

ALLEGATO TECNICO – QUALIFICA TECNOLOGICA E DI SISTEMA DI PAYLOAD SCIENTIFICI DESTINATI AL VOLO SATELLITARE SU ORBITA BASSA

1. INTRODUZIONE

Nell'era del “New Space”, l'accesso allo spazio è diventato più semplice e sostenibile, dando impulso a nuove opportunità per l'esplorazione scientifica e lo sviluppo tecnologico. Le innovazioni nelle tecnologie di lancio, l'avvento delle piattaforme miniaturizzate come i CubeSat e la riduzione dei costi, basata principalmente sull'utilizzo di tecnologie già sviluppate in ambito terrestre a partire dai cosiddetti “Components Of The Shelf” (COTS), stanno trasformando il settore spaziale, portando a crescenti possibilità di realizzare a costi contenuti missioni scientifiche con grandi potenzialità di impatto sul progresso delle conoscenze sia nella scienza di base che per lo sviluppo di nuove tecnologie. Il nuovo approccio allo spazio comporta, inoltre, un crescente coinvolgimento di attori privati ed istituzioni di ricerca.

In questo contesto, nell'ambito dei progetti Crystal Eye e NUSES, il Gran Sasso Science Institute (GSSI) ha sviluppato dei payload scientifici per lo studio della radiazione cosmica in un ampio spettro di energie in un quadro multidisciplinare, volto a rispondere a domande cruciali sia in ambito scientifico che tecnologico. I campi di ricerca includono lo studio dell'ambiente spaziale, l'osservazione terrestre e lo sviluppo di tecnologie avanzate per la rivelazione di radiazione, l'analisi dati e la comunicazione. I payload si distinguono per l'impiego di strumentazione ad alta precisione e per l'utilizzo di tecnologie di rilevamento innovative, costruite a partire da COTS, in grado di raccogliere dati in maniera efficiente e con un consumo energetico ridotto, soddisfacendo così i requisiti per missioni di lunga durata in orbita bassa.

I payload sviluppati non si limitano alla sola raccolta di dati: rappresentano anche piattaforme di test per nuove tecnologie che potranno essere sfruttate in futuri programmi spaziali, in linea con le esigenze emergenti del New Space. Sostenibilità, modularità e flessibilità sono i pilastri di questa progettazione, con l'obiettivo di supportare una missione ad alta interoperabilità, capace di integrarsi in diversi contesti e adattarsi rapidamente ai cambiamenti nel panorama spaziale.

Le attività di ricerca e sviluppo tecnologico discusse nel presente documento riguardano le strategie di qualifica per l'utilizzo in ambito spaziale sia di singoli apparati elettronici che dell'intero sistema di payload satellitari per la ricerca scientifica nello spazio. L'approccio utilizzato è quello New Space, con l'utilizzo di tecnologie già sviluppate in ambito terrestre a partire da COTS. Tale approccio comporta una ridefinizione delle norme ECSS (European Cooperation for Space Standardization), che dovranno essere adattate alle differenti tecnologie COTS sotto esame, individuando specifiche campagne di test per la validazione all'uso spaziale.

Il lavoro di ricerca e sviluppo delineato nel presente documento riguarda sia la definizione delle strategie di qualifica che i successivi test e validazione degli apparati. Il documento è articolato in due capitoli, riferiti alle due fasi in cui è suddiviso il lavoro: nella prima fase l'attività sarà concentrata sui sottosistemi elettronici dei payload (qualifica tecnologica), nella seconda fase verranno considerati i payload nel loro complesso (qualifica di sistema).

2. CONTESTO TECNICO FASE A

Il contesto tecnico della fase A riguarda la definizione e successiva esecuzione delle campagne di test e qualifica tecnologica per i componenti montati su PCB realizzati in poliammide o MEGTRON6, che costituiscono parte integrante del payload. L'attività prevede anche lo sviluppo di un test plan per pianificare tutte le attività di qualifica tecnologica.

