Politecnico di Torino

Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica
A.a. 2020/2021
Sessione di Laurea Ottobre 2021

Studio di un energy harvester elettromagnetico per il monitoraggio di veicoli industriali

Relatori:
Aurelio Somà
Caterina Russo

Candidato:
Mirco Lo Monaco

Indice

Abstract iv
1. Introduzione 1
1.1. Tecnologia dell'energy harvesting e dispositivi AIoT 1
1.2. Applicazioni principali in letteratura e sul mercato 3
2. Configurazione dell'energy harvester 9
2.1. Caratteristiche principali 9
2.2. Modello matematico 11
2.2.1. Modello della rigidezza 13
2.2.2. Modello dello smorzamento meccanico 16
2.2.3. Modello elettromagnetico 16
3. Prove sperimentali 20
3.1. Setup sperimentale 20
3.2. Confronto tra prove sperimentali e modello numerico 21
3.3. Discussione dei risultati 28
4. Caso studio: energy harvester e sistema di monitoraggio per treni merci 29
4.1. Monitoraggio del treno merci 29
4.2. Valutazione dell'efficienza dell'energy harvester 32
4.3. Duty cycle e il range di applicazione dell'energy harvester 36
5. Conclusioni e sviluppi futuri 38
Bibliografia 39

Indice delle figure

Figura 1. Schema delle modalità di energy harvesting 1
Figura 2. Schema di un energy harvester elettromagnetico 2
Figura 3. Schema di un energy harvester piezoelettrico 3
Figura 4. Architettura di un sistema autonomo con sensori wireless 3
Figura 5. Tipologie di sistemi onboard (a); Tipologie di sistemi trackside (b) 5
Figura 6. Schema energy harvester di Wu et al. 6
Figura 7. Schema energy harvester di Perez et al. 6
Figura 8. Schema energy harvester di De Pasquale et al. 7
Figura 9. Sistema di monitoraggio autonomo Nexxiot Globehopper Crossmodal 7
Figura 10. Schema di funzionamento dei sistemi autonomi Perpetuum 8
Figura 11. Schema degli energy harvester studiati 9
Figura 12. Modello analitico del sistema studiato 11
Figura 13. Modello Simulink del sistema 12
Figura 14. Fitting esponenziale dei dati sperimentali di forza magnetica 14
Figura 15. Modello numerico della rigidezza magnetica 15
Figura 16. Schema del circuito del dispositivo 16
Figura 17. Relazione coefficiente di accoppiamento elettromagnetico e posizione del magnete mobile EH 2 18
Figura 18. Relazione smorzamento elettromagnetico e posizione magnete mobile EH 2 19
Figura 19. Schema banco prova statico (a); Fotografia banco prova statico (b) 20
Figura 20. Schema banco prova dinamico 21
Figura 21. Rappresentazione grafica banco prova dinamico 21
Figura 22. Confronto FRF sperimentali di EH 1 ed EH 2 22
Figura 23. Confronto FRF sperimentali e modello numerico EH 1 23
Figura 24. Confronto FRF sperimentali e modello numerico EH 2 24
Figura 25. Prove di carico EH 1 25
Figura 26. Prove di carico EH 2 26
Figura 27. Relazione tra potenza in risonanza e posizione assiale della bobina 27
Figura 28. Relazione tra potenza in risonanza e numero di avvolgimenti della bobina 27
Figura 29. Schema di funzionamento del sistema di monitoraggio studiato 29
Figura 30. Heatmap velocità-altitudine-temperatura del treno in data 09/08/20 30
Figura 31. Grafici velocità-altitudine-temperatura rispetto alla distanza percorsa 31
Figura 32. Metodo di conteggio dei cicli e costruzione del segnale di eccitazione 33
Figura 33. Potenze generate da simulazione con eccitazione reale per le diverse giornate 34
Figura 34. Variazione di efficienza con la frequenza d'eccitazione 35
Figura 35. Schema dei blocchi di un sistema autonomo 36
Figura 36. Rappresentazione grafica del concetto di duty cycle 36
Figura 37. Sistema con duty cycle minore di 1 (a). Sistema con duty cycle tendente a 1 (b). 37

Indice delle tabelle

Tabella 1. Descrizione dei componenti dell'energy harvester 10
Tabella 2. Caratteristiche dei magneti fisso e mobile 10
Tabella 3. Dimensioni e caratteristiche elettriche comuni Harvester 1 e 2 10
Tabella 4. Dimensioni e caratteristiche elettriche specifiche Harvester 1 e 2 11
Tabella 5. Principali blocchi modello Simulink 13
Tabella 6. Impostazioni modello MATLAB/Simulink 13
Tabella 7. RMS potenza generata da EH 1 ed EH 2 22
Tabella 8. Effetto del numero di avvolgimenti sulla potenza generata con ampiezza d'eccitazione 0.2g 26
Tabella 9. Confronto NPD tra dispositivi in letteratura 28
Tabella 10. Efficienza dell'energy harvester a 3.5 Hz 34

Abstract

La tesi tratta lo studio analitico e sperimentale della dinamica di un energy harvester elettromagnetico per la conversione dell'energia vibrazionale in potenza elettrica. Il dispositivo presentato in questo lavoro è costituito da una sospensione magnetica ed è destinato ad applicazioni di diagnostica e monitoraggio di veicoli industriali. Per soddisfare le recenti esigenze e sviluppi del monitoraggio strutturale e della diagnostica dei veicoli sono stati concepiti dei sistemi AIoT combinando sensori wireless ed energy harvester opportunamente progettati. L'utilizzo degli energy harvester come fonte di energia permette di rimpiazzare le batterie convenzionali che richiedono l'intervento di un operatore per la loro sostituzione, generando così energia per tutto il ciclo di vita dei dispositivi elettronici di diagnostica. I sistemi AIOT alimentati dagli energy harvester possono dunque essere posizionati in zone inaccessibili all'operatore umano e fornire informazioni cruciali di tipo strutturale e operativo durante l'esercizio.

Si descrive la progettazione e l'ottimizzazione dei sottosistemi accoppiati dell'energy harvester quali strutturale, elettrico e magnetico, studiandone il comportamento dinamico tramite modellazione numerica e simulazione in ambiente Matlab/Simulink. Il modello proposto è quello di un sistema massa molla smorzatore non lineare a 1 grado di libertà, eccitato da una forzante esterna sinusoidale. La non linearità del sistema deriva dalla dipendenza della rigidezza e dello smorzamento dalla posizione del magnete mobile che varia nel tempo sotto l'eccitazione esterna. La rigidezza del sistema è quella di una molla magnetica ed è definita tramite interpolazione di dati ottenuti da test sperimentali sull'harvester. Lo smorzamento del sistema dipende dall'azione viscosa dell'aria, dall'attrito tra il magnete mobile e la superficie interna del cilindro in cui scorre, dalle correnti indotte negli avvolgimenti. Il coefficiente di accoppiamento elettromagnetico, il quale lega la meccanica e la parte circuitale del sistema, è ottenuto dalla variazione del flusso magnetico concatenato con gli avvolgimenti durante l'oscillazione del magnete.

L'obiettivo principale del lavoro è la valutazione della potenza elettrica generata dall'energy harvester in condizioni di risonanza attraverso simulazioni con diverse frequenze ed ampiezze di eccitazione. Al fine di ottimizzare la potenza elettrica si effettua un'analisi dell'influenza dei parametri del circuito elettrico quali il numero di avvolgimenti e il carico resistente. Per validare il modello elettrico proposto, i risultati ottenuti dalle simulazioni numeriche sono comparati con quelli dei test di laboratorio su prototipi di energy harvester.

Infine, è valutata l'efficienza del dispositivo in un'applicazione reale su un treno merci tramite confronto della potenza elettrica effettivamente generata rispetto a quella teorica sotto input sinusoidale. Il confronto è possibile grazie ai dati di monitoraggio su accelerazioni verticali durante la corsa del treno. L'eccitazione random è ricondotta a una somma di sinusoidi a diversa ampiezza tramite il conteggio dei cicli e il diagramma delle eccedenze. Il segnale così ottenuto può essere implementato in ambiente Simulink per valutare il comportamento dinamico e la potenza elettrica generata dal dispositivo installato. Si introduce il concetto di duty cycle per valutare l'applicabilità dell'energy harvester nel circuito complessivo del sistema autonomo.

1. Introduzione

1.1. Tecnologia dell'energy harvesting e dispositivi AIoT

Recenti sviluppi tecnologici hanno consolidato un'ampia diffusione dei dispositivi IoT (Internet of Things) in svariati campi applicativi, catturando anche l'interesse delle industrie come strumenti di supporto nella manutenzione e diagnostica. Questi sistemi permettono di creare una rete di sensori wireless in cui ogni nodo fornisce dati cruciali sui componenti, strutture o veicoli monitorizzati, permettendo l'acquisizione di una conoscenza ad un livello di profondità irraggiungibile prima dello sviluppo di queste tecnologie. Le reti raccolgono e inviano ad una centralina un flusso continuo di dati in tempo reale riguardo allo stato di salute e condizioni operative del sistema monitorato, aprendo nuove frontiere per la realizzazione della Condition Based Maintenance & Monitoring (CBM). La CBM è una manutenzione proattiva basata sul monitoraggio real-time delle condizioni effettive del sistema tramite sensori e che viene programmata in concomitanza con la rilevazione di dati che, una volta post-processati da un'intelligenza artificiale, indicano una diminuzione delle performance o segni di un imminente cedimento. Le parti non sono sostituite in base ad una schedulazione preventiva o correttiva, ma quando il monitoraggio rileva tramite indicatore una condizione predeterminata. Dunque, la CBM permette di avere una schedulazione di manutenzione unica per ogni parte, garantendone il massimo profitto per ognuna sotto le sue specifiche condizioni operative. Il risultato è un incremento dell'affidabilità dei sistemi, una riduzione dei costi e dei tempi di manutenzione e una maggiore sicurezza. Gli investimenti nei sistemi AIoT (sensori, registratori di dati, trasmettitori) sono contenuti rispetto i vantaggi ottenuti dalla CBM. Il flusso di dati garantisce una migliore e ottimizzata fase di progettazione e la valutazione della durabilità di un sistema. I nodi della rete devono avere alcune proprietà fondamentali quali basso consumo di energia, lungo ciclo di vita, taglia ridotta e una connessione wireless solida. Queste permettono facile integrazione dei nodi nella rete e il loro posizionamento in zone inaccessibili o poco sicure per l'intervento umano di manutenzione. Inoltre, si ha una riduzione dei costi di manutenzione associati con la sostituzione e lo smaltimento delle batterie, attività che richiedono l'intervento di un operatore e che hanno un impatto ambientale. Nelle applicazioni industriali, dunque, l'uso di batterie convenzionali è uno svantaggio ed emerge la necessità di una fonte di energia alternativa per l'alimentazione dei dispositivi IoT. A questo scopo, cresce l'interesse della ricerca in una nuova categoria di sistemi nel campo dell'AIoT (Autonomous Internet of Things) che prevedono l'accoppiamento tra la rete di sensori wireless e gli energy harvester.

L'energy harvesting è un processo di conversione dell'energia inutilizzata dell'ambiente (solare, eolica, gradienti di temperatura, onde radio, moto ondoso, vibrazioni meccaniche) in energia elettrica. È possibile classificare i dispositivi di energy harvesting in base alla sorgente di energia dall'ambiente come schematizzato in *Figura 1*.

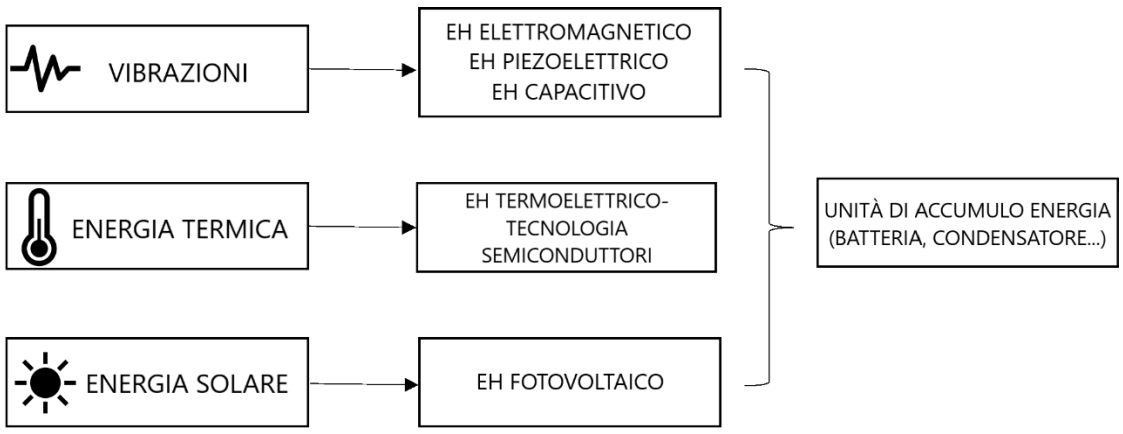

Figura 1. Schema delle modalità di energy harvesting

La potenza elettrica generata in output dipende dal tipo di meccanismo, fonte di energia e metodologia di energy harvesting. Considerando l'applicazione veicolistica a cui il dispositivo è destinato, le principali fonti di energia sono: meccanica che sfrutta le vibrazioni indotte dal contatto ruota-strada (o rotaia), acustica, solare, eolica e termica. Le svariate soluzioni di energy harvesting che l'ambiente industriale offre attraggono la ricerca, in particolare nel ferroviario. Tra le fonti di energia disponibili quella più appetibile è la meccanica vibrazionale poiché è facilmente reperibile e convertibile in elettrica. Le tipologie più diffuse di energy harvester che sfruttano l'energia meccanica sono elettromagnetico e piezoelettrico. Il lavoro della tesi si concentra sullo studio delle vibrazioni meccaniche, in particolar modo sugli energy harvester di tipo elettromagnetico.

