rotore fermo, per ogni riavvio della macchina, a causa della criticità dello squilibrio a cui è sottoposto. Tale dettaglio ha imposto l'inserimento di ulteriori requisiti funzionali e operativi.

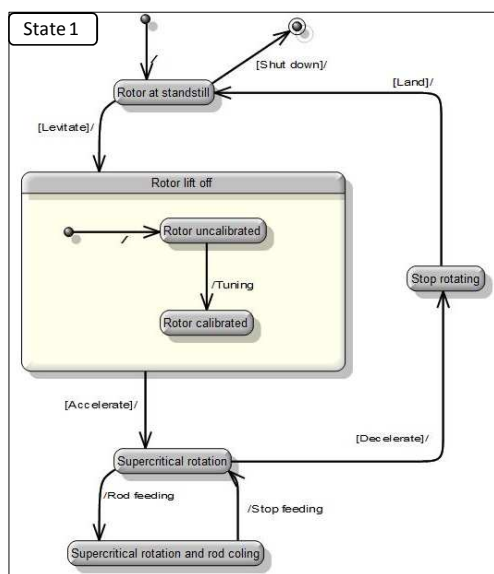


Figura 8: Diagramma degli stati per il caso d'uso di levitazione e rotazione (caso A).

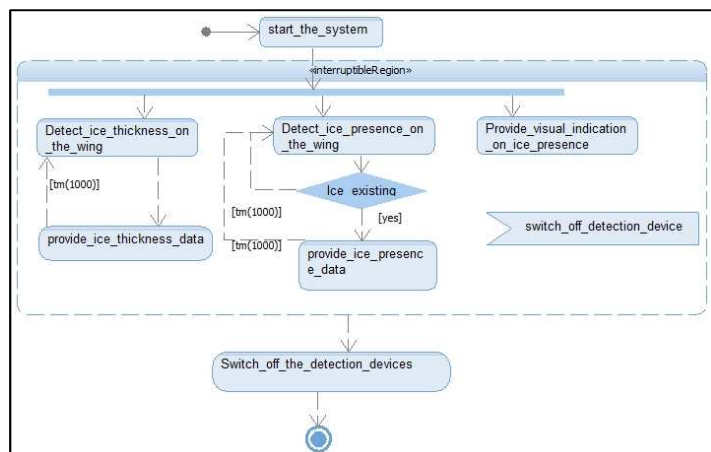


Figura 9: Diagramma delle attività per il caso d'uso di misura dell'accrescimento del ghiaccio (caso B).

Nel caso B, l'analisi è partita dalle attività, seguendo le linee guida, poiché essendo il sistema un attuttore che ha l'obiettivo di rilevare la presenza del ghiaccio, misurarne lo spessore e, raggiunto un certo valore, attivare il sottosistema di attuazione, si esemplifica meglio il funzionamento descrivendo le attività svolte. A livello di software, il tracciamento ordinato dei diagrammi secondo le linee guida beneficia di alcuni automatismi, come l'esecuzione di alcuni passaggi in automatico. Il diagramma di attività, ad esempio, definisce le azioni che il sistema svolgerà secondo un flusso logico, definito nel diagramma delle sequenze, che il programma usa come verifica del modello e come riferimento per la simulazione. Questo procedimento è assente nel modello del caso A, avendo direttamente derivato il diagramma delle sequenze e omesso quello delle attività. In entrambi i casi il diagramma degli stati è rilevante poiché definisce la modalità di funzionamento attuata per ogni operazione eseguita e le transizioni da una modalità ad un'altra. Inoltre, sintetizza le informazioni derivate dall'analisi funzionale e permette una simulazione. In entrambi i software descritti, infatti, è possibile lanciare una simulazione, controllabile attraverso appositi pannelli ('panel diagram'), per osservare il comportamento qualitativo del sistema in presenza di particolari condizioni di input. L'animazione di tali diagrammi offre al committente almeno una preliminare previsione del comportamento del sistema, in termini di concatenazioni di cause ed effetti. Tuttavia non ha basi quantitative, che provengono da altri ambienti di lavoro, che possono essere inter-operati attraverso connettori software.