La campagna di qualifica prevede una serie di test rigorosi e verifiche specifiche per assicurare che i componenti montati su PCB rispondano pienamente ai requisiti di affidabilità, robustezza e performance richiesti per la missione. Questi test mirano a simulare le condizioni operative estreme che i componenti affronteranno nelle fasi di lancio (sollecitazioni meccaniche) e nella fase di operatività nell'ambiente spaziale, come variazioni di temperatura, e radiazioni. È fondamentale che i PCB, e i componenti montati su di essi, dimostrino un funzionamento stabile e duraturo per tutta la durata della missione, riducendo al minimo i rischi di guasti o malfunzionamenti in orbita. In particolare, i materiali come polyimide e MEGTRON6 sono stati scelti per la loro capacità di resistere a tali condizioni e, attraverso i test, si valuterà se i processi produttivi e di assemblaggio garantiscono la massima affidabilità richiesta dal programma di missione.

Un aspetto chiave della qualifica è la produzione dei campioni di test (breadboard), che rappresentano una fase cruciale per convalidare la qualità dei processi di montaggio e saldatura. L'utilizzo dei breadboard permette di eseguire una verifica preliminare che precede l'integrazione finale del payload, identificando e risolvendo eventuali criticità a livello di assemblaggio. L'obiettivo principale è dimostrare che i componenti possano operare efficacemente in condizioni operative nominali, replicando in laboratorio l'ambiente spaziale e assicurando che ogni elemento del sistema sia pronto per affrontare con successo la missione.

L'attività di qualifica tecnologica per l'hardware è suddivisa in tre Work Package:

- **WP1.Test meccanici:** Verificano la resistenza dei componenti a vibrazioni e shock meccanici, simulando le sollecitazioni che si verificano durante il lancio e altre fasi critiche della missione.
- **WP2.Test termici:** Simulano le condizioni ambientali attese, verificando la stabilità dei materiali e delle saldature per garantire il corretto funzionamento dei componenti.
- **WP3.Test alle radiazioni:** Valutano la capacità dei PCBA a resistere alle radiazioni nella configurazione FEM.

2.1 WP-A.1 Test meccanici

I test meccanici valutano la resistenza dei componenti elettronici e delle loro connessioni ai PCB a vibrazioni e shock meccanici, come quelli causati dal lanciatore e dalle fasi di separazione. Le attività da svolgere sono le seguenti:

- **Test di vibrazione:** i PCBA vengono montati su un banco di vibrazione elettrodinamico, capace di generare vibrazioni su tre assi (X, Y, Z). Si applicano profili di vibrazione sinusoidale e random, stabiliti in base ai profili richiesti dal programma. L'obiettivo è la valutazione dell'integrità meccanica, il fissaggio dei componenti, e la resistenza delle saldature e delle connessioni ai PCB. L'hardware deve mantenere la sua funzionalità senza segni di degrado o rotture.
- **Test di shock meccanico (pyroshock):** simula gli shock estremamente brevi ma intensi generati durante eventi come il distacco di stadi del razzo o l'attivazione di dispositivi pirotecnici (es. separazione di un satellite dal razzo). I componenti vengono montati su una struttura che permette di generare shock meccanici di alta intensità. Il test riproduce gli shock ad alta accelerazione e di breve durata. Questi shock vengono applicati in tutte le direzioni per garantire che l'hardware possa resistere a colpi improvvisi da qualsiasi angolazione. L'obiettivo è la verifica che i componenti e le connessioni non subiscano danni permanenti, come cricche, distacchi o deformazioni.

METODI DI CONTROLLO:

- Ispezioni visive e radiografiche per rilevare la bontà del processo di saldatura;
- Microsezioni finali richieste solo in caso di guasti rilevanti;
- Test funzionale dopo ogni ciclo di vibrazione.