I dispositivi elettromagnetici (vedi *Figura 2*) sono costituiti da una bobina e un magnete permanente, di cui uno dei due è fisso. Il moto relativo tra i due componenti genera un campo magnetico variabile che induce una forza elettromotrice nella bobina secondo la legge di Faraday. Solitamente il magnete è sospeso tramite una molla e la base del generatore è fissata su un elemento posto in vibrazione. Le molle sono dimensionate in modo da avere una rigidezza opportuna per garantire la sintonizzazione della frequenza di risonanza propria del sistema con quelle dominanti dell'eccitazione esterna, che sono basse considerando l'applicazione in veicoli industriali. A questo scopo, nei dispositivi trattati in questo studio sono impiegate delle sospensioni magnetiche caratterizzate da rigidezze molto basse (rapporto forza spostamento) e allo stesso tempo capaci di garantire lunghe corse e sufficiente velocità del magnete mobile. Le principali difficoltà di progettazione di questa categoria di energy harvester sono la risposta dinamica in frequenza e l'ottimizzazione dell'accoppiamento tra la parte meccanica ed elettromagnetica del sistema. Per identificare il comportamento del generatore e l'influenza dei parametri caratteristici del sistema è necessaria una caratterizzazione sperimentale di diversi prototipi e il confronto dei risultati con il modello numerico. Possono generare un considerevole quantitativo di potenza e corrente elettrica e non presentano problematiche significative in termini di fatica e affidabilità. Il principale svantaggio è correlato alle grandi dimensioni del dispositivo per la presenza dei magneti e delle bobine. Questo si riflette sia su una densità di potenza, ovvero il rapporto potenza su volume, generalmente bassa e su un difficile posizionamento del dispositivo in zone critiche. Il dimensionamento di questi dispositivi è complesso perché deve garantire l'integrabilità all'interno della rete sensorizzata e al contempo la produzione adeguata di potenza elettrica. Generatori di taglia ridotta sono più facilmente posizionabili nel sistema e in zone inaccessibili, ma le masse e i volumi potrebbero non generare una potenza sufficiente.

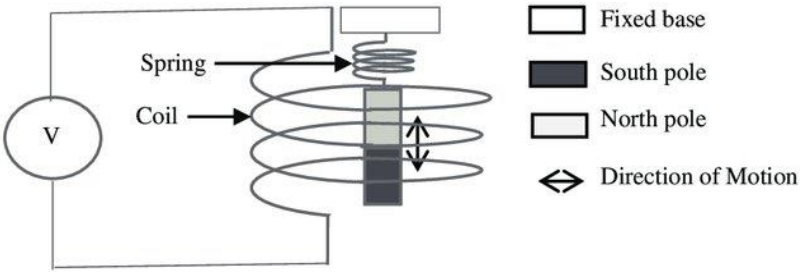

Figura 2. Schema di un energy harvester elettromagnetico

I dispositivi piezoelettrici sono costituiti da una massa di prova e una o più elementi strutturali in materiale piezoelettrico capace di convertire stress/deformazioni applicate in elettricità. Le vibrazioni della massa provocano la flessione degli elementi strutturali e proporzionalmente una potenza elettrica in uscita. La configurazione più diffusa di questi dispositivi è la trave incastrata (vedi *Figura 3*). I materiali frequentemente utilizzati contengono piombo come il piombo-zirconato di titanio (PZT) e ciò limita l'utilizzo in applicazioni umane poiché pericolosi per la salute.

I generatori piezoelettrici producono potenza minore rispetto a quelli elettromagnetici ma hanno una densità di potenza maggiore. Inoltre, hanno problematiche di fatica dovute ai cicli di flessione degli elementi strutturali.

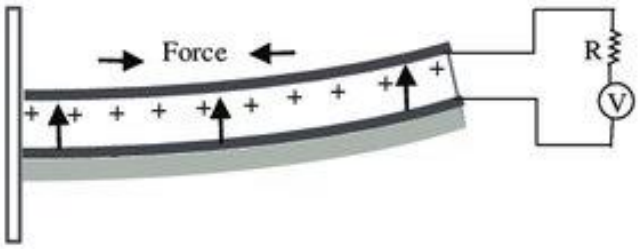

Figura 3. Schema di un energy harvester piezoelettrico

In generale, tutti i dispositivi di energy harvesting che basano il loro funzionamento sulla risonanza presentano problemi di banda stretta delle frequenze. I generatori lineari hanno un'efficienza molto bassa quando l'eccitazione esterna ha una frequenza diversa da quella naturale del sistema. L'introduzione di non linearità nel sistema, come nella rigidezza, comporta un ampliamento significativo della banda di risonanza del sistema, permettendo la generazione di una potenza adeguata per un maggiore range di frequenze. In particolare, nelle applicazioni in veicoli industriali, le frequenze e le ampiezze di eccitazione sono variabili nel tempo in maniera casuale. Dunque, risulta importante sintonizzare le frequenze del sistema su quelle dominanti dell'eccitazione ma anche avere una banda più larga per permettere un funzionamento adeguato lontano dalle condizioni di ottimo. La sintonizzazione attiva potrebbe migliorare ulteriormente l'efficienza dei generatori. I dispositivi trattati in questo studio presentano non linearità sia nella rigidezza che nello smorzamento del sistema, come trattato nel *Capitolo 2*.

1.2. Applicazioni principali in letteratura e sul mercato

Nella letteratura gli energy harvester alimentati da vibrazioni meccaniche sono ampiamente studiati in diverse configurazioni, dimensioni e tipologie di molle. Questi generatori dimostrano una buona compatibilità per l'alimentazione di sistemi sensorizzati autonomi [8,9] in campi applicativi come il monitoraggio strutturale, trasporti e logistica, controllo dell'efficienza energetica [10]. Sono dei generatori di supporto in loco per batterie ricaricabili e supercondensatori. Le applicazioni più recenti sono nei dispositivi indossabili per il monitoraggio dell'attività fisica umana. [11,12]. In *Figura 4* è riportato uno schema dell'architettura di un sistema con sensori wireless autoalimentato. Gli energy harvester permettono l'immagazzinamento di energia e l'alimentazione dei nodi wireless, i quali misurano i parametri e mandano i dati processati senza connessione fisica tramite moduli RF.

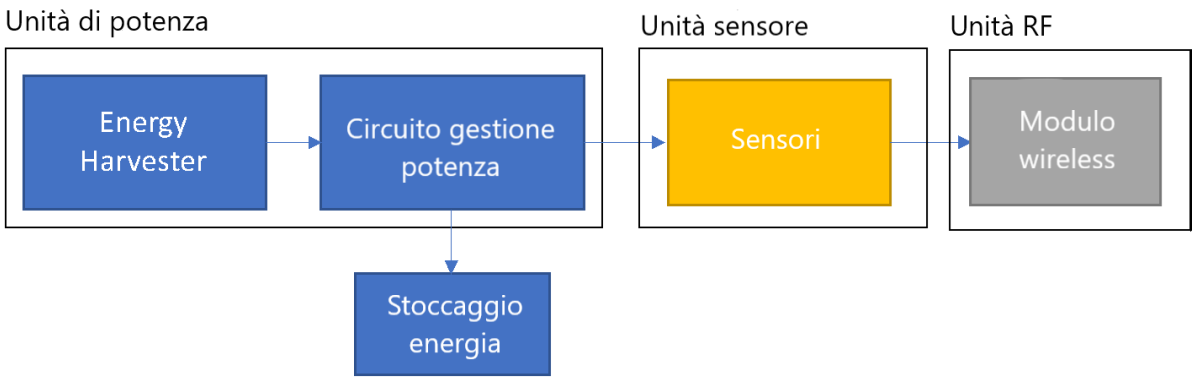

Figura 4. Architettura di un sistema autonomo con sensori wireless

L’applicazione principale di destinazione dei dispositivi studiati in questo lavoro è l’alimentazione di reti sensorizzate wireless su treni merci non elettrificati. I sistemi AIoT utilizzati in questo campo possono essere di due tipologie in base al montaggio [31]. I sistemi “onboard” (montati a bordo) sono composti da accelerometro, giroscopio, sensore del rumore, GPS, sensore di temperatura che mandano dati real-time della condizione del treno su un cloud accessibile da remoto per individuare difetti o irregolarità delle rotaie e per monitorare la dinamica, velocità e posizione del veicolo (vedi *Figura 5a*). Permettono di rilevare la posizione istante per istante del veicolo, difetti nell’impianto freni, surriscaldamento dei cuscinetti, danni alle ruote e alle rotaie. L’hardware deve essere robusto per resistere alle condizioni gravose dell’ambiente ferroviario, con particolari caratteristiche in base alla sua posizione lungo il veicolo. Sono montati solitamente nelle sospensioni (a volte svolgendone pure la funzione) o nel telaio del carrello. I sistemi di monitoraggio “trackside” (lungo rotaia) sono distribuiti lungo i tracciati dei treni merci (vedi *Figura 5b*). Svolgono funzioni di comunicazione, segnalazione di pericolo tramite luci, controllo degli scambi e monitoraggio delle condizioni della rotaia. Non inviano dati in real-time e dunque non raggiungono il livello di performance richiesto. I sistemi trackside permettono infatti di identificare cedimenti solo in specifiche posizioni lungo i tracciati. Dunque, tra due punti successivi di rilevazione possono avvenire criticità che hanno il tempo di propagarsi e causare danni. Un esempio di questi sistemi sono i Wheel Impact Load Detectors (WILD) utilizzati in Australia, il cui impiego non ha però prevenuto il deragliamento di 30 treni merci nell’anno 2016/2017 [31]. I deragliamenti dei treni merci sono più frequenti di quelli passeggeri e possono causare severi danni alle infrastrutture, portando anche a chiusure dei tracciati per giorni. I sistemi AIoT wireless sono installati in zone remote e inaccessibili in cui non è possibile (o conveniente) effettuare un cablaggio per l’alimentazione, specialmente per i treni merci che hanno totale assenza di elettrificazione a bordo. Pertanto, la ricerca si concentra sullo studio di una fonte d’energia alternativa, di cui una soluzione tra le più promettenti è l’energy harvesting. Gli ordini di grandezza della potenza degli energy harvester elettromagnetici in applicazioni ferroviarie variano dai micro-Watt ai Watt [32]. L’energy harvesting in ambito ferroviario, dunque, presenta le potenzialità sufficienti per soddisfare i requisiti di alimentazione di strumentazioni comuni. Le metodologie di energy harvesting per l’energia meccanica variano in base al tipo di sistema, se on-board oppure trackside. Nel caso di sistemi trackside, l’energia vibrazionale dal passaggio del treno viene sfruttata in termini di deflessione verticale o deformazione longitudinale della rotaia. Gli energy harvester possono essere collegati al gambo, alla suola della rotaia oppure alle traverse. L’energia acustica può essere usata in dispositivi appositi che producono potenza e contemporaneamente riducono il rumore dei treni ad alta velocità. Nei sistemi onboard montati su treni passeggeri l’alimentazione è fornita da generatori e dai motori stessi, mentre per i treni merci non elettrificati ciò non è possibile e si ricorrre ad energy harvester di tipo elettromagnetico, piezoelettrico o triboelettrico.

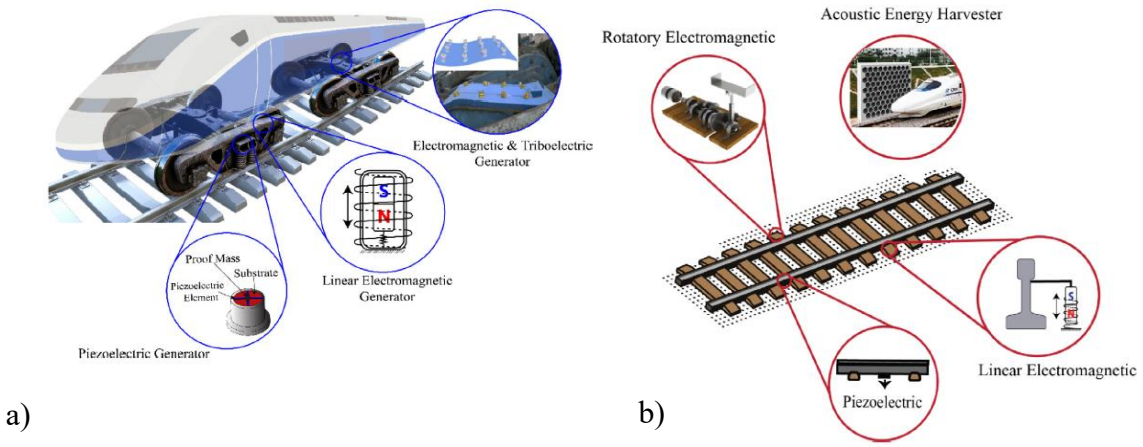

Figura 5. Tipologie di sistemi onboard (a); Tipologie di sistemi trackside (b)

Di seguito sono riportati diversi sistemi studiati da ricercatori per applicazioni di tipo ferroviario. McClanachan et al. [33] propongono un sistema per il monitoraggio autonomo dell'interazione tra veicolo e rotaia di un vagone che trasporta carbone, alimentato da una batteria caricata da un alternatore. Il sistema wireless rileva e comunica dati sulla velocità del veicolo, posizione, pressione dell'olio freni, accelerazione longitudinale, imbardata del carrello e la forza verticale sulla ruota. Harley et al. [34] usano un generatore elettrico accoppiato alle ruote per monitorare le performance dei freni pneumatici. Il moto rotatorio delle ruote alimenta un alternatore a 12V tramite una trasmissione a cinghia a due stadi. Un circuito gestisce il ciclo di carica della batteria da 80Ah. Darby et al. [35] propongono un sistema alimentato da celle solari e batterie. Donelson et al. [36] usano un cuscinetto Timken come generatore per ricaricare la batteria del sistema di monitoraggio. Il lavoro di Macucci et al. [37] riguarda un sistema low-cost a bassa potenza alimentato da un energy harvester elettromagnetico accoppiato con un supercondensatore per il monitoraggio di deragliamenti. Se l'accelerazione misurata sull'assale è maggiore di una soglia in termini di ampiezza e frequenza e la differenza di ampiezza della vibrazione assoluta tra due misurazioni consecutive è sopra una soglia allora viene inviato un segnale di allarme al conducente. Wu et al. [42] propongono un energy harvester elettromagnetico che sfrutta un meccanismo di rettificazione delle vibrazioni (VRM) per sistemi autoalimentati "trackside" in applicazioni ferroviarie (vedi *Figura 6*). Un meccanismo vite-madrevite converte le vibrazioni lineari in un moto rotatorio bidirezionale, retttificato in moto unidirezionale da un riduttore e dato in input al sistema di generazione dell'energia. L'energia usata deriva dalla decelerazione del treno in prossimità delle stazioni e il sistema alimenta un Dowty retarder (DRs) che assiste la frenata.

