

Sviluppo di tecniche di simulazione eterogenea funzionale e numerica applicate all'ingegneria di sistemi aeronautici

*Original*

Sviluppo di tecniche di simulazione eterogenea funzionale e numerica applicate all'ingegneria di sistemi aeronautici / Brusa, Eugenio; A., Calà; Ferretto, Davide; A., Mitschke; C., Pessa; G., Bachelor. - ELETTRONICO. - (2016), pp. 1-10. (45° Conv. Naz. AIAS, Trieste 7-10 Settembre, 2016).

*Availability:*

This version is available at: 11583/2660094 since: 2016-12-22T17:51:45Z

*Publisher:*

Associazione Italiana Analisi delle Sollecitazioni

*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*

(Article begins on next page)

## SVILUPPO DI TECNICHE DI SIMULAZIONE 'ETEROGENEA' FUNZIONALE E NUMERICA APPLICATE ALL'INGEGNERIA DI SISTEMI AERONAUTICI

E. Brusa<sup>a</sup>, A. Calà<sup>b</sup>, D. Ferretto<sup>a</sup>, A. Mitschke<sup>c</sup>, C. Pessa<sup>d</sup>, G. Bachelor<sup>e</sup>

<sup>a</sup> Politecnico di Torino – Dip. di Ing. Meccanica e Aerospaziale  
Corso Duca degli Abruzzi, 24 – 10129 Torino,  
e-mail: eugenio.brusa@polito.it, davide.ferretto@polito.it

<sup>b</sup> Otto von Guericke Universität Magdeburg – IAF  
Bd.10, Universitätsplatz 2 – 39106 Magdeburg, Germany, email: ambra.cala@ovgu.de

<sup>c</sup> Airbus Defense and Space GmbH – Airbus Group Innovations Systems Engineering Processes and Platforms, Nesspriel 1 – 21129 Hamburg, Germany, email: andreas.mitschke@eads.net

<sup>d</sup> Leonardo Velivoli, Finmeccanica S.p.A., Chief Technical Office/Engineering System & Configuration Management, C.so Francia, 426 – 10146 Torino, email: claudio.pessa@finmeccanica.it

<sup>e</sup> IBM United Kingdom Ltd., PO Box 31, Birmingham Rd, Warwick, UK, CV34 5JL,  
email: gray\_bachelor@uk.ibm.com

### Sommario

Questo studio illustra l'impiego del 'Model Based Systems Engineering' (MBSE), in cui strumenti di modellazione funzionale si integrano con modelli numerici, da tempo impiegati in progettazione, per la realizzazione di sistemi complessi. E' analizzato un sistema antighiaccio aeronautico, sviluppato nell'ambito del progetto 'CRYSTAL'. L'obiettivo è stato raggiunto collegando il gestore di requisiti IBM DOORS®, IBM RHAPSODY®, che opera in ambiente SysML, e SIMULINK® o DYMOLA®. L'interoperabilità è stata garantita dallo standard di connessione Functional Mock-up Interface (FMI), che ha permesso di validare il processo realizzando la cosiddetta 'simulazione eterogenea' di modelli funzionali e numerici integrati.

### Abstract

This study deals with the implementation of the 'Model Based Systems Engineering' (MBSE), which allows the integration of functional and numerical models, being usually applied to the design and development of complex systems. In the test case of an aeronautical de-icing system, analyzed within the frame of the ARTEMIS JU 'CRYSTAL' project, that goal was reached by connecting the IBM Rational DOORS®, the IBM RHAPSODY®, based on the SysML, and SIMULINK® or DYMOLA®. The interoperability of those tools was assured by the standard Functional Mock-up Interface (FMI). The process was validated through the 'heterogeneous simulation' of functional and numerical models.

**Parole chiave:** 'Model-Based Systems Engineering', Progettazione di sistemi complessi, Modelli numerici e funzionali, Interoperabilità di strumenti di progettazione.

### 1. INTRODUZIONE

L'introduzione sempre più diffusa del 'Systems Engineering' (SE) nell'ambito dello sviluppo del ciclo di vita dei prodotti industriali è un elemento rilevante dell'evoluzione recente della progettazione e dell'integrazione di sistemi meccanici complessi. Tale crescente complessità deriva dalla configurazione dei sistemi, sempre più articolata, dal numero di funzioni che espletano, nonché dalla numerosità delle interfacce che sono richieste per connettere i diversi componenti del sistema tra loro, ovvero il sistema stesso con altri [1]. Com'è noto questo approccio poggia su almeno quattro aspetti

significativi [2]. Esiste una metodologia di progettazione e sviluppo del prodotto che traccia i contenuti di questo approccio, in via di standardizzazione [3]. Si utilizza un linguaggio comune, per rendere disponibili i propri contenuti a operatori di diversa competenza (il ‘System Modeling Language’ o SysML) [4]. Tale linguaggio definisce diagrammi e oggetti che figurano nei modelli, basati su prodotti software dedicati per la loro implementazione [5]. Infine, questo approccio utilizza alcuni strumenti informatici, per la gestione, l’immagazzinamento e il trasferimento di moli di dati rilevanti (i cosiddetti “big data”). Tuttavia anche la condivisione in rete delle informazioni tra utenti delocalizzati, attraverso i “cloud” ne è un elemento caratteristico. Tali strumenti consentono di monitorare e agire in remoto su flotte di sistemi o “sistemi di sistemi”. Ciò rende contigua questa metodologia a quella emergente denominata “Internet of Things” (IoT), cardine della strategia “Industria 4.0” per la produzione industriale tramite e di sistemi intelligenti [6].