2.2 WP-A.2 Test termici (Thermal Cycling)

Il test di cicli termici riproduce la continua variazione di temperatura tipica dell'orbita assegnata. L'attività prevede l'utilizzo di una camera climatica o termica, in grado di raggiungere temperature come da specifica ECSS, con possibilità di variazioni rapide tra gli estremi. Il PCBA viene sottoposto a un numero predefinito di cicli, che simulano le condizioni che affronterà nello spazio. Il numero di cicli viene definito dall'analisi di Thermal Fatigue Analysis, basata su standard spaziali (**ECSS-Q-ST-70-38**). Durante ciascun ciclo, la temperatura passa gradualmente dal valore massimo al minimo, e poi di nuovo al massimo, con un tempo di permanenza (dwell time) a ciascun estremo per permettere alla PCBA di stabilizzare termicamente. A fine ciclo, vengono testate le funzionalità elettriche della scheda per garantire che non ci siano perdite di prestazioni o interruzioni nei collegamenti elettrici.

2.3 WP-A.3. Test alle radiazioni

I test alle radiazioni per l'elettronica spaziale sono fondamentali per garantire che i componenti montati su PCB resistano agli ambienti ostili dello spazio, caratterizzati da radiazioni intense. In particolare, i test che devono essere condotti, includono:

- **Total Ionizing Dose (TID):** Misura la dose totale di radiazione assorbita, valutando i danni cumulativi sui componenti. Le specifiche operative per l'esecuzione del test di radiazione TID vanno effettuate in conformità con lo standard **ESCC-22900**.
- **Single Event Effects (SEE):** Valuta gli effetti di singoli eventi causati da particelle energetiche, come errori nei dati (bit flip) o guasti catastrofici. Viene eseguito con fasci di protoni o ioni pesanti. Le procedure di test dei Single Event Effects sulle schede sopra menzionate, devono essere conformi agli standard: **ECSS-Q-ST-60-15C** e **ESCC Basic Specification No. 25100**. L'obiettivo principale del test SEE è determinare la sensibilità dei componenti elettronici a singoli eventi di particelle ad alta energia e valutare la loro resistenza a guasti temporanei o permanenti. I livelli di radiazione devono essere definiti con cura per garantire che i test riproducano fedelmente le condizioni operative della missione, evitando al contempo danni inutili ai campioni. L'energia e l'intensità delle particelle saranno calibrate in base ai requisiti progettuali e agli standard ESCC/ECSS, in modo da mantenere un equilibrio tra realismo delle condizioni di test e salvaguardia del dispositivo.

3. PRESENTAZIONE DEI RISULTATI FASE A

3.1 Report

Al termine di tutte le attività di valutazione, dovrà essere emesso un rapporto in conformità con il test plan.

3.2 Failure Analysis

In caso di esito negativo, tutte le PCBA che non hanno superato il test saranno sottoposte ad analisi dei guasti e verrà data evidenza delle failure.

4. CONTESTO TECNICO FASE B

Il contesto tecnico della fase B riguarda la definizione e successiva esecuzione delle campagne di test, qualifica e accettazione del payload della missione. Le attività di qualifica coinvolgono il modello EQM (Engineering Qualification Model), mentre le attività di accettazione coinvolgono il modello PFM (Proto Flight Model) che consiste nell'insieme payload, sistema termico attivo radiante e tray. Queste attività sono necessarie per assicurare che il payload soddisfi tutti i requisiti strutturali, ambientali ed elettromagnetici per operare in ambiente spaziale. I test includono prove di vibrazione, termovuoto e compatibilità elettromagnetica da effettuarsi nei tempi concordati con GSSI.

1. **Test Vibrazionali:** Verificheranno la resistenza del payload alle intense sollecitazioni dinamiche previste durante le fasi di lancio e di rilascio.
2. **Test di Termovuoto (TVAC):** Simuleranno le condizioni di vuoto e i cicli termici a cui sarà esposto il payload, garantendo che mantenga la piena funzionalità nelle variazioni termiche orbitali.

- 3. Test di Compatibilità Elettromagnetica (EMC):** Accerteranno che il payload sia immune a interferenze elettromagnetiche esterne e che le sue emissioni non influenzino altri sistemi, assicurando l'integrità delle operazioni in orbita.

Le attività possono essere distinte in tre WP.