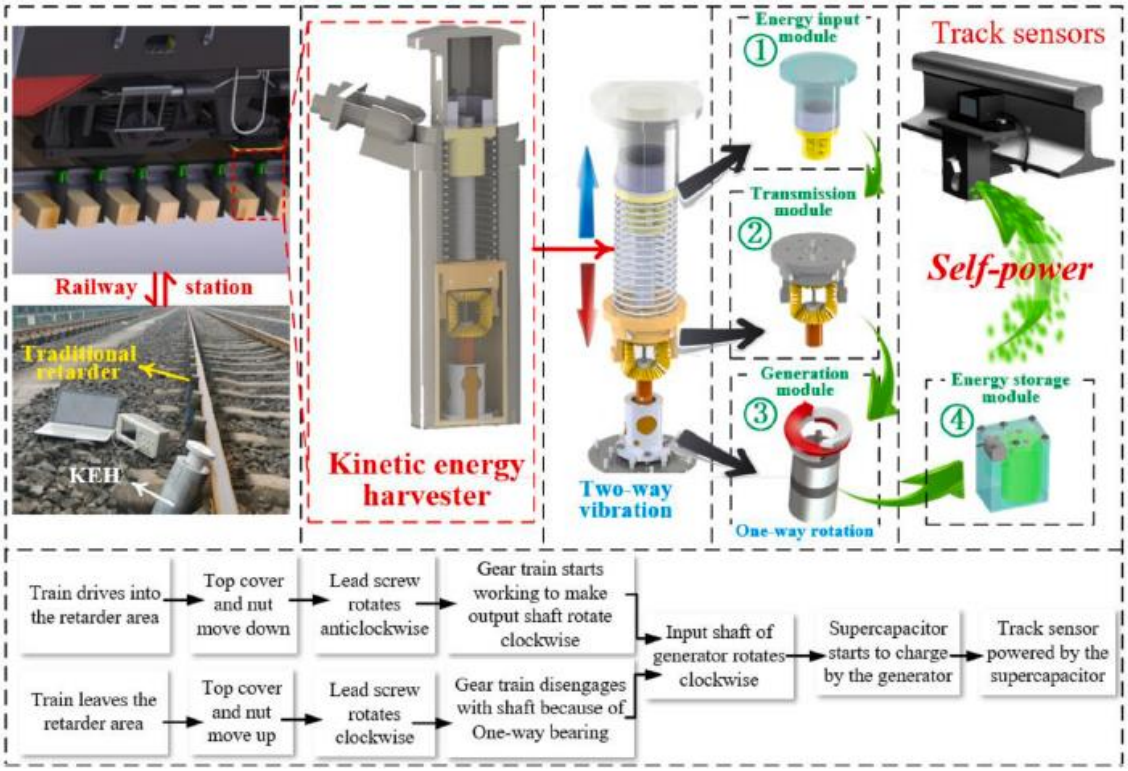

Figura 6. Schema energy harvester di Wu et al.

Perez et al. [39] studiano un energy harvester elettromagnetico lineare a due gradi di libertà montato sul carrello del vagone, di cui uno schema è riportato in *Figura 7*. La presenza di due masse sospese permette di aumentare la potenza prodotta poiché le due frequenze naturali sono sintonizzate su due frequenze fondamentali basate sulle condizioni di carico/scarico del treno.

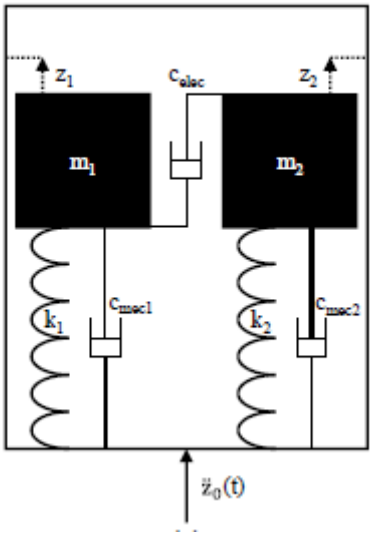

Figura 7. Schema energy harvester di Perez et al.

Il prototipo studiato da De Pasquale et al. [5] è un energy harvester elettromagnetico non lineare con sospensione magnetica simmetrica e asimmetrica testato su un "roller rig" (vedi *Figura 8*). La simmetria della sospensione è legata alla presenza di due magneti fissi alle due estremità del dispositivo che generano una forza di repulsione sul magnete mobile. Il sistema genera un voltaggio di 2.5 V, corrente di 50 mA e potenza di 100 mW.

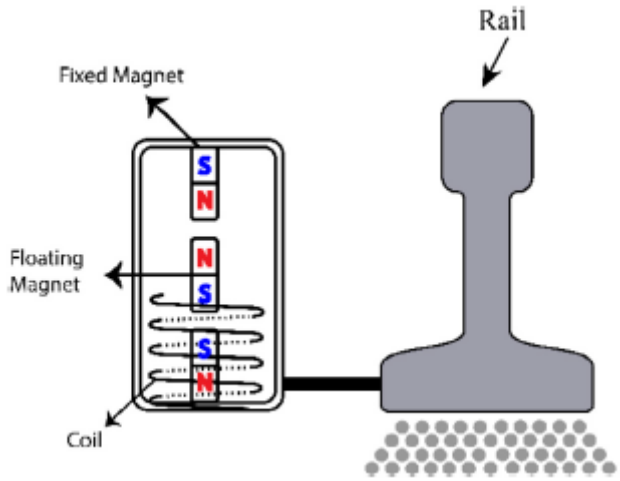

Figura 8. Schema energy harvester di De Pasquale et al.

Esistono sul mercato applicazioni industriali di energy harvester in sistemi AIoT per l'ambito ferroviario già consolidate. Tra i dispositivi commerciali principali si annoverano quelli di Nexxiot e Perpetuum.

Nexxiot Globehopper Crossmodal [40] è un sistema a manutenzione zero per il monitoraggio real-time di vagoni in treni non elettrificati, riportato in *Figura 9*. Il dispositivo permette aggiornamenti real-time nel cloud sulla posizione e funzionamento del vagone e invia dati letti dai sensori ogni 5 minuti. Sono equipaggiati con pannelli solari che permettono operatività del sistema in ogni momento. L'implementazione di meccanismi di gestione della batteria e risparmio energetico adattivo garantisce il funzionamento del sistema senza manutenzione per 6 anni. Il design robusto e solido del sistema permette l'invio di dati anche in ambienti gravosi e difficili sotto shock, vibrazioni e cambi di temperatura. L'accelerometro permette di misurare gli shock lungo le tre dimensioni e di raccogliere dati per l'analisi di post processing.

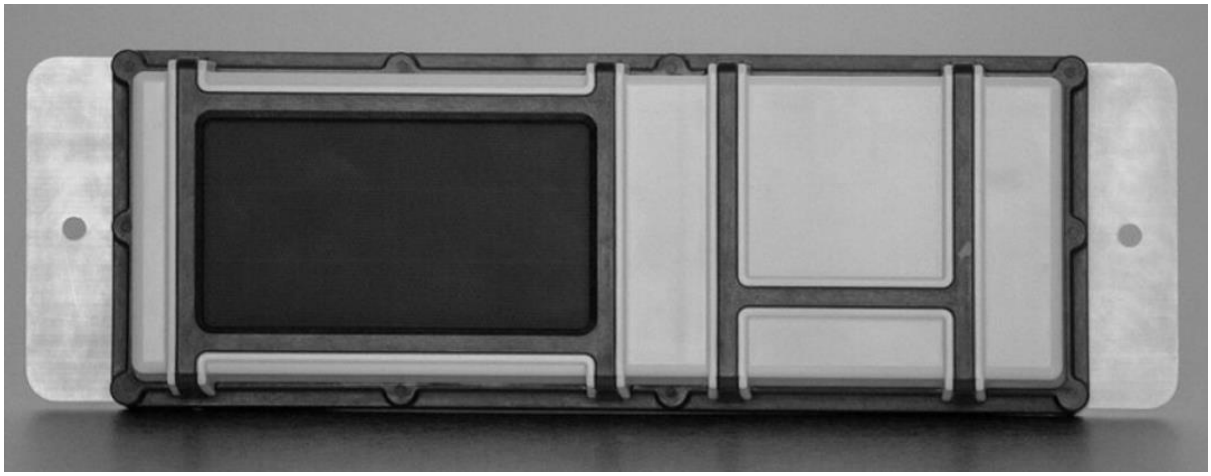

Figura 9. Sistema di monitoraggio autonomo Nexxiot Globehopper Crossmodal

Perpetuum [41] commercializza equipaggiamenti di monitoraggio autoalimentati collegati ad un cloud composti da sensori wireless ed energy harvester elettromagnetici. I sistemi sono progettati per durare più di 100 anni senza manutenzione e hanno elevata affidabilità e bassi costi. Possono operare in un range di temperatura da -40 °C a 85 °C. Questi sistemi sono principalmente usati nell'ambito ferroviario per monitorare real time lo stato di salute delle infrastrutture e treni. Sono sistemi on-board molto robusti e senza cablaggio montati sui treni merci non elettrificati per monitorare temperatura, pressione, perdite e sicurezza. Il principio di funzionamento del sistema e le varie interfacce tra i moduli sono schematizzati in *Figura 10*.

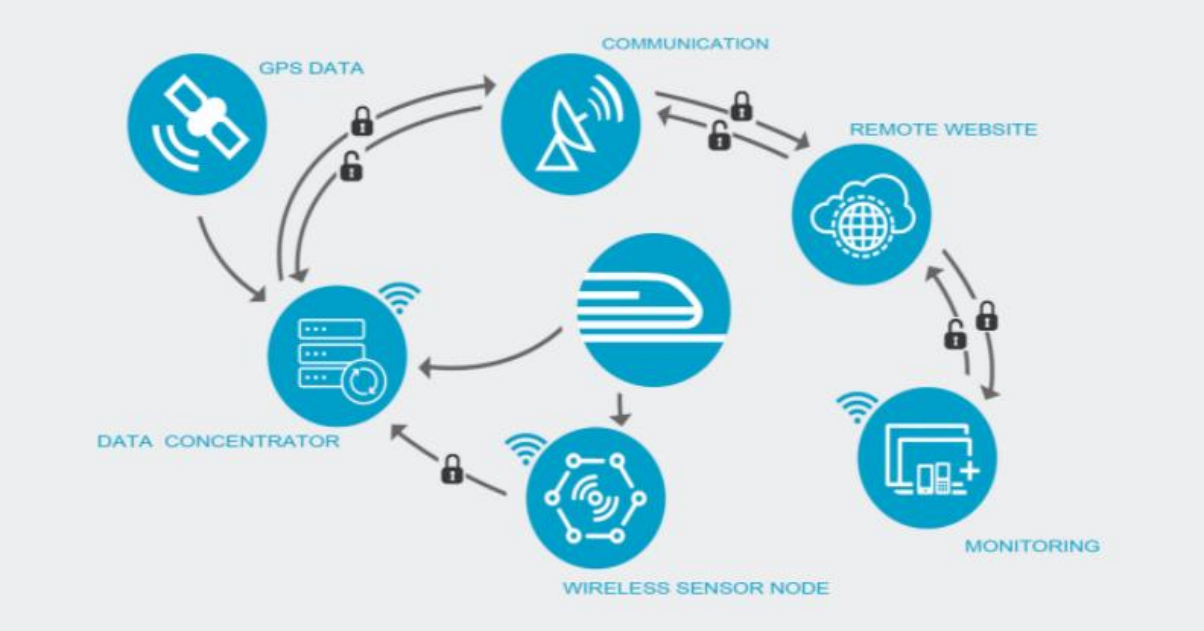

Figura 10. Schema di funzionamento dei sistemi autonomi Perpetuum

2. Configurazione dell'energy harvester

2.1. Caratteristiche principali

Il dispositivo studiato in questo lavoro è composto da un magnete fisso, uno mobile e quattro bobine. La peculiarità di questa configurazione è la presenza di una sospensione magnetica asimmetrica a differenza delle soluzioni più diffuse in letteratura. L'unico magnete fisso è posto alla base dell'harvester e il magnete mobile ritorna alla posizione di equilibrio tramite forza di gravità, senza l'azione del magnete fisso all'estremità superiore, al cui posto è stato inserito un bumper per evitare impatti. Il principio di funzionamento del sistema consiste nell'oscillazione del magnete mobile, in levitazione per repulsione da parte del magnete fisso alla base, all'interno di un cilindro intorno a cui sono avvolte le bobine. La variazione nel tempo del flusso magnetico concatenato con le bobine induce una corrente elettrica e genera potenza su un carico resistente esterno.

In *Figura 11* è presente uno schema dei dispositivi di energy harvesting studiati di cui, in *Tabella 1*, sono riportati i principali componenti. Nel dettaglio, il magnete mobile cilindrico deriva dall'assemblaggio di tre magneti sfruttandone la forza attrattiva, separati da dei distanziali. L'altezza e la massa totale del magnete mobile dipendono da quelle dei singoli componenti e influenzano la caratteristica non lineare della rigidezza del sistema. Il magnete fisso è anch'esso cilindrico e deriva dall'assemblaggio di due magneti senza distanziali. La posizione di equilibrio del magnete mobile (x0 nella Figura 3), la corsa massima e le posizioni assiali delle singole bobine sono misurate rispetto alla superficie superiore del magnete fisso alla base. Poiché il magnete mobile ha un'estensione assiale discreta ed è assunto isotropo, la sua posizione di equilibrio è localizzata assialmente a metà altezza dello stesso. Per la costruzione del modello Simulink il magnete mobile è assunto puntiforme concentrandone tutta la massa nel baricentro.