A fronte di questo sviluppo di strumenti informatici, due elementi del SE rimangono fortemente connessi con la progettazione meccanica di macchine e di sistemi. La definizione dei requisiti di progetto, ancorché sistematicamente guidata e documentata dal processo noto come ‘Model Based Systems Engineering’ (MBSE), non può prescindere da una conoscenza puntuale delle tecnologie disponibili e dei domini della tecnica coinvolti. Il processo di sviluppo del prodotto non può essere svincolato da un’opera di verifica e di validazione [7] in cui giocano un ruolo decisivo sia i modelli di natura quantitativa che le prove sperimentali e il collaudo di prototipi, tipici della progettazione, della caratterizzazione dei materiali e di predizione numerica del comportamento dei sistemi. Il gran beneficio del MBSE consiste nella riduzione dei casi di reingegnerizzazione di prodotto, a seguito di problemi riscontrati in collaudo o in esercizio, o almeno dei relativi tempi e costi. Modelli funzionali e numerici devono però essere “interoperabili”, ovvero l’operatore non deve intervenire per selezionare e trasferire dati tra i due ambienti di modellazione. Ne segue che il presunto impatto epocale del MBSE sulla progettazione e la costruzione di macchine e sistemi potrà essere tale o, quanto meno, incrementare l’efficacia di tale attività, se gli strumenti nati nell’ambito del MBSE potranno essere integrati con quelli più classici di ambito CAD, analitico, numerico (si pensi agli elementi finiti, al “multibody dynamics”, ai simulatori di vario genere), pena la rapida decadenza dell’attuale interesse per questa metodologia e il suo declassamento ad espressione di una non meglio definita moda. Assume, in quest’ottica, valore sostanziale per l’effettiva realizzazione di questa integrazione tra modelli, la cosiddetta “simulazione eterogenea” che è qui oggetto di analisi.

## 2. OBIETTIVI DELLO STUDIO

Si intendono qui documentare, in sintesi, i risultati del progetto “CRYSTAL” [8], che ha visto la partecipazione di circa settanta attori industriali e accademici, alla ricerca di una possibile standardizzazione del MBSE, nei settori dell’ingegneria degli autoveicoli, aeronautica, ferroviaria e dei dispositivi medicali. L’esempio in oggetto riguarda lo sviluppo di un sistema antighiaccio per un velivolo per il trasporto dei passeggeri ad autonomia regionale. L’obiettivo del lavoro è comprendere, in un caso di carattere industriale e reale, pregi e limiti dell’approccio proposto, nonché quali siano gli strumenti attualmente disponibili per un’efficace interoperabilità.

Il sistema analizzato è utilizzato per prevenire la formazione del ghiaccio in volo o per la sua rimozione, in corrispondenza di ali, impennaggi di coda e prese d’aria dei motori del velivolo. Il ghiaccio formato su tali superfici riduce, infatti, la portanza, facilitando lo stallo ad angoli di attacco inferiori a quelli previsti a progetto, accresce la resistenza aerodinamica e il peso, tra l’altro alterando il flusso aerodinamico sul velivolo, con conseguenti effetti di disturbo sulla regolarità del volo. Tra le tecnologie disponibili si annovera il sistema a membrana pulsante [9], che opera tramite sacche di polimero, applicate in corrispondenza delle parti sensibili alla formazione di ghiaccio. Esse sono attivate periodicamente per frantumare il ghiaccio formato, insufflando aria fornita dal circuito pneumatico. In alternativa sono proposte soluzioni elettro-termiche, che utilizzano l’effetto Joule di resistori disposti in prossimità delle superfici da proteggere, ovvero aero-termiche, basate sul recupero di calore dai gas combusti dei propulsori. La valutazione di “trade-off” tra le soluzioni proposte è impostata in base alle varie condizioni di accrescimento del ghiaccio, descritte dalla specifica CS-25 della “European Aviation Safety Agency” (EASA) [10].

### 3. APPROCCIO CLASSICO ALLA PROGETTAZIONE DEL SISTEMA

Precedentemente all'introduzione del MBSE il sistema antighiaccio era progettato facendo ricorso a due fasi sostanziali: la definizione delle specifiche, in relazione alla tipologia e alla missione del velivolo, e la modellazione matematica del comportamento dinamico del sistema in relazione alla condizione di accrescimento del ghiaccio. I requisiti tendevano ad essere definiti sulla base delle normative tecniche, della prassi aziendale e dei fabbisogni del committente. Solo a fronte di una preliminare definizione della configurazione del sistema, si procedeva ad una modellazione sia geometrica (CAD) che matematica (analitica e numerica), per predisporre un simulatore da utilizzare per la verifica del funzionamento. Tale approccio conduce alla cosiddetta “modellazione fisica” del sistema, essendo quantitativa, su base matematica e correlata con componenti reali e, spesso, commerciali. Vi figurano i parametri significativi dell'impianto antighiaccio, da definire in modo variabile a seconda delle condizioni ambientali e di manovra. Un modello Matlab/Simulink® come quello in Fig.1, che descrive l'impianto a membrane pulsanti, permette, ad esempio, una simulazione nel tempo della risposta del sistema e un assestamento delle specifiche di progetto.