- **WP-B.1 Test meccanici:** Il test vibrazionale di qualifica per un payload satellitare rappresenta una fase essenziale per garantire la resistenza del sistema alle sollecitazioni dinamiche delle varie fasi di lancio e rilascio. In questo processo, il payload viene sottoposto a vibrazioni sinusoidali e random, replicando la sollecitazione meccanica a cui sarà esposto. Le prove vengono eseguite su una tavola vibrante in grado di generare frequenze elevate, simulando i carichi vibrazionali che si manifestano in fase di decollo e ascesa. I profili di sollecitazione verranno forniti dal GSSI. Le vibrazioni random riprodurranno le vibrazioni aleatorie indotte dalla propulsione; le vibrazioni sinusoidali caratterizzeranno le frequenze di risonanza del sistema. Il posizionamento della sensoristica accelerometrica verrà ottimizzato e studiato in collaborazione con il GSSI in maniera da determinare l'esatta risposta dinamica del payload per accelerazione, spostamento e velocità.
- **WP-B.2 Test termici:** Il test di termovuoto consente di verificare la resistenza e la funzionalità nell'ambiente spaziale di missione (vuoto e variazioni di temperatura). Questo tipo di prova simula l'ambiente spaziale esponendo il payload a cicli termici in una camera a vuoto (TVAC). Lo stress termico e di vuoto verifica la capacità del payload di mantenere le proprie prestazioni. Durante le fasi di test, il payload è normalmente acceso: viene richiesta dunque l'elaborazione di una procedura di controllo funzionale che verrà sviluppata in collaborazione con il GSSI. I parametri ambientali (temperatura e pressione) vengono continuamente monitorati e registrati al fine di ricostruire ogni fase del test. Il posizionamento della sensoristica di temperatura deve essere studiato ed ottimizzato in maniera da monitorare principalmente i punti critici del payload e per validare le simulazioni termiche.
- **WP-B.3 Test di compatibilità elettromagnetica:** Il test di compatibilità elettromagnetica (EMC) garantisce che tutti i sottosistemi elettronici operino correttamente in un ambiente spaziale senza generare o subire interferenze elettromagnetiche in grado di pregiudicare l'operatività della missione. Questo processo comprende due principali ambiti di verifica: le emissioni elettromagnetiche (EMI) e l'immunità elettromagnetica (ESD, Electrostatic Discharge). Durante il test, le emissioni irradiate e condotte del payload vengono misurate per assicurare che non eccedano i livelli stabiliti e non interferiscano con altri strumenti sensibili a bordo del satellite. Le emissioni irradiate vengono rilevate tramite antenne speciali, che analizzano il campo elettromagnetico circostante; le emissioni condotte vengono invece misurate attraverso i cavi di alimentazione e segnali, per individuare eventuali disturbi trasmessi all'interno del sistema. La valutazione della suscettibilità elettromagnetica prevede che il payload venga esposto a campi elettromagnetici di intensità variabile, simulando le interferenze che potrebbe subire in orbita, come le radiazioni elettromagnetiche generate dal sole o dai trasmettitori di terra. I test comprendono frequenze RF e impulsi transitori per garantire che il payload non subisca alterazioni di prestazione sotto stress elettromagnetico

4.1 WP-B.1 Test meccanici

Nella sezione si tracciano le linee guida per la messa a punto delle procedure inerenti le fasi di test di natura meccanica. Il posizionamento ottimale dei sensori di readout (accelerometri) è oggetto di studio e viene sviluppato in collaborazione con il GSSI. Nel seguito si identificano le principali fasi di test qualifica su EQM e di accettazione su PFM.

- **Test di vibrazione:**

Qualifica EQM: l'unità viene installata su un banco di vibrazione elettrodinamico, capace di generare vibrazioni in tre assi (X, Y, Z). Si applicano profili di vibrazione sinusoidale e random, stabiliti in base ai profili richiesti dal programma. I livelli dei profili vengono definiti all'interfaccia in base alle caratteristiche del satellite e alla risposta delle analisi dinamiche. L'obiettivo è la valutazione dell'integrità meccanica, dimostrare la resilienza del design agli stress tipici del lancio (sollecitazione random) e determinare le frequenze di risonanza del sistema (sollecitazione sinusoidale) valutandone gli effetti. L'hardware deve mantenere la sua funzionalità senza segni di degrado o rotture.