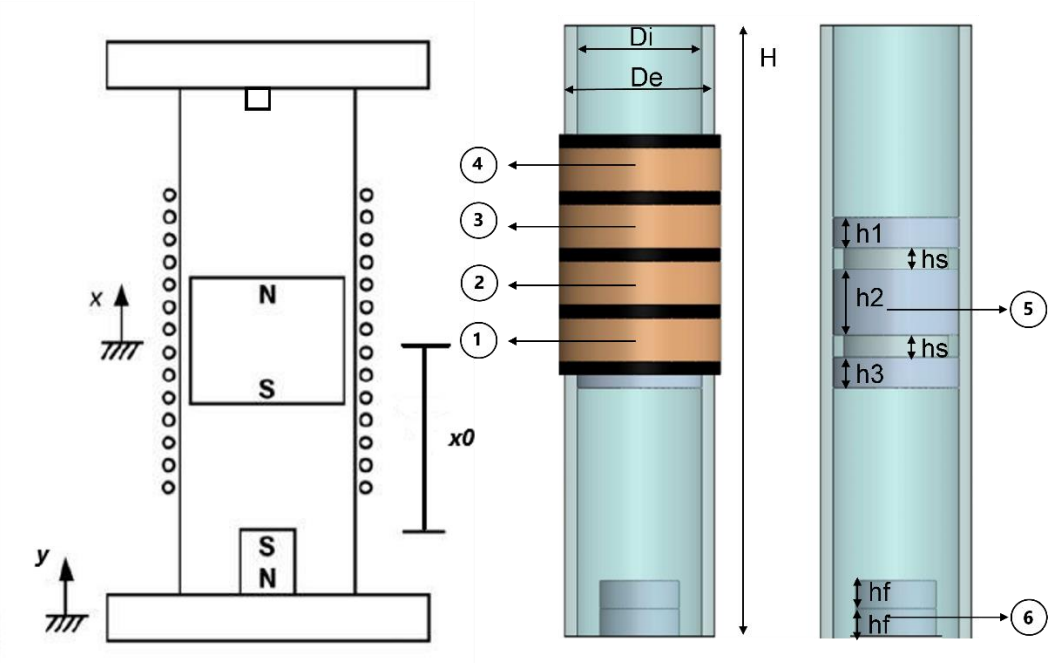

Figura 11. Schema degli energy harvester studiati

N	Componente
1	Bobina 1
2	Bobina 2
3	Bobina 3
4	Bobina 4
5	Magnete mobile
6	Magnete fisso

Tabella 1. Descrizione dei componenti dell'energy harvester

In questo studio sono analizzati due dispositivi a cui si farà riferimento nel testo come harvester 1 (EH 1) e harvester 2 (EH 2), mantenendo gli stessi magneti sia fisso che mobile e variando il numero di avvolgimenti di ciascuna bobina. L'harvester 1 è costituito da 4 bobine da 280 avvolgimenti ciascuna, mentre l'harvester 2 da 4 bobine da 435 avvolgimenti ciascuna. I test sperimentali su entrambi gli harvester sono svolti collegando le bobine 2 e 4 (vedi schema in *Figura 11*) singolarmente per valutare l'effetto della posizione assiale degli avvolgimenti sulla potenza prodotta. Le principali caratteristiche dei due energy harvester studiati sono riportate nelle *Tabelle 2-3*. In *Tabella 4* sono riportate le caratteristiche che differenziano i due harvester studiati, con le altezze degli avvolgimenti riferite rispetto allo zero posto sulla superficie superiore del magnete fisso.

	Magnete mobile	Magnete fisso
Magnetizzazione	N42	N42
Densità flusso magnetico [T]	1.29-1.32	1.32-1.37
Massa totale [g]	186	10
Diametro [mm]	30	15
Altezza h1, h3 [mm]	7	
Altezza h2 [mm]	15	
Altezza distanziali hs [mm]	5	
Altezza totale [mm]	39	
Altezza hf [mm]		9.5

Tabella 2. Caratteristiche dei magneti fisso e mobile

	Caratteristiche generali
Altezza cilindro H [mm]	188.5
Diametro esterno cilindro De [mm]	36
Diametro interno cilindro Di [mm]	30.2
Corsa massima magnete mobile [mm]	176.6
Lunghezza assiale bobina [mm]	11
Posizione di equilibrio magnete mobile x0 [mm]	59.6
Diametro esterno bobina [mm]	39
Diametro interno bobina [mm]	36
Diametro avvolgimento [mm]	0.1
Area sezione avvolgimento [m^2]	$7.9 \cdot 10^{-9}$
Resistività rame [Ωm]	$1.7 \cdot 10^{-8}$

Tabella 3. Dimensioni e caratteristiche elettriche comuni Harvester 1 e 2

	Harvester 1	Harvester 2
Altezza primo avvolgimento bobina 1 [mm]	53.8	51.1
Altezza primo avvolgimento bobina 2 [mm]	68.3	68.1
Altezza primo avvolgimento bobina 3 [mm]	84.6	84.1
Altezza primo avvolgimento bobina 4 [mm]	103.9	102.1
Resistenza bobina [**Ω**]	70	110
Numero di avvolgimenti	280	435

Tabella 4. Dimensioni e caratteristiche elettriche specifiche Harvester 1 e 2.

2.2. Modello matematico

I principi basilari del funzionamento di un energy harvester elettromagnetico sono ampiamente studiati nella letteratura [8]. Questi generatori possono essere studiati analiticamente tramite il modello massa-molla-smorzatore a un grado di libertà (vedi *Figura 12*). Il magnete mobile ha un grado di libertà *z* in direzione assiale relativo alla base, che riceve come input uno spostamento sinusoidale *y* imposto. L'interazione tra i due magneti può essere assimilata ad una molla magnetica con rigidezza non lineare. Lo smorzamento del sistema ha due componenti principali, viscoso dovuto all'aria intrappolata nel tubo e all'attrito tra il magnete mobile e la superficie interna del tubo, elettromagnetico dovuto all'induzione della corrente elettrica negli avvolgimenti.

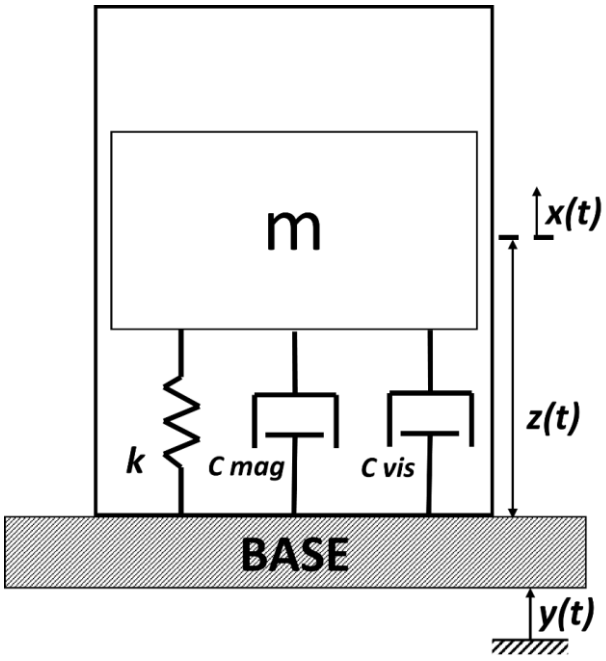

Figura 12. Modello analitico del sistema studiato

L'equazione del moto è scritta utilizzando come coordinata il moto relativo del magnete mobile *z*. L'origine del sistema di riferimento assoluto della coordinata *x* è posta nella posizione di equilibrio del magnete mobile *x0*, quando la forza di repulsione dei magneti eguaglia la forza peso. Questa convenzione è stata scelta sia per considerare solo le azioni dinamiche nell'equazione del moto sia per una scrittura più agevole delle caratteristiche di rigidezza e smorzamento.

$$m\ddot{x} + c_{tot}(\dot{x} - \dot{y}) + k(x - y) = 0$$
$$z = x - y$$
$$m\ddot{z} + c_{tot}\dot{z} + kz = -m\ddot{y}$$

$$\ddot{y} = -\omega^2 y_0 \sin(\omega t) = -Y_0 \sin(\omega t)$$

L'equazione risultante implementata su Simulink è la seguente:

$$\ddot{z} = -\frac{c_{tot}}{m}\dot{z} - \frac{k}{m}z + Y_0 \sin(\omega t)$$

Dove:

- m è la massa del magnete mobile
- c_{tot} è la somma delle due componenti di smorzamento
- k è la rigidezza magnetica
- Y_0 è l'ampiezza dell'accelerazione in input considerata sinusoidale
- ω è la frequenza di eccitazione

In *Tabella 5* sono descritti i principali blocchi implementati nel modello Simulink, identificati dalle etichette blu in *Figura 13*.

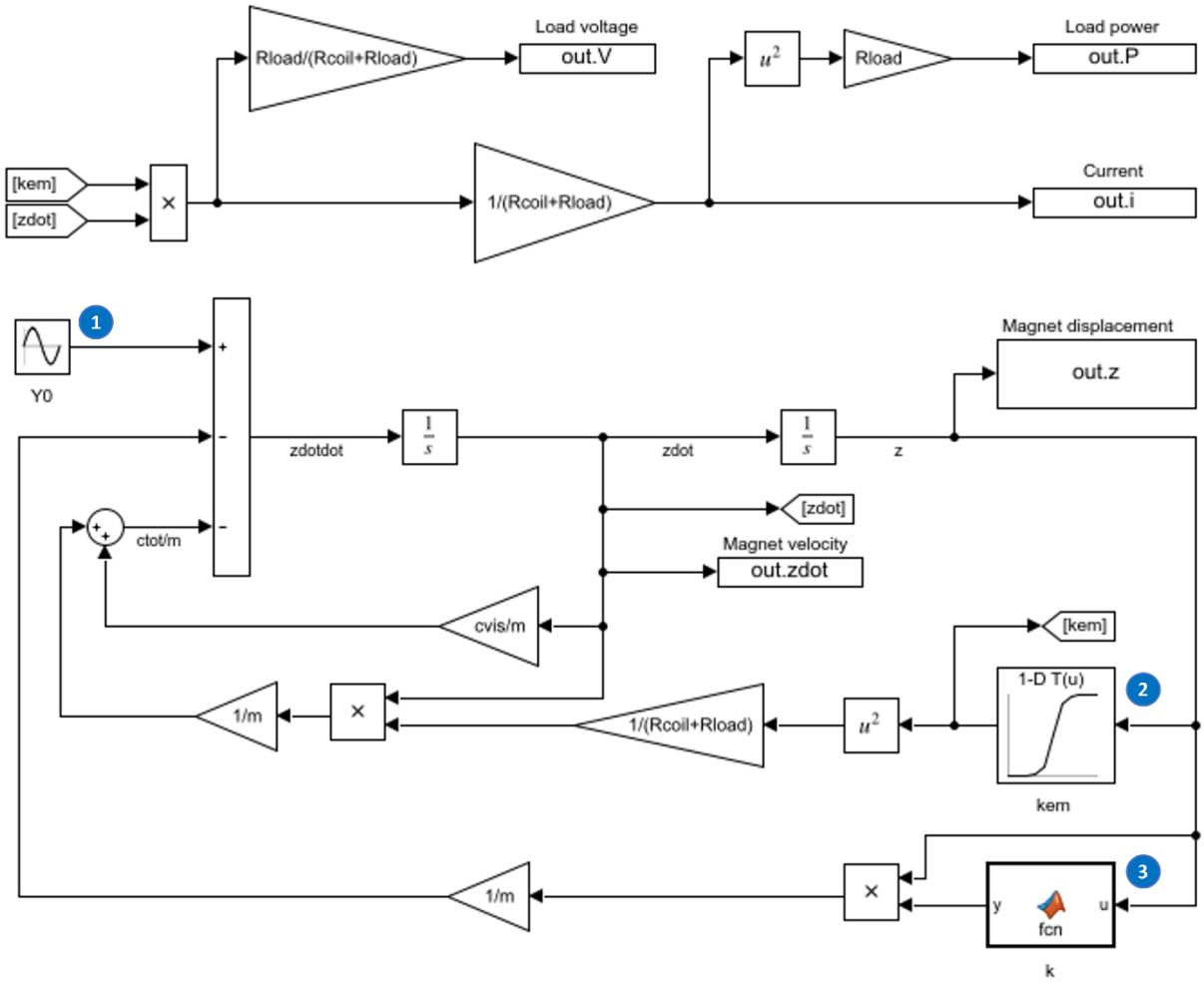

Figura 13. Modello Simulink del sistema

N	Tipo	Descrizione
1	Sine Wave	Eccitazione di ampiezza Y_0 e frequenza ω
2	1D Lookup Table	Relazione posizione magnete mobile - coefficiente elettromagnetico
3	MATLAB Function	Relazione posizione magnete mobile - rigidezza

Tabella 5. Principali blocchi modello Simulink

Il modello costruito nell'ambiente MATLAB/Simulink permette con una sola simulazione di studiare il comportamento dinamico e l'interazione tra la parte meccanica ed elettrica del sistema. Inoltre, è possibile introdurre le non linearità della rigidezza e dello smorzamento del sistema in maniera diretta.

Nel dettaglio, la caratteristica di rigidezza è modellizzata tramite il blocco "MATLAB Function" ricevente in input la posizione istantanea del magnete mobile (z) e in output riporta la rigidezza calcolata, come spiegato nel *Paragrafo 2.2.1*. Per introdurre il coefficiente di accoppiamento elettromagnetico si usa il blocco "1D Lookup Table" che riceve anch'esso in input la posizione istantanea del magnete mobile, come spiegato nel Paragrafo *2.2.3.* Infine, sono riportate in Tabella 6 le impostazioni dei principali parametri del modello per darne una descrizione completa.

Nome	Valore
Simulation Time	20 [s]
Solver Type	Ode45 variable step
Max Step Size	10^{-3}
Min Step Size	Auto
Relative Tolerance	10^{-3}

Tabella 6. Impostazioni modello MATLAB/Simulink

2.2.1. Modello della rigidezza

La principale difficoltà nella definizione del modello matematico risiede nell'individuazione del corretto modello della rigidezza, considerando in prima battuta lo smorzamento costante. La rigidezza della sospensione magnetica è direttamente influenzata dalle proprietà dei due magneti. Variandone le dimensioni, masse e magnetizzazioni, possono essere ottenute diverse caratteristiche non lineari delle molle. La relazione tra la forza magnetica e lo spostamento del magnete mobile è individuata dal miglior fit con i dati sperimentali ottenuti dai test statici per la caratterizzazione della sospensione magnetica. I dati di forza magnetica e relativo spostamento del magnete mobile sono ottenuti comprimendolo verso il fisso tramite masse calibrate. Avendo assunto come origine dell'asse z la posizione di equilibrio *x0*, questi valori di forza si riferiscono ad una posizione di segno negativo del magnete mobile.