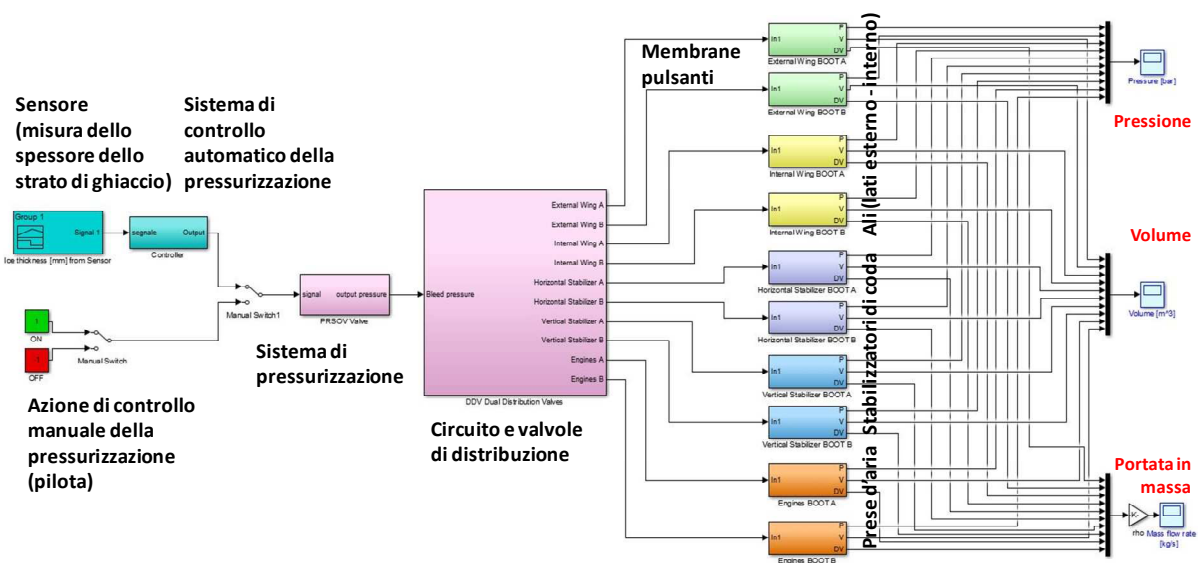


Figura 1. Modello fisico – matematico del sistema a membrane pulsanti in SIMULINK®

Il simulatore integra nel tempo alcune equazioni incluse nei singoli blocchi e valuta il rateo di pressurizzazione necessario allo sghiacciamento, per una certa condizione ambientale, il volume massimo delle sacche raggiunto in attività e la potenza assorbita dall'impianto. Ogni valutazione in merito alla verifica dei requisiti, raccolti a parte in forma documentale, era, pertanto, lasciata all'operatore, che doveva occuparsi della simulazione, dell'estrazione dei dati e del confronto con i riferimenti contenuti nelle specifiche di progetto. Tutta l'attività pregressa di determinazione dei requisiti, su base funzionale e logica non era documentata, se non dai requisiti scritti, che, peraltro, non erano “allocati” [3] su funzioni e componenti del sistema. In tal caso laddove si riscontrasse un guasto in un componente del sistema, non si potrebbe immediatamente correlare al requisito influenzato, mancando la cosiddetta tracciabilità tra requisito, funzione, componente logico e reale [11]. Se il modello fisico è l'unico ad essere descritto formalmente, esso tende a orientare il progettista a definire la configurazione del sistema riconducendola a soluzioni costruttive che gli sono più familiari e alla selezione dei componenti di impiego più comune. In tal modo difficilmente si mette in discussione l'architettura del sistema e una sua efficace innovazione. Nel caso di un sistema ad elevata criticità per quanto riguarda la sicurezza, che è correlata al controllo attento delle modifiche apportate nell'arco del ciclo vita del prodotto (‘Change configuration management’), questa carenza è tanto più sentita quanto più complesso è il sistema.

Con riferimento alla Fig.1, inoltre, si può osservare che il modello prevede condizioni al contorno predefinite e corrispondenti ad alcune variabili e si dimostra poco flessibile per rappresentare logiche

non previste a priori dal progettista o di guasto. Un modello ampliato, che rappresenti il sistema dapprima per funzioni, poi per blocchi logici e, infine, per parti e componenti reali, può permettere una simulazione che includa elementi sia logici che prestazionali, dipendenti dalle varie possibili condizioni d'uso e agevola lo studio di un più ampio quadro di ipotesi di funzionamento o di guasto.

#### 4. APPROCCIO PROPOSTO DAL MBSE

Per aumentare la capacità dello strumento di simulazione, la struttura a cui fa riferimento il MBSE prevede vari strumenti di lavoro digitali, tra loro interoperabili e accomunati da semantiche che permettono di automatizzare alcuni processi di verifica e di validazione. Il progetto 'CRYSTAL' ha indagato quella descritta in Fig.2.

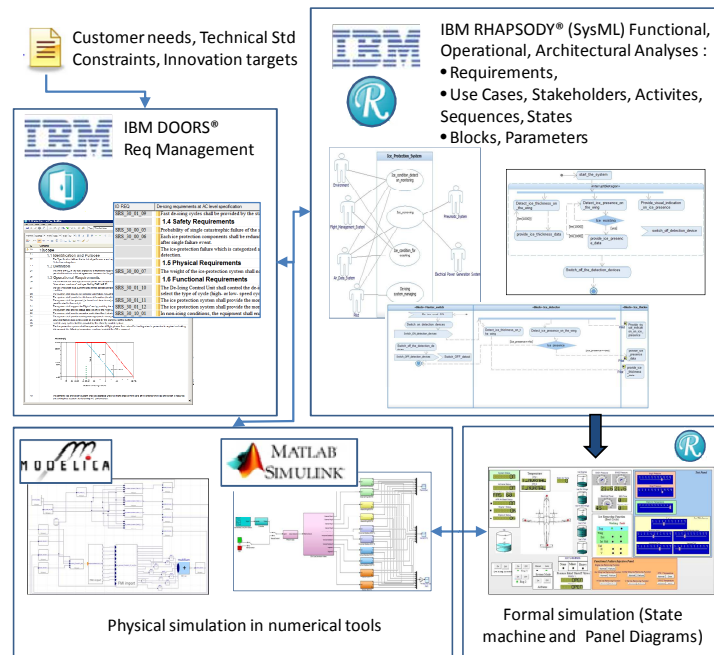


Figura 2. Struttura dell'ambiente di simulazione eterogenea collaudato in CRYSTAL