Accettazione PFM: l'unità viene sottoposta alle stesse procedure del test di Qualifica ma con durate temporali ridotte. La procedura ottimale di accettazione verrà stabilita in collaborazione con il GSSI.

- **Test di shock meccanico (pyroshock, esclusivamente su EQM):** l'unità viene sottoposta a sollecitazioni impulsive a shock che simulano eventi come il distacco di stadi del razzo o l'attivazione di dispositivi pirotecnici (es. separazione di un satellite dal razzo). EQM viene montato su una struttura che permette di generare shock meccanici di alta intensità. La procedura di test verrà individuata in collaborazione con il GSSI, definendo i parametri più rappresentativi con cui effettuare il test (accelerazione e durata). L'obiettivo è la verifica che la funzionalità sia preservata a valle della prova.

METODI DI CONTROLLO:

- Ispezioni visive;
- Analisi degli output degli accelerometri;
- Test funzionale dopo ogni ciclo di vibrazione.

4.2 WP-B.2 Test termici in camera a vuoto

Nella sezione si tracciano le linee guida per la messa a punto delle procedure inerenti le fasi di test che simulano l'operatività in orbita (repentine variazioni di temperatura, condizione di vuoto spinto). Nel seguito si identificano le principali fasi di test qualifica su EQM e di accettazione su PFM.

Qualifica EQM: l'unità viene installata su un thermal plate all'interno di una camera a termo vuoto (TVAC) in grado di poter ciclare termicamente l'unità nei range di temperatura attesi (a cui vengono aggiunti i margini di qualifica secondo specifica vigente). L'ancoraggio dell'unità avviene attraverso un sistema di disaccoppiatori termici da sviluppare che ha come target quello di consentire scambio termico di tipo esclusivamente radiativo. Durante il test l'unità è normalmente accesa. Vengono

testati anche regimi non operativi e di sopravvivenza. La procedura di test verrà configurata attraverso uno studio condotto in collaborazione con il GSSI.

Accettazione PFM: l'unità viene sottoposta alle stesse procedure del test di qualifica ma con tempistiche ridotte e margini di temperatura come da specifica di accettazione vigente. La procedura ottimale di accettazione verrà stabilita in collaborazione con il GSSI.

4.3 WP-B.3. Test di compatibilità elettromagnetica

Nella sezione si tracciano le linee guida per la messa a punto delle procedure inerenti le fasi di test per evidenziare eventuali interferenze elettromagnetiche con altri strumenti scientifici a bordo, soprattutto se altamente sensibili, per assicurare che i segnali ricevuti e trasmessi dal payload non siano disturbati da interferenze esterne, garantendo l'affidabilità dei dati raccolti, per verificare che il payload mantenga piena funzionalità anche in presenza di campi elettromagnetici intensi, prevenendo situazioni di malfunzionamento o errore. Tali procedure verranno sviluppate in collaborazione con il GSSI. Nel seguito si identificano le principali fasi di test qualifica su EQM e di accettazione su PFM.

Qualifica EQM: viene stabilito un piano di test in accordo con gli standard specifici per la missione e il tipo di ambiente elettromagnetico a cui il payload sarà esposto. Viene richiesto un test di emissioni elettromagnetiche di tipo condotto ed irradiato, la cui caratteristica è oggetto di studio in collaborazione con il GSSI. Viene richiesto anche un test di natura ESD (Electrostatic Discharge) le cui caratteristiche verranno delineate in fase di elaborazione della procedura.

Accettazione PFM: l'unità viene sottoposta alle stesse procedure del test di Qualifica ad esclusione del test ESD. La procedura ottimale di accettazione verrà stabilita in collaborazione con il GSSI.

5. PRESENTAZIONE DEI RISULTATI FASE B

5.1 Report

Al termine di tutte le attività di valutazione, verrà emesso un rapporto in conformità con il test plan.