Come primo tentativo di individuazione del modello matematico si è ricorso al modello di Duffing della rigidezza:

$$k = k_1 x + k_3 x^3$$

Questa relazione non è però adatta a descrivere il comportamento di una sospensione magnetica asimmetrica. La curva di Duffing presenta una simmetria rispetto l'asse delle ordinate che non rappresenta correttamente la fisica del dispositivo studiato. La rigidezza della molla avrebbe valore nullo nell'origine dell'asse z, ovvero nella posizione di equilibrio statico. Il magnete mobile, seguendo la relazione di Duffing, dopo aver superato la posizione di equilibrio presenterebbe una rigidezza crescente imputabile alla presenza di un altro magnete fisso all'estremità superiore. Dai test sperimentali sull'energy harvester si è visto, invece, che la molla asimmetrica presenta una rigidezza che tende asintoticamente a zero all'allontanarsi del magnete mobile da quello fisso.

Questo comportamento è dovuto al fatto che l'interazione magnetica di repulsione diminuisce all'allontanarsi dei due magneti. Un'ulteriore difficoltà risiede nell'identificazione dei parametri *k1* e *k3* del modello di Duffing, perciò si è preferito ricercare una soluzione più efficace. Dopo diversi tentativi per prova ed errore, la relazione tra forza magnetica e spostamento del magnete mobile che interpola meglio i dati sperimentali è di tipo esponenziale (vedi *Figura 14*).

$$F(z) = ae^{-bz}$$

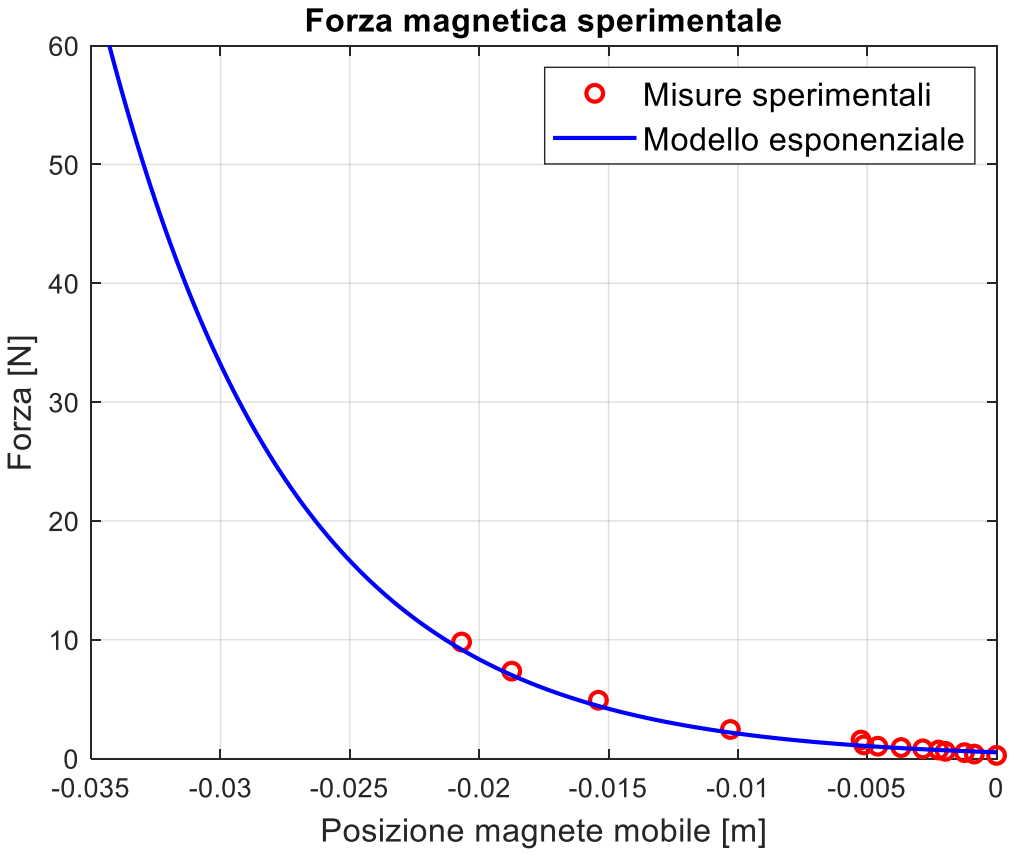

Figura 14. Fitting esponenziale dei dati sperimentali di forza magnetica

Di conseguenza la rigidezza può essere ottenuta derivando l'equazione:

$$k(z) = -bae^{-bz}$$

Dalla relazione tra rigidezza e posizione del magnete mobile si ricava la frequenza naturale del sistema lineare, calcolando il valore di *k* della posizione di equilibrio.

$$k_{lin} = k(z = 0) \approx 72 \frac{N}{m}$$

$$\omega = \sqrt{\frac{k_{lin}}{m}} \approx 3.4\ Hz$$

Tuttavia, l'utilizzo nel modello MATLAB/Simulink della relazione esponenziale per calcolare anche i valori della rigidezza per gli spostamenti positivi del magnete mobile, di cui non si possiedono dati sperimentali, porta ad una descrizione inaccurata del comportamento reale in esercizio dell'energy harvester.

La rigidezza così ottenuta presenta valori troppo bassi quando il magnete mobile si allontana dal magnete fisso oltre la posizione di equilibrio. Questo effetto è evidenziato dall'ottenimento di picchi di risonanza delle grandezze di interesse a valori inferiori di frequenza rispetto a quelli sperimentali. La migliore soluzione è individuata nella scelta di una relazione polinomiale di terzo grado della rigidezza a spostamenti positivi, ipotizzandone i coefficienti, in assenza di dati sperimentali, per prova ed errore al fine di trovare una corrispondenza tra la frequenza di risonanza numerica e sperimentale.

L'espressione finale della rigidezza della sospensione magnetica, riportata in *Figura 15*, è la seguente:

$$k(z) = -bae^{-bz} \quad z \leq 0$$

$$k(z) = p_1 z^3 + p_2 z^2 + p_3 z + p_4 \quad z > 0$$

I valori dei coefficienti numerici ottenuti per interpolazione sono:

- $a = 0.53$
- $b = -137.9$
- $p_1 = 6.387 * 10^4$
- $p_2 = 1.858 * 10^4$
- $p_3 = 1906$
- $p_4 = 71.71$

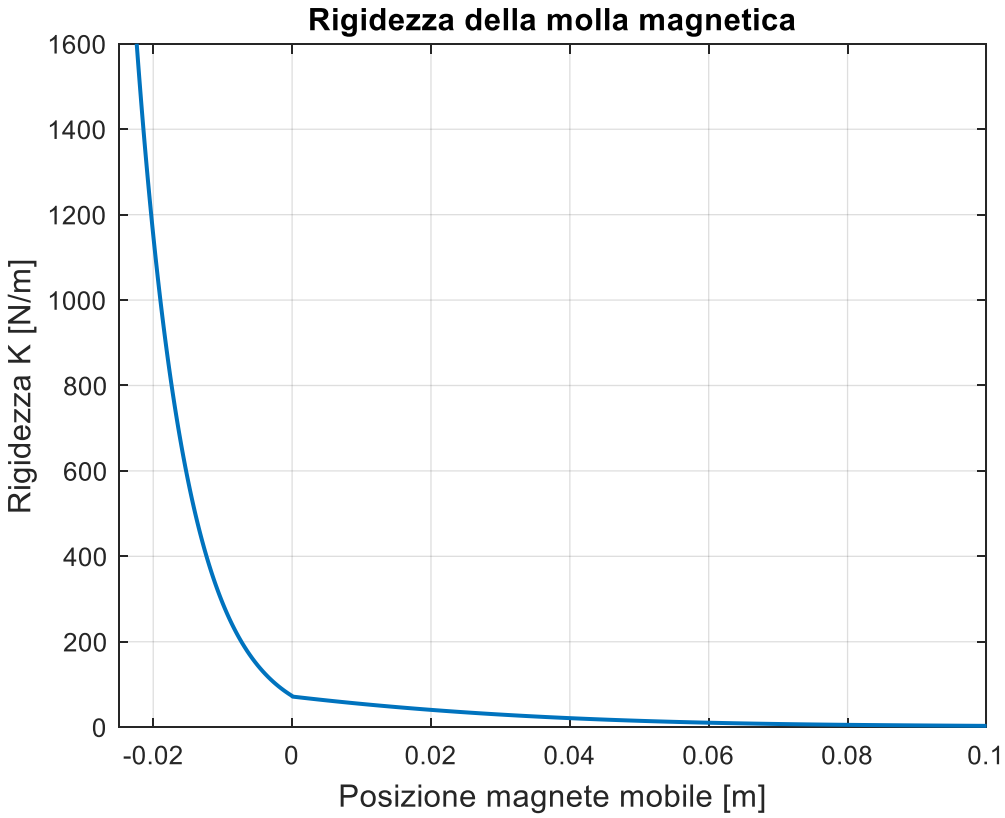

Figura 15. Modello numerico della rigidezza magnetica

2.2.2. *Modello dello smorzamento meccanico*

L'azione meccanica dell'aria e l'attrito tra la superficie interna del tubo e il magnete mobile durante l'oscillazione contribuiscono alla definizione dello smorzamento meccanico di tipo viscoso. Il fattore di smorzamento è valutato sperimentalmente eccitando l'harvester con un input a gradino sul banco prova per i test dinamici. L'andamento nel tempo del voltaggio generato in uscita può essere processato valutandone il decremento logaritmico per ricavare il fattore di smorzamento. Dalle prove si evince un comportamento non lineare dello smorzamento viscoso dipendente dall'ampiezza dell'oscillazione del magnete mobile, poiché al diminuire della velocità di quest'ultimo il valore del fattore cresce. Questo fenomeno è da imputare ad errori di tolleranza nella superficie interna del tubo, causando una variabilità della forza d'attrito del magnete mobile durante la sua oscillazione. Il fattore di smorzamento viscoso presenta un minimo quando il magnete è in risonanza e un massimo quando oscilla intorno alla posizione di equilibrio. Per ragioni di semplicità, si introduce nella definizione del modello Simulink un fattore di smorzamento viscoso costante definito come il valore medio dei decrementi logaritmici ottenuti su diverse prove a diverse ampiezze di oscillazione del magnete. Questa semplificazione non comporta errori rilevabili nelle simulazioni del modello. Entrambi gli harvester testati EH 1 ed EH 2 hanno lo stesso tubo e magneti, per cui presentano lo stesso fattore di smorzamento viscoso medio pari a $\zeta = 0.04$.

2.2.3. *Modello elettromagnetico*

I test sperimentali sul banco di prova dinamico permettono di quantificare il voltaggio generato sul carico resistente *Rload* in diverse condizioni di funzionamento dell'energy harvester. Applicando le leggi di Kirchoff sul circuito del sistema (vedi *Figura 16*) è possibile correlare il voltaggio con la potenza elettrica in uscita sul carico, grandezza di interesse per valutare l'efficacia del dispositivo per le applicazioni a cui è indirizzato.

$$i = \frac{V_{eh}}{(R_{coil} + R_{load})}$$

$$P_{load} = V_{load} i$$

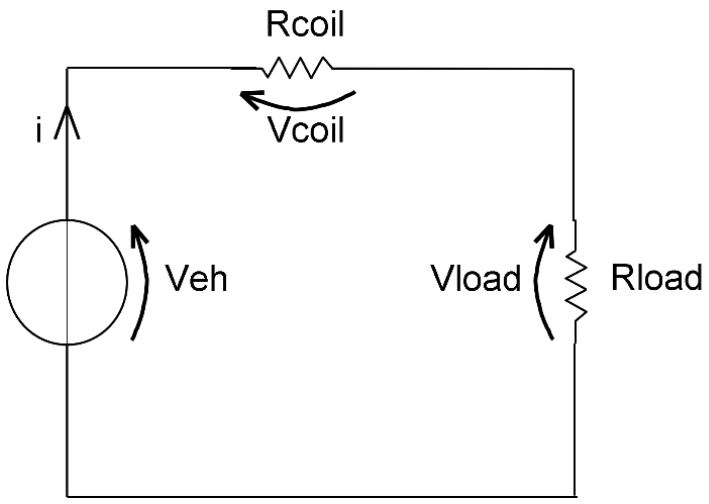

Figura 16. Schema del circuito del dispositivo

Analizzando il circuito si evince un'altra componente di smorzamento del sistema che deve essere introdotta nell'equazione del moto, considerandone la sua dipendenza dallo stato della velocità. Questa azione non lineare di tipo elettromagnetico nasce dall'induzione della corrente elettrica negli avvolgimenti del dispositivo durante l'oscillazione del magnete mobile.

$$k_{em}(z) = -\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{dz}}$$

$$V_{eh} = -\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{dt}} = -\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{dz}}\frac{dz}{dt} = k_{em}\,\dot{z}(t)$$

$$c_e(z) = \frac{k_{em}^2(z)}{R_{load} + R_{coil}}$$

$$F_e = k_e(\mathrm{z}) \cdot i(t) = k_e^2(z) \cdot \frac{\dot{z}(t)}{R_{load} + R_{coil}}$$

Dove:

- k_{em} è il coefficiente di accoppiamento elettromagnetico
- $\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{dz}}$ è la derivata del flusso magnetico rispetto l'asse z
- V_{eh} è il voltaggio generato dall'harvester
- c_e è lo smorzamento elettromagnetico
- F_e è la forza elettromotrice

Il coefficiente di accoppiamento elettromagnetico k_{em} lega le variabili meccaniche ed elettriche del sistema. Considerare il coefficiente costante è un'approssimazione non trascurabile poiché il flusso magnetico concatenato con gli avvolgimenti varia nel tempo durante il moto vibratorio del magnete mobile. Inoltre, gli avvolgimenti hanno un'estensione lungo la direzione assiale z non trascurabile, conseguentemente il coefficiente presenta un ulteriore grado di libertà legato alla posizione della spira rispetto a quella del magnete mobile istante per istante. Da questa considerazione si evince che la posizione assiale degli avvolgimenti lungo il tubo è una variabile importante che necessita di un'analisi per trovarne il valore che ottimizza la potenza prodotta. Per definire i valori del coefficiente di accoppiamento elettromagnetico è necessario dapprima valutare il flusso magnetico concatenato con gli avvolgimenti. Il magnete mobile cilindrico produce due componenti principali di campo magnetico in direzione assiale e radiale che possono essere calcolate senza approssimazioni solo per via numerica. Ai fini di questo studio, trascurando le dimensioni considerevoli del magnete mobile, lo si considera come un dipolo per utilizzare la seguente efficace relazione tra il coefficiente di accoppiamento elettromagnetico e la posizione del magnete mobile istantanea [20,21]:

$$k_{em}(z) = \frac{1}{2}\frac{m\mu_o l_w}{V_c}\sum_{i,j=1}^{2}(-1)^{i+j}\left[\ln\left(r_i + \sqrt{r_i^2 + \left(a_j - z\right)^2}\right) - \frac{r_i}{\sqrt{r_i^2 + \left(a_j - z\right)^2}}\right]$$

$$m = \frac{1}{\mu_o}B_r V_m$$

Dove:

- l_w è la lunghezza totale degli avvolgimenti di una bobina
- V_C è il volume di una bobina
- $r_{1,2}$ sono rispettivamente il raggio interno ed esterno della bobina
- $a_{1,2}$ sono rispettivamente l'altezza del primo e dell'ultimo avvolgimento della bobina
- $\mu_o = 4\pi * 10^{-7}$ è la permeabilità magnetica del vuoto
- V_m è il volume del magnete mobile
- m è il momento di dipolo magnetico

Le *Figure 17-18* mostrano gli andamenti del coefficiente di accoppiamento elettromagnetico e dello smorzamento elettromagnetico con la posizione del magnete mobile per l'Harvester 2. La dimensione assiale e l'altezza rispetto al magnete fisso della bobina hanno un effetto diretto sul circuito in termini di traslazione delle curve lungo l'asse delle ascisse e conseguente variazione dei valori del coefficiente ad una certa posizione del magnete durante il suo moto.