Un gestore (IBM DOORS®) raccoglie i requisiti classificati e codificati in modo standard, sia in una fase preliminare, quando sono definiti dal committente e secondo alcuni riferimenti a normative e prassi aziendali, sia nella versione aggiornata, a seguito di un processo iterativo che coinvolge un primo ambiente (IBM RHAPSODY®), predisposto per la rappresentazione delle funzioni e dei blocchi logici dell'architettura di sistema, solo in ultima analisi "istanziati" [2] in componenti reali che sono, poi, riprodotti in ambienti di simulazione numerici (SIMULINK®, MODELICA®, DYMOLA® ...). Aspetto rilevante in questa struttura sono i connettori che permettono il dialogo tra strumenti diversi, rappresentati da frecce. Sebbene una soluzione minimale sia perseguibile, allocando i requisiti dal gestore DOORS® direttamente sui vari blocchi che rappresentano componenti e sottosistemi nei modelli numerici, in modo da automatizzare le verifiche dei requisiti che erano effettuate dall'operatore, il 'Systems Engineering' permettere di tracciare tutto il percorso di progettazione del prodotto, descrivendo il processo logico che il progettista segue fino alle scelte conclusive. Questo ha due ricadute importanti: una completa documentazione dell'attività e la totale tracciabilità, in formato digitale, dalla specifica al dettaglio costruttivo. Il processo parte dal committente, comporta la scrittura dei requisiti (DOORS®), che sono importati in ambiente SysML (RHAPSODY®) dove si sviluppa l'analisi del comportamento del sistema, individuando sia gli 'stakeholder' con i quali esso interagisce, tramite opportune interfacce, che i vari momenti e scenari della missione (casi d'uso). Alcune viste, rappresentate da diagrammi di natura grafica, consentono di definire quali attività siano svolte dal sistema e dagli 'stakeholder', per ogni caso d'uso, la sequenza temporale rispettata nell'esecuzione delle attività, nonché gli stati in cui il sistema si trova, nel corso delle varie fasi previste per ogni caso d'uso. Tale analisi consente di operare uno studio della configurazione del sistema, almeno in termini

di blocchi di funzioni logiche, espressa in diagrammi a macro blocchi e a blocchi interni ('Internal Blocks Diagram' o IBD), nonché dei parametri rilevanti per il progetto. Il diagramma che ritrae gli stati del sistema può dare origine ad un simulatore di stati, anche esteticamente verosimile rispetto al cruscotto del sistema reale. Il committente può, quindi, utilizzarlo per verificare varie impostazioni e investigare quale configurazione assume il sistema, per suggerire al progettista opportune modifiche. Com'è noto questo simulatore, che non include un modello numerico, non può predire la reale dinamica del sistema specie nei suoi transitori, ma a tale scopo può essere interoperato con i modelli numerici, eventualmente sviluppati da vari progettisti in software differenti (SIMULINK®, MODELICA®...). Alcune iterazioni in questo ciclo di operazioni portano al completamento dei requisiti e, se applicate in successione al sistema, ai suoi sottosistemi e ai componenti, permettono di giungere alla sintesi di un progetto preliminare da verificare e validare [7]. Nella fase di integrazione dei modelli per la progettazione con gli strumenti di gestione della produzione, questa piattaforma è resa poi interoperabile con altri software, quali SIEMENS TEAMCENTER® [12] o altri equivalenti, in cui sono eseguite le tipiche operazioni di PLM, fino all'allocazione di funzioni e requisiti su P/N.

## 5. REALIZZAZIONE DI UN DIMOSTRATORE MBSE PER LA SIMULAZIONE ETEROGENEA

La costruzione dell'ambiente di simulazione eterogenea ha avuto, nel progetto, alcuni obiettivi generali. Un primo evidente era quello di connettere strumenti di analisi funzionale con altri di tipo numerico, integrando i contributi sviluppati da operatori diversi (nel consorzio Airbus Group Innovation, Finmeccanica e Politecnico di Torino) nell'ambiente RHAPSODY®. In particolare, era richiesto che l'ambiente di simulazione numerica utilizzato dal singolo operatore fosse gestibile come una "black-box", ovvero permettesse di gestire dati in ingresso e in uscita e di ottenere la risposta dinamica della parte di sistema analizzata, senza entrare nell'ambito del modello e del software utilizzato [13]. Questo obiettivo ha un'ulteriore finalità: la flessibilità dell'ambiente di lavoro, che può essere riutilizzato in connessione con modelli numerici diversi per lo sviluppo di versioni del sistema successive. Questi obiettivi giustificano l'impiego di standard di connessione informatici come il FMI e l'impostazione modulare del modello, per agevolare la distinzione dei vari contributi. Nell'esempio il simulatore include vari moduli che concorrono a supportare la realizzazione in RHAPSODY® del simulatore di stati, a partire da modelli numerici SIMULINK®, DSS DYMOLA® e MODELICA®.

### 5.1. Requisiti da normativa e creazione del modello

Un aspetto rilevante della costruzione dell'ambiente di simulazione del sistema antighiaccio riguarda il fenomeno dell'accrescimento del ghiaccio. L'EASA specifica vari scenari nel documento CS-25 [10], in tre diverse appendici. Esso definisce il contenuto di acqua allo stato liquido (Liquid Water Content LWC) e il diametro medio (Mean Volume Diameter MVD) delle gocce d'acqua soprappusa (allo stato liquido ad una temperatura inferiore a quella di solidificazione) presenti in nubi stratiformi a carattere convettivo, in funzione della quota e, quindi, della pressione atmosferica e della temperatura. Al contatto con le superfici del velivolo essa tende, infatti, a ghiacciare, con un effetto diverso a seconda del LWC e del MVD, dando origine a ghiaccio brinoso ( $0.05 < \text{LWC} < 0.8 \text{ g/m}^3$  e  $15 < \text{MVD} < 40 \text{ }\mu\text{m}$ ) a formazione lenta, fragile e non pericoloso, oppure vetroso, a formazione molto rapida, molto compatto e tenace, il più pericoloso, o, infine, spugnoso, di conformazione intermedia ai precedenti, che ingloba bolle d'aria e che, in base alla loro densità, risulta più simile all'uno o all'altro dei precedenti. Le recenti versioni della norma includono situazioni di accumulo catastrofiche, con gocce fino a 1 mm di diametro. Di fatto è richiesto di simulare il funzionamento dell'impianto in vari scenari, che si riferiscono, appunto, alle varie condizioni di accrescimento sopra descritte. Nell'approccio classico documentale esse venivano utilizzate come dati di ingresso per la simulazione numerica, in quello MBSE modelli e riferimenti della normativa sono inclusi nei requisiti listati in DOORS® e questi allocati sul sistema, con il beneficio che il confronto tra simulazione e requisito può essere automatizzato e che, al contempo, tali dati possono essere inclusi nel simulatore a stati gestito in RHAPSODY®. L'operatore deve solo assicurarsi di aggiornare il listato DOORS® al quale il resto del modello è connesso, al variare della normativa.