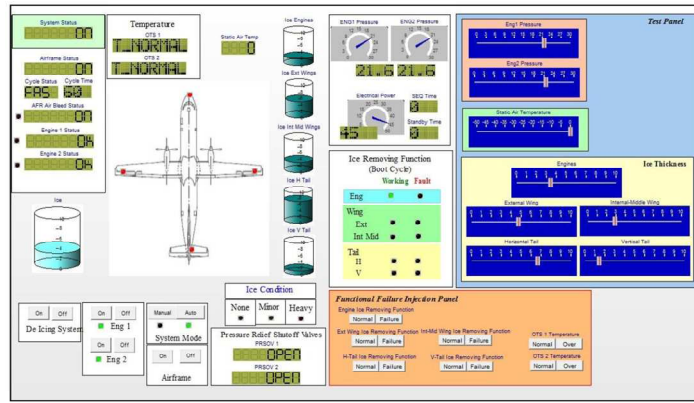


Figura 10: Diagramma a pannello per la simulazione formale (non dinamica) del caso B.

### 4.3 Analisi dell'architettura del sistema

L'approccio MBSE induce il progettista ad una certa astrazione, per evitare che sviluppi il prodotto sulla base di soluzioni e componenti già ampiamente utilizzati. L'architettura del sistema, infatti, include dapprima solo funzioni ('black box'), articolate secondo una precisa logica, che prescinde dal componente materiale che si utilizzerà.

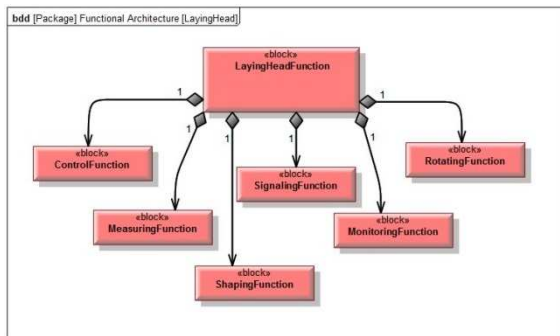


Figura 11: Albero funzionale (caso A).

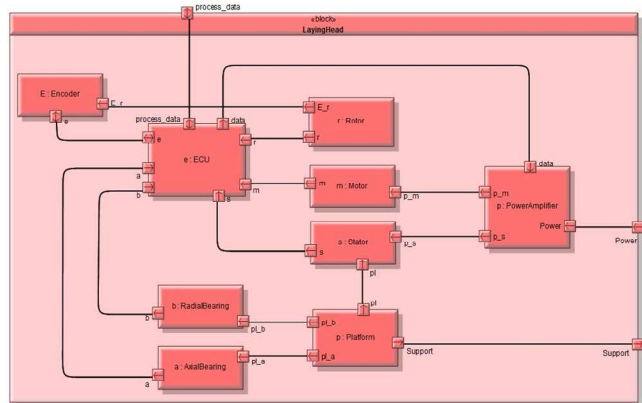


Figura 12: Architettura in blocchi interni (caso A).

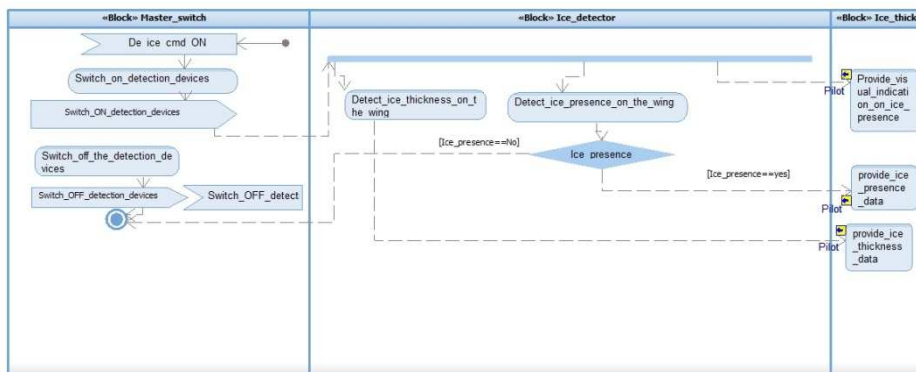


Figura 13: Partizione del diagramma delle attività in 'swimlanes' (caso B).