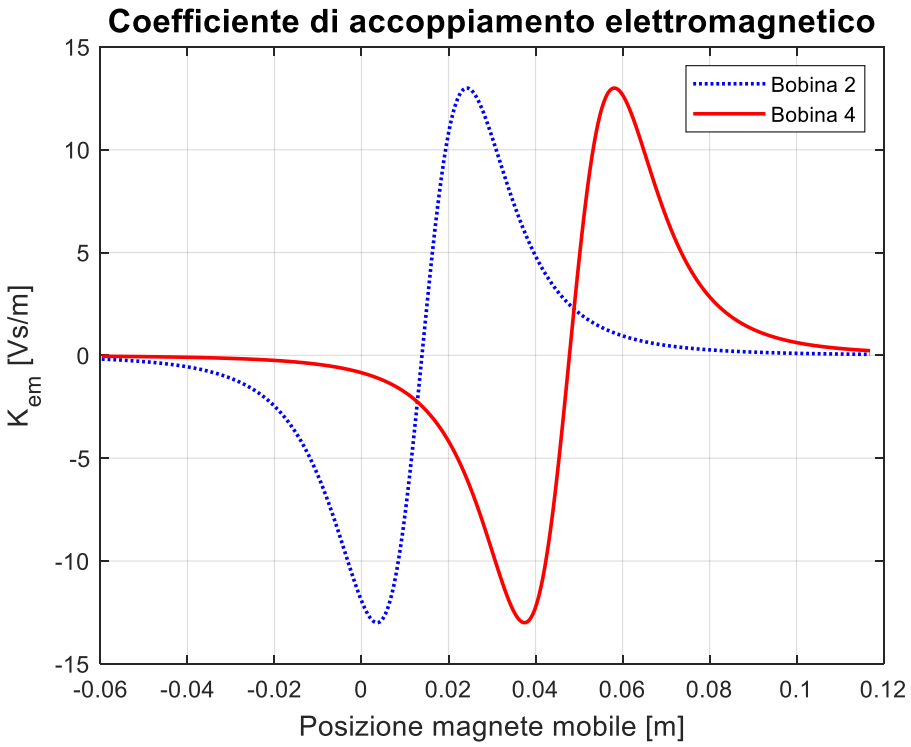

Figura 17. Relazione coefficiente di accoppiamento elettromagnetico e posizione del magnete mobile EH 2

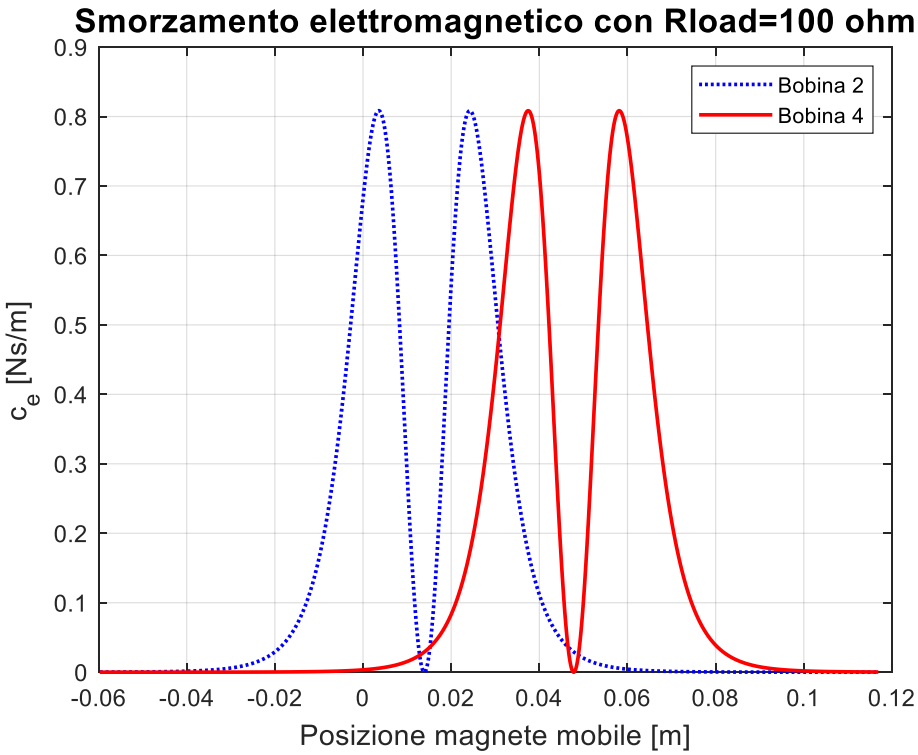

Figura 18. Relazione smorzamento elettromagnetico e posizione magnete mobile EH 2

3. Prove sperimentali

3.1. Setup sperimentale

Il banco prova per la caratterizzazione statica della sospensione magnetica è composto da un generatore DC, due sensori laser LK-G82 KEYENCE (frequenza di campionamento 50 kHz, 0.2 mm, precisione 70.05%) ed un controller di segnale LK-G. L'harvester è integrato con una trave di supporto poggiata sul magnete mobile, avente una piastra all'estremità libera per l'applicazione delle masse calibrate. La posizione di equilibrio del magnete mobile è rilevata dal laser quando la trave è libera, mentre le altre posizioni del magnete sono valutate rispetto alla posizione di equilibrio applicando quattordici masse calibrate con valori crescenti. Le misurazioni delle posizioni del magnete mobile sono effettuate su una tavola vibrante per ridurre gli effetti del rumore ambientale sui risultati sperimentali. I sensori laser sono alimentati dal generatore DC e rilevano le diverse posizioni del magnete al variare del peso delle masse calibrate applicate sulla trave. I dati misurati sono inviati al controller di segnale e ad un calcolatore per il post-processing. I test danno come risultato la caratteristica della molla magnetica in termini di relazione tra la forza magnetica e lo spostamento del magnete mobile utilizzata nel modello numerico. Nelle *Figure 19a-b* sono riportate rispettivamente una rappresentazione schematica e una fotografia del banco prova per i test statici.

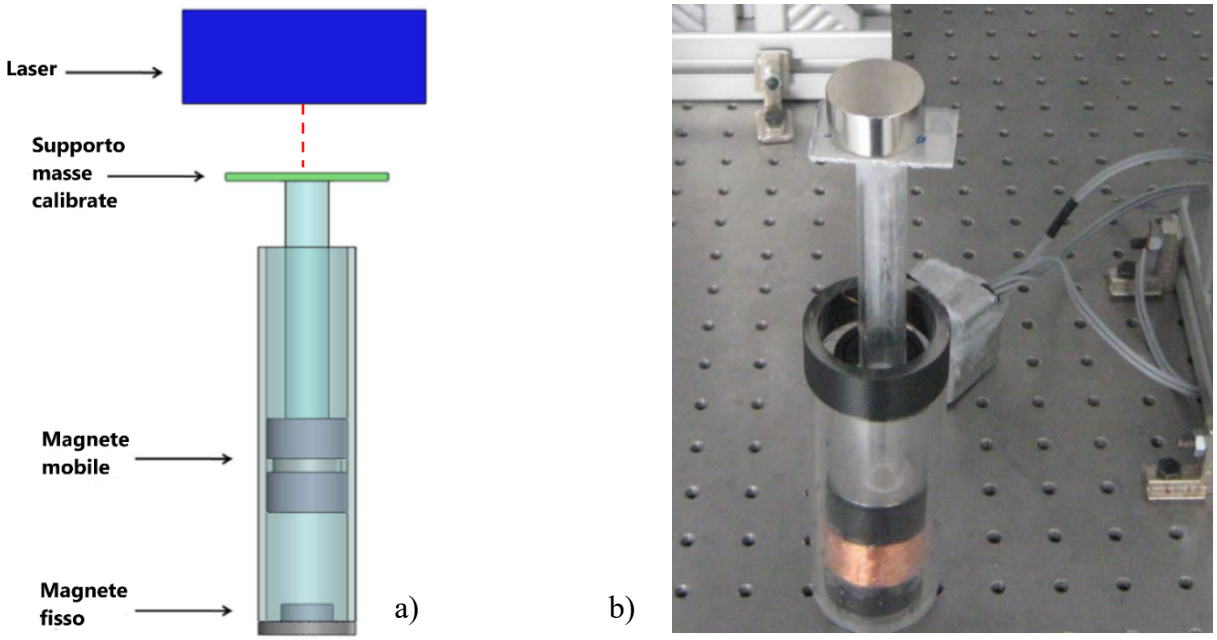

Figura 19. Schema banco prova statico (a); Fotografia banco prova statico (b)

La caratterizzazione dinamica e la misura delle performance dell'energy harvester sono condotte su un banco prova sperimentale composto da uno shaker (TIRA TV51120) con il suo amplificatore di segnale (BAA 500) a controllo variabile del gain (TIRA GmbH, Schalkau, Germany). Il software LabView (National Instruments, Austin, TX, USA) è utilizzato per fornire un segnale di input di tipo sinusoidale alla base d'eccitazione dello shaker su cui è fissato l'energy harvester tramite una piastra in materiale polimerico. Un accelerometro piezometrico IMI 608A11 (PCB Piezotronics, Depew, NY, USA) fornisce il segnale di feedback del circuito chiuso. Il DAQ legge il voltaggio generato in output dall'energy harvester sul carico resistente, il cui valore è scelto per ottimizzare la potenza elettrica. Lo schema e la rappresentazione grafica dell'apparato sperimentale per i test dinamici sono riportati rispettivamente nelle *Figure 20-21.*

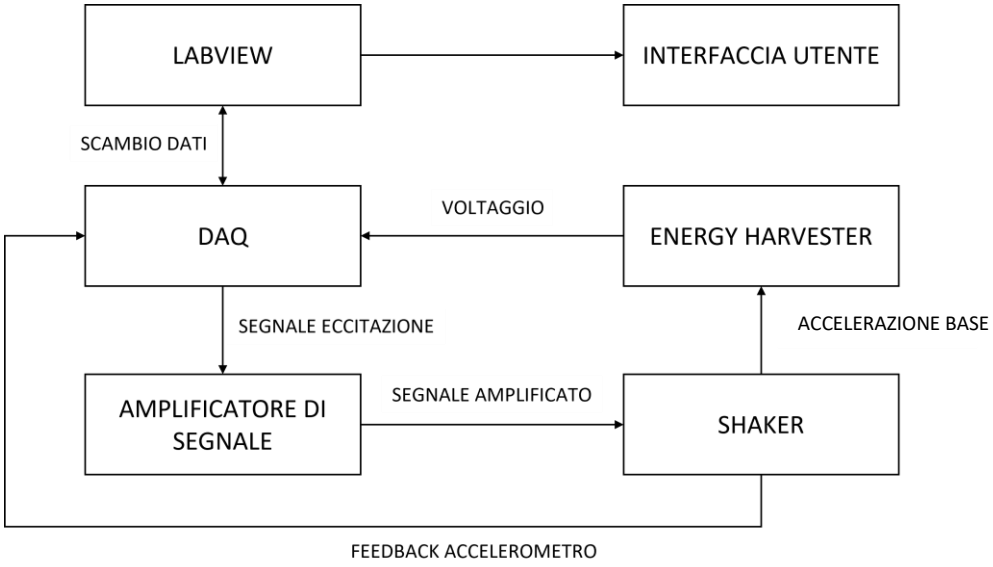

Figura 20. Schema banco prova dinamico

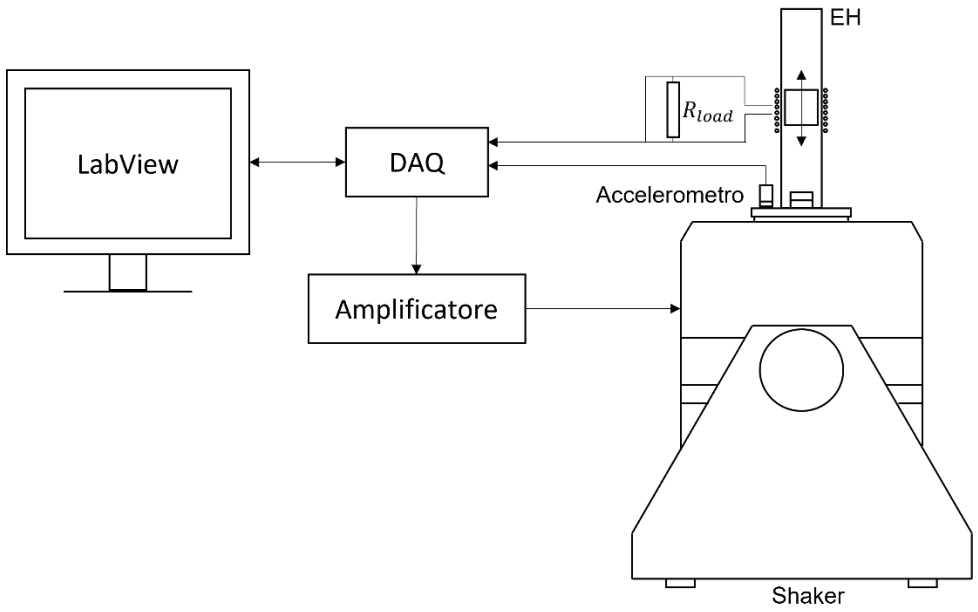

Figura 21. Rappresentazione grafica banco prova dinamico

3.2. Confronto tra prove sperimentali e modello numerico

I test sperimentali hanno l'obiettivo di caratterizzare il comportamento dinamico dell'energy harvester per validare il modello numerico proposto. L'output delle prove dinamiche è il voltaggio generato sul carico resistente, il cui valore è usato per derivare la corrente elettrica ed infine la potenza elettrica. I risultati sperimentali più rilevanti sono le funzioni di risposta in frequenza (FRF) e le prove di carico. Le FRF sono espresse in termini di RMS della potenza elettrica, calcolato usando il carico resistente di ottimo valutato tramite le prove di carico. Le FRF sono ottenute variando la frequenza dell'eccitazione sinusoidale e mantenendone l'ampiezza costante. I valori dell'ampiezza e della frequenza dell'eccitazione scelti sono quelli tipici in esercizio per applicazioni in veicoli industriali. La *Figura 22* mostra le FRF ottenute per diverse ampiezze d'eccitazione, da 0.1g a 0.4g, sulla bobina 2 degli Harvester 1 e 2, con un carico resistente di ottimo rispettivamente pari a 100 Ω e 150 Ω.