## 5.2. Struttura del simulatore integrato

L'ambiente RHAPSODY® costituisce l'ambiente di lavoro comune ai vari operatori, implementa il linguaggio SysML e include i requisiti connessi al listato DOORS®, così com'è interoperabile con i vari modelli numerici. L'obiettivo del progettista è quello, dopo aver eseguito il percorso che include le fasi descritte in Fig.2, di analisi dei requisiti, funzionale e della configurazione, di arrivare a definire una configurazione logica del sistema che non è ancora corrispondente a componenti fisici, ma almeno a blocchi logici che svolgono determinate funzioni, in base a parametri di ingresso e d'uscita, scambiati attraverso ben definite interfacce. Una sua rappresentazione SysML è data dallo 'Internal Block Diagram' (IBD), che è stato utilizzato per le connessioni, realizzate o per via diretta, dove è possibile tramite protocolli proprietari IBM (come DOORS® e RHAPSODY®), o altri standard, come il 'Functional Mock-up Interface' (FMI). Esso 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. Essi sono esportati in un programma ospite, che esegue i calcoli secondo le modalità 'Model-Exchange' e 'Co-Simulation' [14]. Le unità FMU contengono, infatti, le librerie .dll del modello, oltre ad una descrizione .xml dello stesso. I risultati sono, poi, resi disponibili nell'ambiente originale di partenza. I diagrammi degli stati del sistema sono, ad esempio, prodotti in RHAPSODY®, importati in SIMULINK® come blocco FMU non modificabile e utilizzati per eseguire una simulazione numerica.

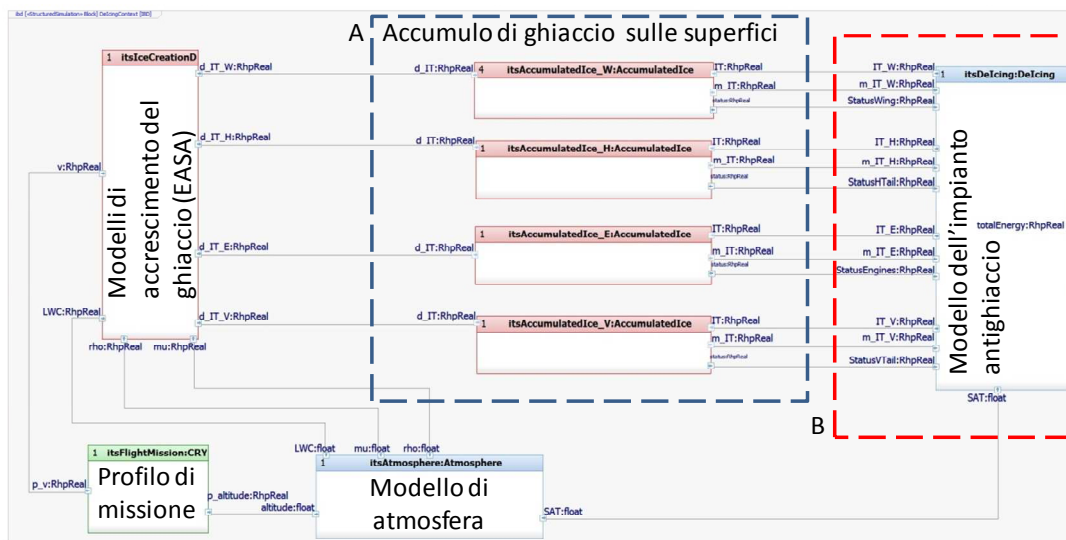


Figura 3. Diagramma IBD principale (in SysML) dell'ambiente di simulazione eterogenea.

Con riferimento alla Fig.3 i vari blocchi sono rappresentati in diverso colore a seconda della connessione operata verso un modello esterno, attraverso FMU. In rosso si indica la connessione con un modello SIMULINK®, in verde con DYMOLA® oppure con MODELICA®, in azzurro con codici provenienti da diversi ambienti, mentre i blocchi blu sono basati internamente a RHAPSODY®. La dinamica di accrescimento del ghiaccio è stata istanziata in un modello numerico SIMULINK®, secondo i dettami della specifica EASA, sulla sinistra. A seconda delle condizioni atmosferiche e di volo si determina, quindi, la dimensione delle gocce, che è utilizzata come riferimento per il calcolo dello spessore dello strato di ghiaccio sulle varie superfici. Per tale calcolo è necessario sia il profilo di missione che il modello dell'atmosfera. Il profilo di missione del velivolo è gestito da un modello DYMOLA®, in basso a sinistra, che fornisce velocità e quota di crociera nel tempo, in base ad un predefinito profilo di missione, dal decollo all'atterraggio. Le condizioni atmosferiche sono descritte da un blocco apposito che, in base a noti modelli dell'atmosfera (International Standard Atmosphere, ISA), deriva le proprietà dell'aria (temperatura, densità, viscosità, pressione) alla quota di crociera e da queste il LWC, calcolato sia per condizioni atmosferiche regolari che catastrofiche, secondo due diverse Appendici del CS-25, con gocce di diverso diametro (20  $\mu\text{m}$  e oltre 500  $\mu\text{m}$ ). Il modello del sistema antighiaccio è interoperato con SIMULINK®, al centro, che calcola zona per zona il reale

spessore del ghiaccio in funzione della condizione ambientale e di volo.