Una volta che la struttura è ritenuta soddisfacente, si definiscono blocchi funzionali reali, capaci di svolgere le funzioni descritte ('white box'), che solo in ultima istanza si trasformeranno in componenti ben definiti. A ogni passo dell'analisi i requisiti sono associati agli elementi del modello, in modo da garantire una copertura completa, per allocazione diretta. L'architettura è definita da un albero

funzionale, in un diagramma a blocchi (Fig.11). Da questo si origina un diagramma a blocchi interni (IBD) che rappresenta la strutturazione del sistema, le comunicazioni tra le parti e con l'esterno (Fig.12), da cui è possibile avviare una simulazione. Il metodo Harmony® utilizza la suddivisione del diagramma di attività finale, contenente le operazioni già istanziate, mediante le cosiddette 'swimlane' (Fig.13), per identificare i blocchi dell'albero funzionale. Questa fase corrisponde alla sintesi del progetto. Soprattutto per le operazioni di trade-off della configurazione l'analisi finora descritta spesso è insufficiente se non correlata da una simulazione quantitativa su base numerica, che è oggi integrata con questa per mezzo di connettori

## 5. INTEROPERABILITA' CON I MODELLI NUMERICI

La predizione del comportamento dinamico è eseguita nei casi A e B risolvendo nel tempo equazioni di equilibrio che descrivono il sistema. Programmi sviluppati in Matlab® e Simulink® permettono di rilevare alcune prestazioni in esercizio. Nel caso A, è essenziale una valutazione della stabilità dinamica tramite il calcolo della velocità angolare di soglia, nonché delle velocità critiche e della risposta allo squilibrio [7]. Nel caso B si consideri che le Agenzie di aeronavigabilità al momento non certificano alcune soluzioni ancora troppo poco studiate, pertanto si è scelto di comparare la soluzione Goodrich e quella elettrotermica, compatibile con il nuovo obiettivo del velivolo 'all-electric', mentre l'opzione aerotermica è esclusa, poiché difficilmente applicabile a questo segmento di mercato. I modelli fisici in questo caso sono due e forniscono la potenza richiesta nella riduzione dello spessore del ghiaccio, secondo profili e tassi di accrescimento specificati dalla normativa. La Fig.14 riporta lo schema del modello Simulink® per il sistema Goodrich, in cui il sottosistema di rilevazione del ghiaccio (in azzurro), comunica con quello di regolazione della portata d'aria (in rosa), che alimenta le sacche gonfiabili, distribuite su ali, prese d'aria dei motori e impennaggi di coda. La simulazione per una data condizione di accrescimento fornisce la velocità di gonfiamento, il volume delle sacche, la potenza richiesta e la pressione.

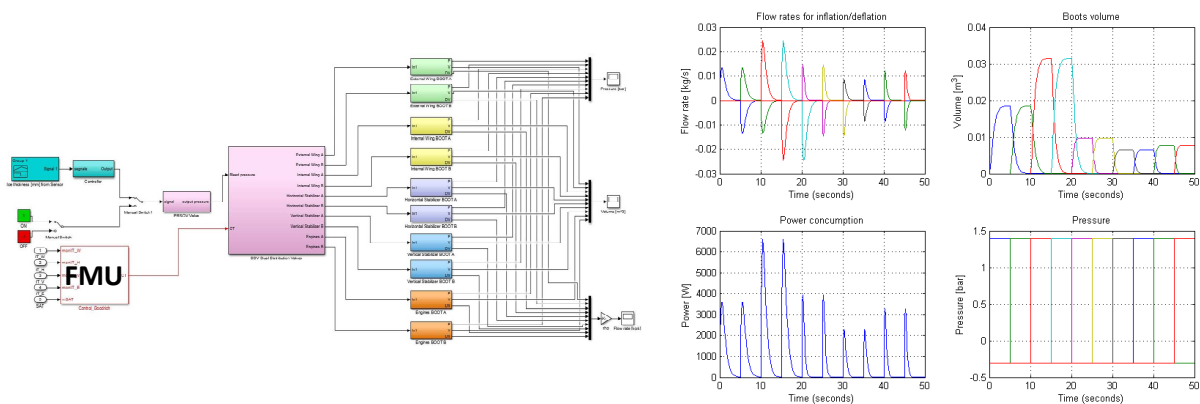


Figura 14: Modello Simulink® del sistema Goodrich

Le simulazioni numeriche hanno permesso anche di verificare l'efficacia della sequenza di attivazione delle sacche e di confrontare i risultati con quelli del modello del sistema elettrotermico, in cui si è sovrapposto un flusso di calore continuo, per mantenere le superfici ad una certa temperatura (azione antighiaccio) e uno ciclico, avente lo scopo di fondere il ghiaccio aderente, per permetterne il distacco (sghiacciamento). Per inciso, solo la simulazione numerica ha potuto rivelare che per proteggere l'intero velivolo, la potenza da erogare in 50 secondi, a parità di sghiacciamento, è nettamente superiore al caso precedente. Questo limite porta a preferire il Goodrich, più leggero e meno costoso, nonostante sia connesso all'impianto pneumatico e interferisca moderatamente con l'aerodinamica.