Analizzando queste curve è possibile mettere in luce il comportamento non lineare dei dispositivi e le frequenze di risonanza. Come descritto nei paragrafi precedenti, la sospensione magnetica ha una caratteristica asimmetrica poiché è presente un solo magnete mobile alla base del cilindro. La motivazione di questa scelta è legata alla densità di potenza del dispositivo. Un harvester con la stessa caratteristica della sospensione magnetica e stesso volume, ma con due magneti fissi alle due estremità del cilindro, produrrebbe una minore potenza poiché la corsa utile del magnete mobile sarebbe ridotta rispetto a quella di un harvester con un solo magnete fisso alla base. La configurazione studiata presenta un comportamento della molla di tipo "softening". Come descritto nel *Capitolo 2*, la forza magnetica decresce rapidamente all'allontanarsi del magnete mobile da quello fisso. Il risultato è il decremento della frequenza di risonanza all'aumentare dell'ampiezza di eccitazione, poiché con maggiori ampiezze di oscillazione in risonanza la forza magnetica diminuisce. Questa caratteristica genera una risposta non lineare del sistema che può essere direttamente osservata nel crollo repentino dell'ampiezza della potenza per frequenze leggermente inferiori di quella di risonanza. Inoltre, dal confronto delle FRF dei due harvester testati, si osserva che l'EH 2, avente una bobina di 435 spire, genera potenza maggiore dell'EH 1 a qualsiasi ampiezza d'eccitazione. Nel dettaglio, per un'ampiezza d'eccitazione pari a 0.4g, la massima potenza prodotta dai due dispositivi è rispettivamente 31 mW e 44 mW. I valori ottenuti per le altre ampiezze d'eccitazione testate sono riportati nella *Tabella 7*.

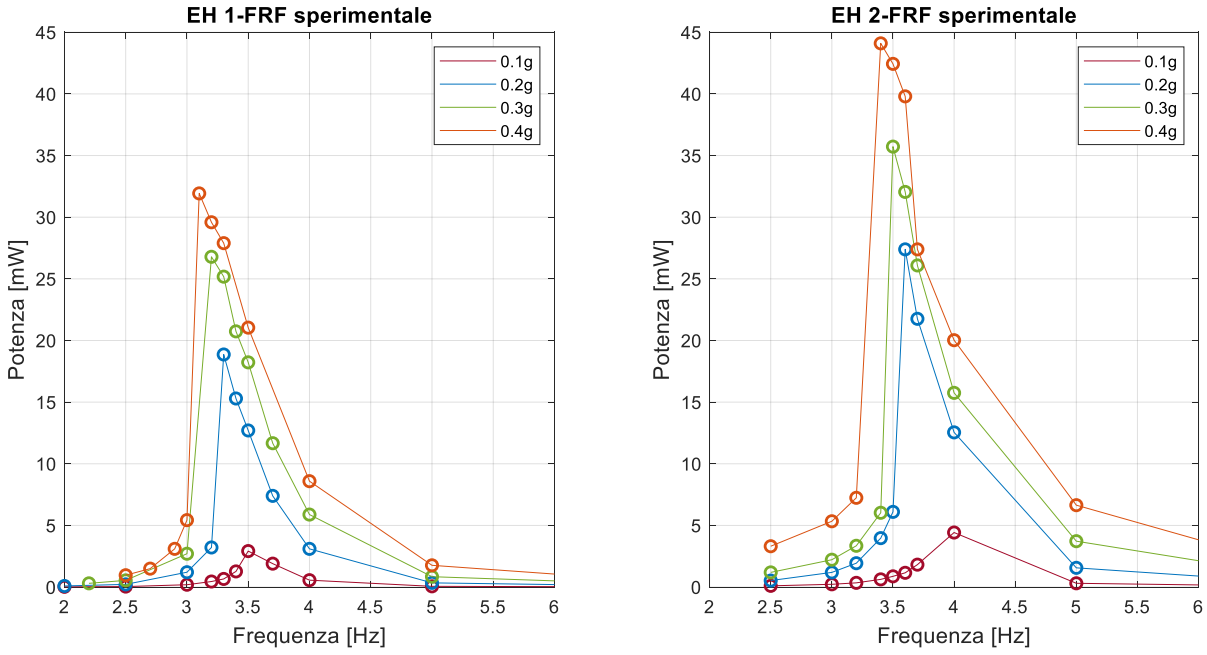

Figura 22. Confronto FRF sperimentali di EH 1 ed EH 2

Eccitazione	EH 1 [mW]	EH 2 [mW]
0.1g	2.6	4.4
0.2g	18.8	27.4
0.3g	26.7	35.7
0.4g	31.6	44.1

Tabella 7. RMS potenza generata da EH 1 ed EH 2

I risultati sperimentali ottenuti dai dispositivi testati nel banco di prova devono essere confrontati con quelli del modello numerico ottenuti dalle simulazioni dinamiche per valutarne l'efficacia. Le *Figure 23-24* mostrano le sovrapposizioni per entrambi i dispositivi studiati.

In particolare, i grafici mostrano le FRF sperimentali e numeriche per diverse ampiezze d'eccitazione, da 0.1g a 0.4g, con un carico resistente di ottimo rispettivamente pari a 100 Ω e 150 Ω. Il confronto dimostra la buona corrispondenza tra i risultati numerici e sperimentali. Sono comunque presenti delle discrepanze sulle ampiezze dei picchi di risonanza tra i risultati numerici e sperimentali, dovute all'implementazione del modello di smorzamento viscoso costante rispetto al comportamento reale non lineare del dispositivo. Questa semplificazione non genera delle inconsistenze significative, tenendo anche conto che lo scopo principale dello studio è la sintonizzazione delle frequenze di risonanza del modello e dell'energy harvester. Le differenze tra le frequenze di risonanza del modello e del dispositivo sono contenute, con il valore massimo rilevato di 0.3 Hz. Le imprecisioni possono essere il risultato di propagazione dell'errore dovuto all'implementazione del modello della rigidezza, come spiegato in *Capitolo 2*. Inoltre, i dati sperimentali rilevati sono concentrati intorno alla frequenza di 3 Hz, dove avviene la risonanza, che è il limite inferiore del range di funzionamento dello shaker del banco prova sperimentale.