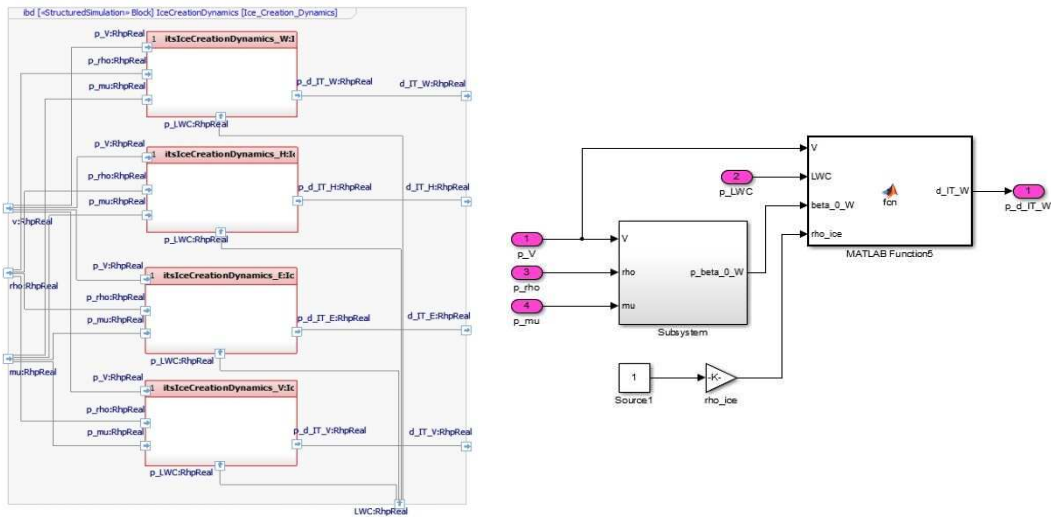


Figura 4. Dettaglio (A) del diagramma IBD principale e del modello SIMULINK® correlato.

Per un'accurata valutazione, i modelli di accrescimento più semplici offerti dai diagrammi presenti nella CS-25 non sono sufficienti, in quanto per gli scenari più complessi serve una valutazione della traiettoria di impatto, come prevede il modello analitico di Langmuir e Blodgett [15], implementato, che considera il ruolo dell'inerzia delle gocce sulla deviazione del flusso e sulla modifica delle condizioni di impatto e di accrescimento del ghiaccio sull'ala. Per questo motivo il modello per il calcolo dello strato di ghiaccio in accumulo è distinto in vari blocchi, ognuno specializzato per una geometria, come specificato in Fig.4, in cui si vedono sia il modulo RHAPSODY® che il modello SIMULINK® ad esso connesso. Per quanto riguarda il modello del sistema vero e proprio si percepisce la sua complessità nella sua attuale evoluzione tecnologica già nei diagrammi IBD, necessariamente annidati su due livelli di rappresentazione, come in Fig.5.

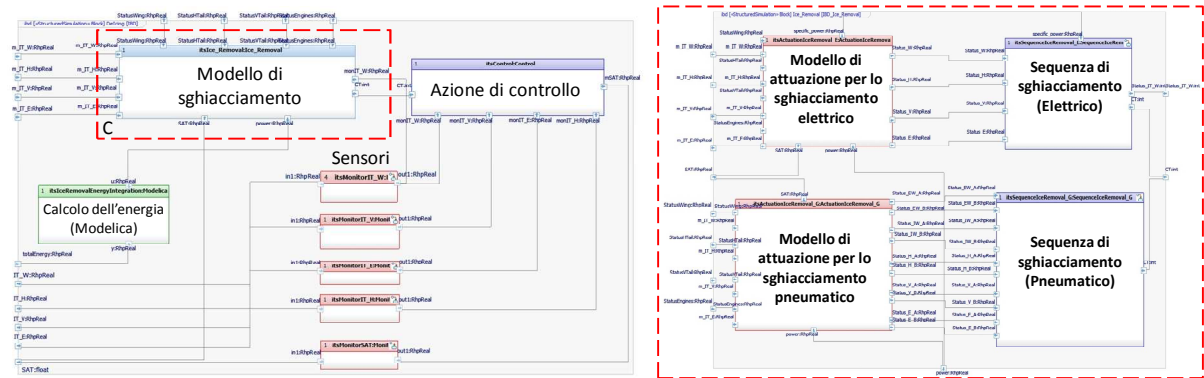


Figura 5. Dettaglio (B) del diagramma IBD principale e del modulo (C) al suo interno.

In Fig.5 il modello che descrive le sequenze logiche di attuazione e la dinamica del sistema in oggetto è contrassegnato come modulo C. I moduli dedicati ai sensori sono separati per implementare anche condizioni di deriva in misura e di guasto su ognuno, in fase di simulazione. Il blocco di controllo riceve da questi i dati relativi allo spessore del ghiaccio e alla temperatura e regola il tempo di intervento del sistema antighiaccio, sia esso pneumatico (rateo di pressurizzazione e depressurizzazione) o elettrotermico (cicli di riscaldamento). Il blocco MODELICA® calcola l'energia totale richiesta al sistema. Nel dettaglio, il blocco che definisce il modello di sghiacciamento è stato articolato in due sottosistemi paralleli al solo fine di implementare e confrontare la soluzione a membrane pulsanti con quella elettrotermica. In un primo blocco, a sinistra, è descritta la logica di

attuazione, mentre in un secondo, a destra, la sequenza di attuazione delle varie zone del velivolo, nel corso dello sghiacciamento e in funzione dei dati misurati. In uscita il blocco indica il rateo di fusione del ghiaccio, lo stato di attuazione per zona (acceso o spento) e la potenza assorbita. In Fig.5 il blocco che implementa l'azione del controllo, di fatto, opera similmente con due sottomodelli dedicati alle due soluzioni in oggetto, basati sui diagrammi di stato. Il blocco 'Sensori' combina i dati ambientali (quota, temperatura, pressione, accrescimento del ghiaccio) con i risultati del blocco di controllo e calcola, tramite connessione con SIMULINK®, lo spessore reale del ghiaccio sulle varie superfici.