In termini di interoperabilità, i diversi software sono diversamente compatibili con gli ambienti utilizzati per la modellazione fisica. Nei casi in esame, uno scambio di dati tra i software è possibile, ma in forma differente. Esistono, infatti, connettori punto-punto, che collegano due strumenti grazie a interfacce appositamente sviluppate e integrate. Altri utilizzano, invece, standard di interoperabilità, con una sintassi univoca, supportata da più ambienti (come ad esempio OSLC). Artisan Studio®

supporta un'interfaccia dedicata del primo tipo con Simulink®, per cui vi esporta la struttura del diagramma a blocchi interno (Fig.12), replicandola nel formato che ammette l'inserimento del modello matematico. Ciò vincola le due analisi in quanto la sincronizzazione avviene anche in verso opposto, permettendo l'aggiornamento del modello funzionale e dei requisiti. Nel caso B, invece, si origina una cosiddetta 'simulazione eterogenea', basata su uno standard di interoperabilità. Rhapsody® ne supporta uno molto diffuso chiamato 'Functional Mock-up Interface' (FMI), che permette l'integrazione di diversi modelli in un unico ambiente di simulazione. Si definisce un'unità detta 'Functional Mock-up Unit' (FMU), direttamente nell'ambiente che contiene i dati originali, esportati poi in un programma ospite che esegue i calcoli secondo la modalità 'Model-Exchange'. Le unità FMU contengono, infatti, le librerie .dll del modello, oltre ad una descrizione .xml dello stesso. I diagrammi degli stati sono introdotti, in questo, caso in Simulink® come un blocco FMU non modificabile, proveniente da Rhapsody® per controllare l'attivazione del sistema antighiaccio. Allo stesso modo è possibile introdurre modelli dell'atmosfera ISA, di accrescimento del ghiaccio, di interfaccia con altri sistemi, provenienti da programmi come Modelica®, Dymola®, AMESim® e SimulationX®.

## 6. CONCLUSIONI

Il lavoro descrive un tipico processo di 'Model Based Systems Engineering' applicato alla progettazione di sistemi complessi, in due casi di ambito meccatronico e aeronautico. Si considerano sia i metodi di implementazione che gli strumenti software utilizzati. In una prima fase l'analisi funzionale, tipica del MBSE, si dimostra molto efficace nella gestione dei requisiti di progetto e nella loro allocazione in funzioni e componenti. Cruciale è, peraltro, il collegamento tra questi strumenti e quelli più noti di simulazione numerica usati in progettazione. Oggi è realizzato in forme diverse a seconda del software impiegato. Questo permette un'efficace selezione della configurazione del sistema, inoltre si presta ad un riutilizzo per versioni differenti dello stesso prodotto. L'approccio garantisce un controllo delle modifiche eseguite in progettazione, anche se appare evidente che strumenti e metodi del 'System Engineering' devono integrarsi anche con gli strumenti del Product Lifecycle Management (PLM) per una completa attività di definizione del prodotto.

## RINGRAZIAMENTI

Gli autori ringraziano i partecipanti al progetto ARTEMIS JU-CRYSTAL "Critical Systems Engineering Acceleration" per l'esperienza condivisa e annoverano il finanziamento del lavoro nell'ambito dell'azione di disseminazione culturale, WP1.02.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] A. Kossiakoff et al., *Systems engineering: principles and practice*, John Wiley & Sons, New York (2011).
- [2] P. Sage, W. Rouse, *Handbook of Systems Engineering and management*, John Wiley & Sons, New York (2008).
- [3] F. Mhenni et al., "A SysML-based methodology for mechatronic systems architectural design", *Advanced Engineering Informatics*, 28, 218-231 (2014).
- [4] H.P. Hoffmann, *Systems Engineering best practices with the rational solution for systems and software engineering*, IBM Corporation copyright, Somers, NY, USA (2006),.
- [5] E. Brusa, A. Calà, "Identifying the Smartness of a Mechatronic Coiler through the Systems Engineering", in Proc. INCOSE Conf. CIISE 2014, Rome, Italy, 116-125, (2014).
- [6] E. Brusa, A. Calà, S. Chiesa, F. De Vita, D. Ferretto, "Towards an effective interoperability of models within the 'Systems Engineering' applied to aeronautics", in Proc. INCOSE Conf. CIISE 2014, Rome, Italy, 38-47, (2014).
- [7] E. Brusa, "Semi-Active and Active Magnetic Stabilization of Supercritical Rotor Dynamics by Contra-rotating Damping", *Mechatronics*, 24, 500-510 (2014).