## 6. SIMULAZIONE ETEROGENEA DEL SISTEMA

Una serie di simulazioni ha permesso di collaudare il sistema realizzato dall'integrazione dei vari strumenti e dei modelli illustrati. In primo luogo allo stato attuale il connettore FMU permette di includere vari modelli numerici nella piattaforma, rendendoli accessibili all'ambiente SysML. Non solo, i requisiti contenuti nel modello principale possono essere verificati da operatori diversi, con vari modelli e con un duplice beneficio. Da un lato il connettore FMU rende disponibili i modelli numerici agli altri operatori, dall'altro consente di non dividerne completamente i contenuti, ma solo il processo di calcolo, ingressi e risultati, senza così violare la proprietà dei modelli dei vari enti che collaborano. Nel progetto CRYSTAL sono stati così utilizzati SIMULINK®, (Open)MODELICA® e DYMOLA®, nell'ambito di uno stesso caso di studio. Indubbiamente alcuni simulatori predispongono una compatibilità FMI che facilita la connessione e l'utilizzo, altri, come SIMULINK® necessitano di prodotti di terze parti per realizzare la connessione [13]. Nel caso specifico è stato possibile confrontare le prestazioni di un sistema a membrane pulsanti e di uno elettrotermico, simulando per il velivolo in oggetto un volo di più di tre ore, con diverse condizioni atmosferiche, di accrescimento del ghiaccio e profili di missione. Airbus Group Innovations ha approntato allo scopo un modello numerico del sistema completo in DYMOLA® (Fig.6), mentre il Politecnico di Torino ha realizzato in parallelo un modello di confronto e uno, simile, del sistema elettrotermico (Fig.1). L'esistenza della piattaforma comune ha consentito di importare entrambi i modelli realizzati nel più ampio modello RHAPSODY® e di confrontare sia i risultati che il soddisfacimento dei requisiti. Ne è seguita la condivisione dei modelli da parte degli enti coinvolti, senza problemi di riservatezza nei contenuti, che ha permesso un'immediata validazione dei modelli, nonché di eseguire il "trade-off" delle due configurazioni proposte.

Da un punto di vista pratico il confronto è stato eseguito monitorando l'efficacia della rimozione del ghiaccio da parte dei due sistemi. Lo spessore istantaneo del ghiaccio è stato valutato come differenza della fase in accrescimento e di quella in rimozione, adottando non solo due tecniche diverse, ma anche sequenze differenti di attuazione. Nel caso elettrico il sistema agisce continuamente, su un periodo di attuazione, per limitare lo spessore al di sotto di una soglia massima di 2 cm di ghiaccio, al fine di contenere la potenza assorbita. Il sistema a membrane opera, invece, una rapida espulsione del ghiaccio frantumato, intervenendo periodicamente, con una potenza assorbita totale più contenuta. Per contro, la simulazione ha rilevato che la sequenza di attivazione per zone del velivolo (ali, impennaggi di coda e prese d'aria) trova efficacia diversa nei due casi.

Il sistema elettrico è efficace, in quanto più continuativo, su tutte le superfici, mentre in qualche caso il sistema pulsante porta ad un superamento della soglia massima, su alcune. In termini di potenza è stato possibile verificare che nei due casi esistono criticità. Nel sistema elettrico per raggiungere il valore richiesto per la rimozione dello strato di ghiaccio è necessario disattivare il sistema in un'altra zona, creando poi l'esigenza di concentrare un picco di potenza su un breve periodo per completare la rimozione del ghiaccio. Per il sistema a membrane pulsanti accade qualcosa di simile, ma essendo la potenza assorbita assai inferiore, in pochi cicli esso rimuove il ghiaccio a parità di superficie, con il 10% della potenza assorbita dal sistema elettrico (10/20 kW contro 120/160 kW). Si consideri però che 40 kW assorbiti dal sistema elettrico eseguono un'azione di prevenzione della formazione di ghiaccio, che l'altro sistema non effettua.

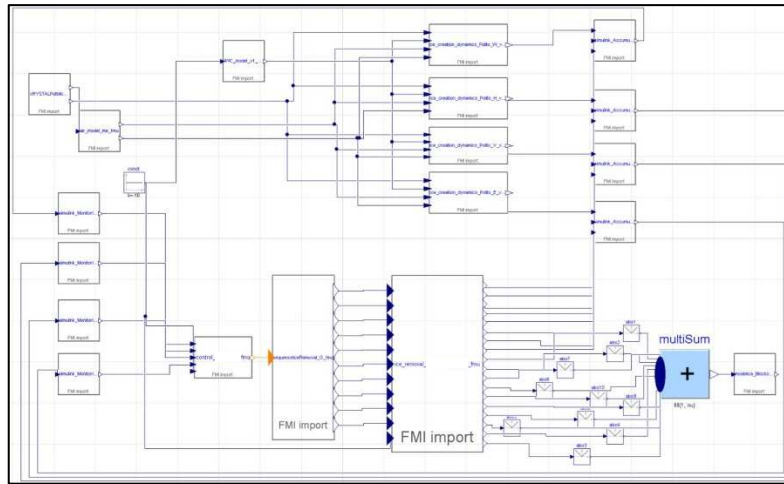


Figura 6. Modello numerico completo del sistema sviluppato in DYMOLA®.

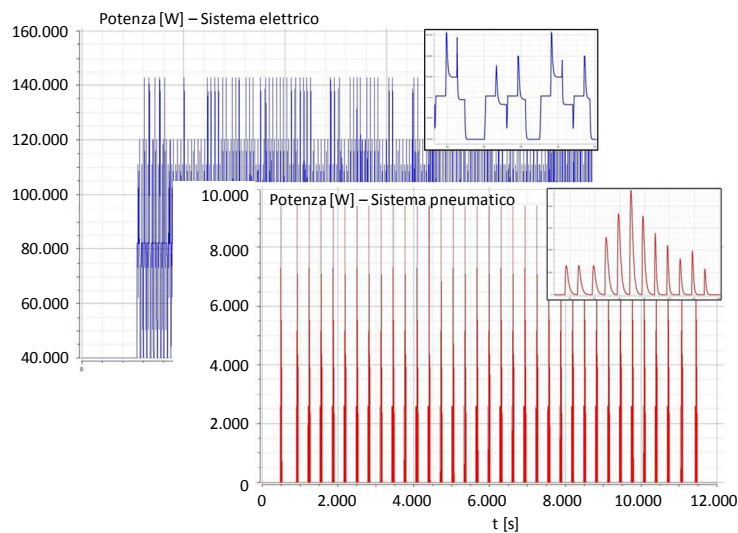


Figura 7. Confronto tra le potenze assorbite dalle due architetture, basate su impianto a membrane pulsanti ed elettrotermico.

## 7. CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

Un primo beneficio della simulazione eterogenea risiede nel fatto che lo sviluppo del sistema è modellato sia negli aspetti funzionali, operazionali e logici che in quelli numerici. Ad ogni requisito corrisponde una funzione, un componente logico e una parte il cui funzionamento è descritto in forma matematica e si presta a valutazioni quantitative. La possibilità di implementare una stessa logica in più soluzioni suggerisce al progettista varie architetture, favorendo un più semplice “trade-off” tra queste. La complessità del sistema, a cui fa riscontro un elevato numero di operatori, nel corso dello sviluppo prodotto è affrontata sistematicamente e il MBSE consente di gestirne l’evoluzione. L’identificazione di casi d’uso e di scenari operativi consente di valutare i cosiddetti ‘Key Performance Indicators’ (KPI) nelle vari condizioni operative e di circostanziare le criticità. La piattaforma ha, inoltre, il pregio di essere riutilizzabile in progetti futuri, con modeste modifiche, incrementando l’efficacia della progettazione. Nello specifico, l’integrazione di vari modelli è oggi possibile con gli strumenti a disposizione, pur essendo perfezionabile la compatibilità tra software differenti, che oggi necessita l’impiego di connettori esterni standard (FMU) o addirittura di altri dedicati per renderli compatibili con il singolo ambiente. L’interoperabilità è, quindi, possibile ma non ancora ottimizzata. Si prevede un’integrazione ulteriore di questo ambiente di simulazione tanto con gli strumenti di gestione del processo produttivo (PLM) che di valutazione dell’affidabilità del sistema

e della sicurezza.

## RINGRAZIAMENTI

Questa ricerca è stata finanziata nell'ambito del progetto ARTEMIS JU "CRYSTAL" (N°332830), oltre che dagli Enti di afferenza degli autori. Gli autori ringraziano il Dott. Lev Greenberg (IBM Research) per il suo contributo tecnico nell'adattamento delle interfacce IBM per la simulazione eterogenea.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] E. Brusa, D. Ferretto, "Progettazione di sistemi complessi tramite il 'Systems Engineering' e interoperabilità tra modelli funzionali e numerici" in Atti del 44° Convegno AIAS, Messina, 2–5 Settembre 2015.
- [2] A. Kossiakoff et al., *Systems engineering: principles and practice*, John Wiley & Sons, New York (2011).
- [3] D.D. Walden et al., *Systems Engineering Handbook: A Guide for System Life Cycle Processes and Activities*, INCOSE, San Diego CA (USA) (2015).
- [4] The Object Management Group, *OMG Systems Modeling Language (OMG SysML™)*, Vs.1.4, OMG Limited, Needham, MA (US) (2015).
- [5] H.P. Hoffmann, *Systems Engineering Best Practices with the Rational Solution for Systems and Software Engineering*, Vs.4.1, IBM Corporation, Somers, NY (US) (2011).
- [6] D. Zuehlke, "Smart Factory—Towards a factory-of-things", *Annual Reviews in Control*, 34, 129–138 (2010).
- [7] The ASME, "An illustration of the concepts of verification and validation in computational solid mechanics", ASME V&V 10.1 (2012).
- [8] A. Mitschke, E. Brusa, A. Calà, D. Ferretto, C. Pessa, G. Bachelor, "Heterogeneous simulation based on standards: deepening interoperability in trade-off analysis approach for aeronautical application", in Proc. 23° AIDAA, Torino (2015).
- [9] M. Flaccavento, *Impianti di bordo del velivolo*, Hoepli, (2012)
- [10] The European Aviation Safety Agency (EASA), *Certification Specification for large airplanes CS-25, Amendment 17* (July 2015).
- [11] E. Brusa, *Meccatronica strutturale: Sistemi e tecnologie*, CET, Torino (2016)
- [12] B. Di Giandomenico, C. Pessa, E. Valfré, I. Viglietti, "Alenia Aermacchi needs and experience on MBSE: the Crystal user scenario", in Proc. 23° AIDAA, Torino (2015).
- [13] E. Brusa, D. Ferretto, A. Calà, "Integration of heterogeneous functional-vs-physical simulation within the industrial system design activity", in Proc. IEEE Int. Conf. on Syst. Eng., Rome, pp.303-310 (2014).
- [14] T. Blochwitz et al., "The Functional Mockup Interface for Tool independent Exchange of Simulation Models", in Proc. 8<sup>th</sup> Int. Modelica Conference, March 2011.
- [15] D.N. Anderson, J.C. Tsao, *Overview of icing physics relevant to scaling*. Ohio Aerospace Institute, June 2003.