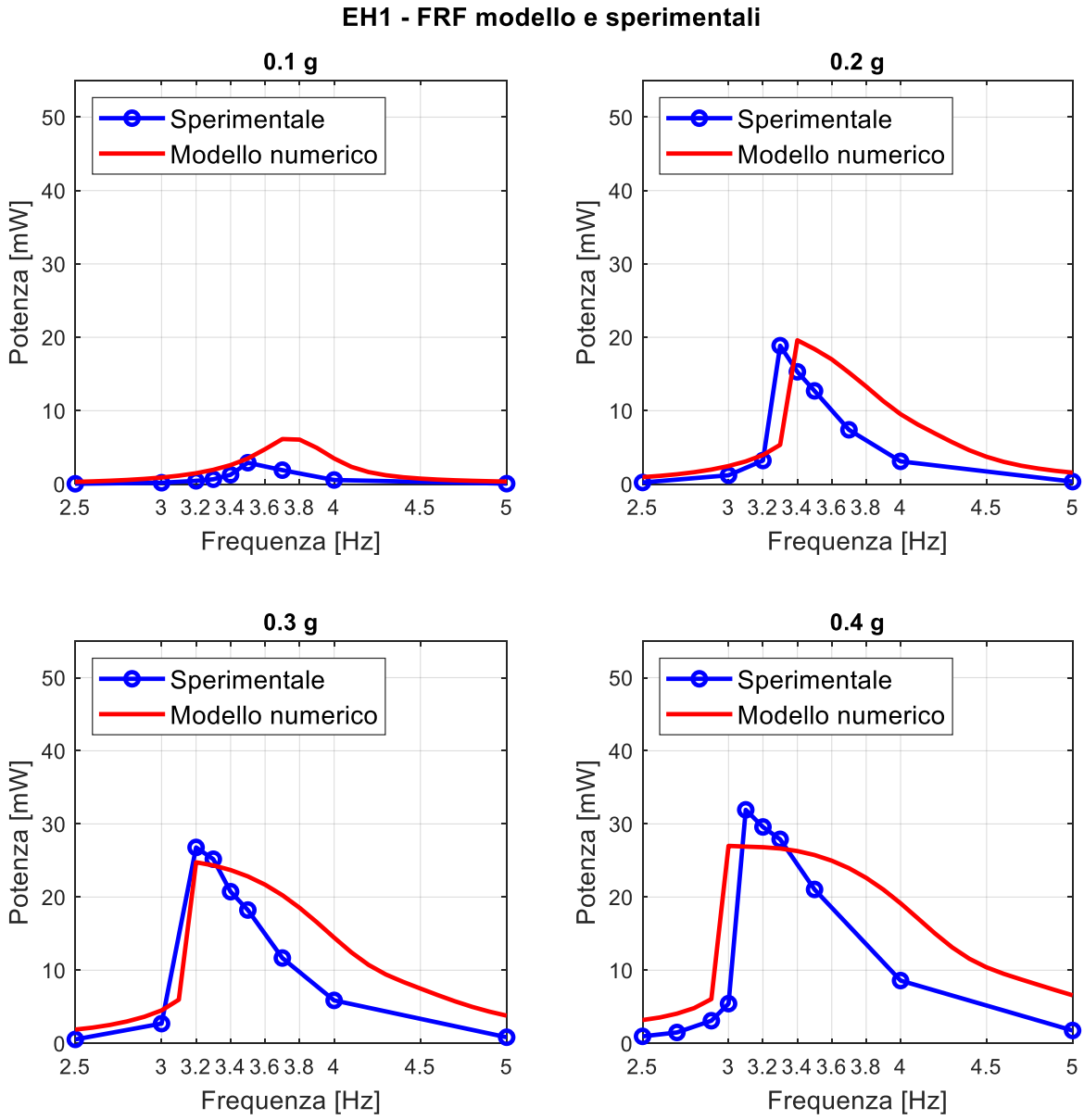

Figura 23. Confronto FRF sperimentali e modello numerico EH 1

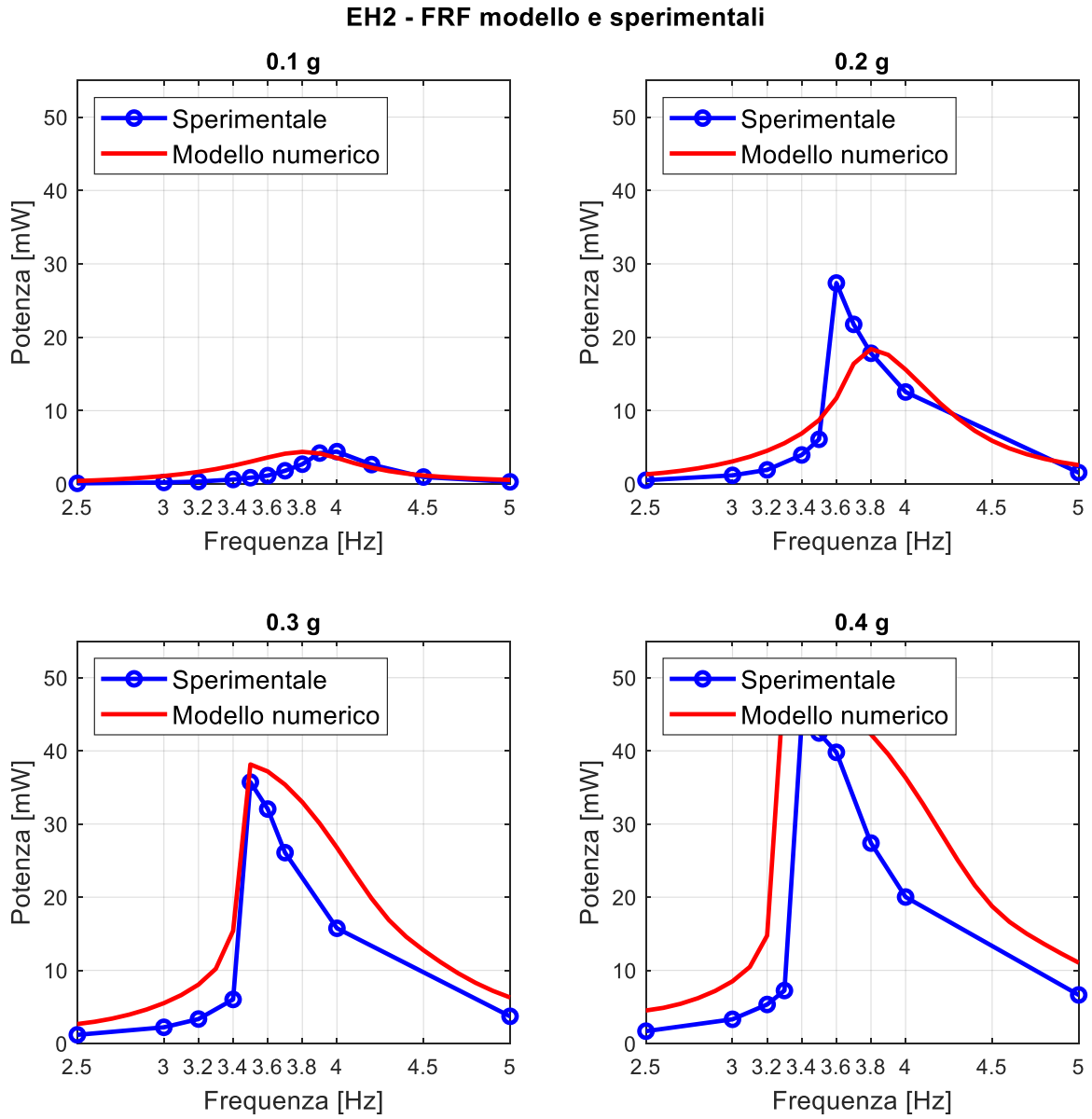

Figura 24. Confronto FRF sperimentali e modello numerico EH 2

Il carico resistente è una grandezza del circuito del dispositivo che deve essere ottimizzata in quanto ne influenza direttamente la quantità di potenza utile generabile. La variabile entra nell'espressione dello smorzamento elettromagnetico e dunque nell'equazione della corrente indotta (vedi *Paragrafo 2.2.3*). I test sul banco prova sperimentale confermano la dipendenza delle grandezze elettriche dal carico resistente e permettono di individuarne il valore di ottimo. Ridurre lo smorzamento elettromagnetico è una delle possibili soluzioni per ottimizzare la potenza generata dall'energy harvester. Dalla letteratura [43,44] si apprende che questo risultato è ottenibile in modelli lineari uguagliando la resistenza del carico con quella degli avvolgimenti del dispositivo. Tramite test su energy harvester con diversi numeri di avvolgimenti, questa relazione è messa in luce anche nel modello non lineare di questo lavoro con una certa approssimazione. In ciascuna delle soluzioni studiate, il valore di ottimo della resistenza del carico si avvicina molto a quello della resistenza degli avvolgimenti (vedi *Tabella 8*). I risultati del modello numerico si sovrappongono correttamente a quelli sperimentali in termini di voltaggio, corrente e potenza, come mostrano i grafici nelle *Figure 25-26* per la bobina 2 degli harvester 1 e 2, con un'ampiezza di eccitazione pari a 0.2g alla frequenza di risonanza propria.

Dalle analisi su modelli lineari in letteratura si apprende inoltre che il valore ottimo di potenza utile si ottiene facendo tendere le due componenti di smorzamento allo stesso valore. Di conseguenza, ai fini dell'ottimizzazione del dispositivo per sviluppi futuri, è importante considerare come variabile anche lo smorzamento viscoso in relazione a quello elettromagnetico. La progettazione corretta di questi dispositivi è ardua poiché presentano svariati gradi di libertà che sono interdipendenti per l'accoppiamento tra la parte meccanica ed elettrica.

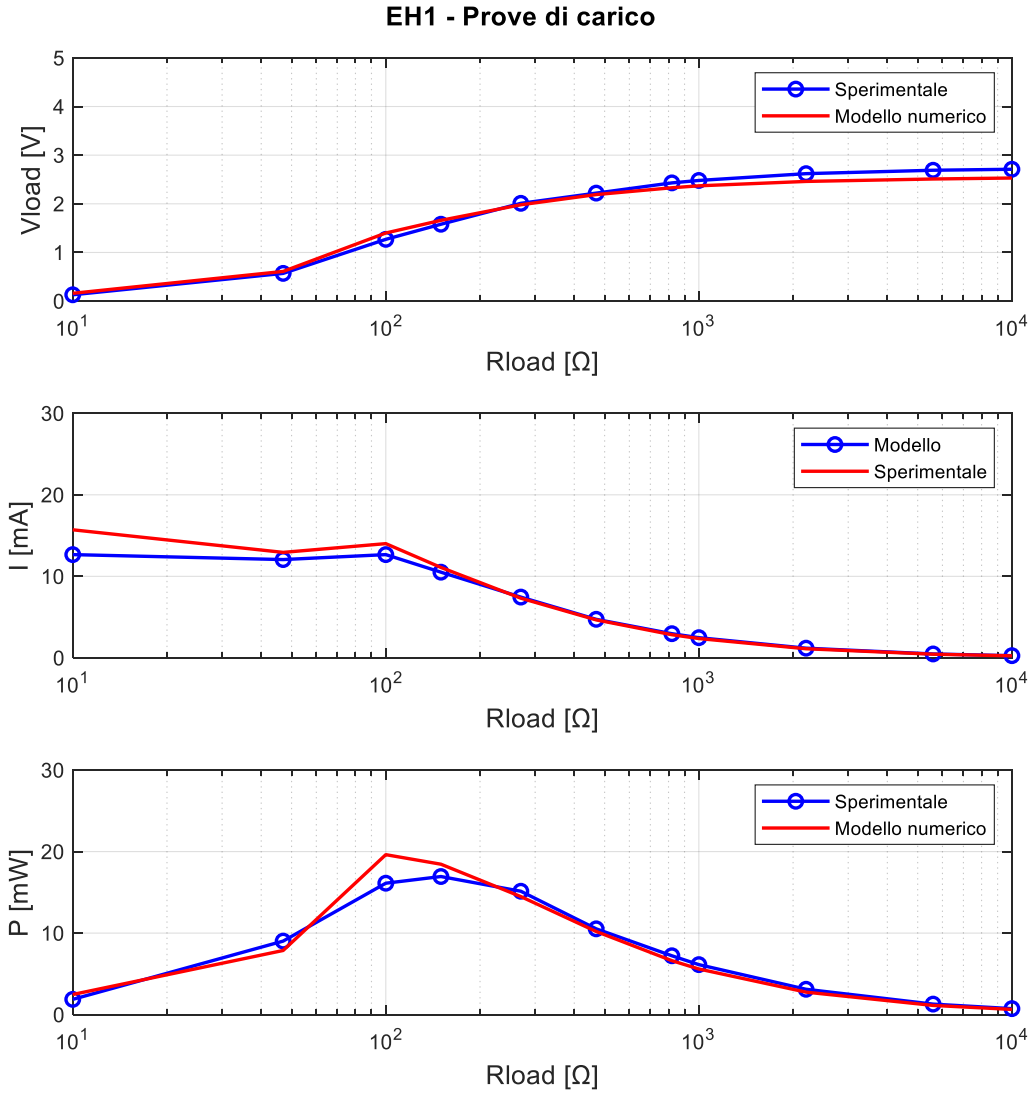

Figura 25. Prove di carico EH 1

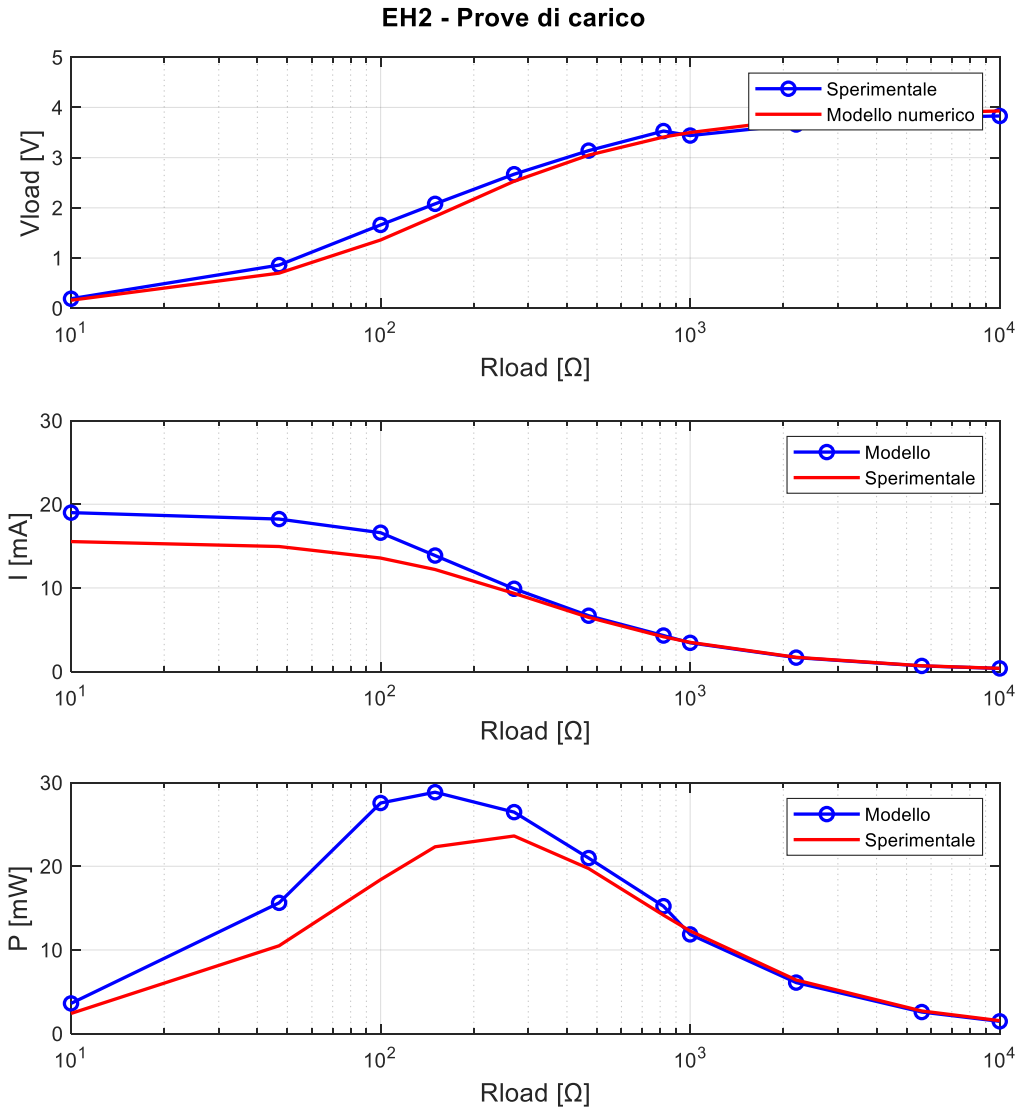

Figura 26. Prove di carico EH 2

L'ottimizzazione della potenza elettrica richiede, inoltre, la progettazione delle bobine in termini di numero di avvolgimenti e di posizione lungo il tubo. Queste due variabili influenzano direttamente l'entità del flusso magnetico concatenato variabile prodotto dal magnete mobile durante la sua oscillazione. Allo scopo di individuare un trend nei dati sperimentali, si effettuano diversi test variando la posizione della bobina lungo il tubo e il numero di avvolgimenti e confrontando la potenza generata in condizioni di risonanza nelle diverse configurazioni (vedi *Tabella 8*). I test per valutare l'influenza della posizione della bobina si effettuano sullo stesso tipo di harvester, con un'ampiezza di eccitazione fissata a 0.3g, numero di avvolgimenti e, di conseguenza, resistenza della bobina costante e carico resistente ottimizzato. I risultati di queste prove sperimentali mostrano il massimo della potenza generata per la bobina 2, la cui posizione assiale lungo il tubo è molto vicina a quella di equilibrio del magnete mobile (vedi *Figura 27*).

N_{turns}	R_{coil} [Ω]	Ottimo R_{load} [Ω]	Ottimo potenza 0.2g [mW]
280	70	100	18.8
435	110	150	27.4
550	140	180	28.6
870	220	270	15.8

Tabella 8. Effetto del numero di avvolgimenti sulla potenza generata con ampiezza d'eccitazione 0.2g

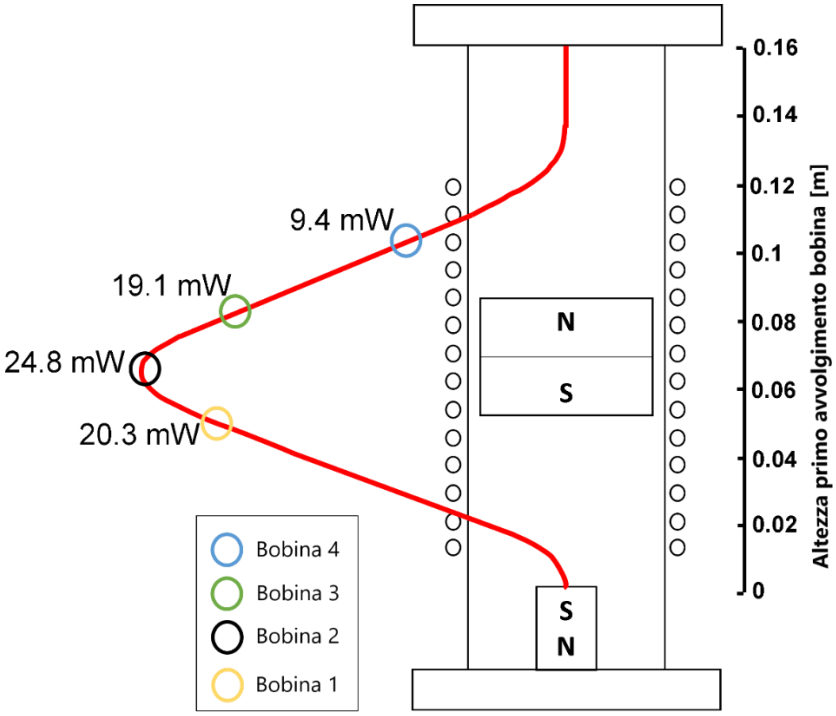

Figura 27. Relazione tra potenza in risonanza e posizione assiale della bobina

Le prove sperimentali per la valutazione dell'effetto del numero di avvolgimenti testano la bobina 2, localizzata assialmente nel punto di ottimo, utilizzando il carico resistente ottimizzato per ogni resistenza delle diverse bobine testate, e mantenendo l'ampiezza dell'eccitazione costante pari a 0.4g. I risultati del modello numerico si sovrappongono correttamente a quelli sperimentali. I test permettono l'individuazione dell'ottimo del numero di avvolgimenti pari a 550, con corrispondente resistenza della bobina $R_{coil} = 140\ \Omega$. Collegando la bobina 2 con 550 spire, con carico resistente ottimizzato $R_{load} = 180\ \Omega$, sotto eccitazione alla frequenza di risonanza di 3.3 Hz e di ampiezza 0.4g, la potenza estratta è la più alta ottenuta dai test sperimentali ed è pari a 46 mW, Il grafico in *Figura 28* esprime la relazione tra la potenza estratta in risonanza e il numero di avvolgimenti della bobina.

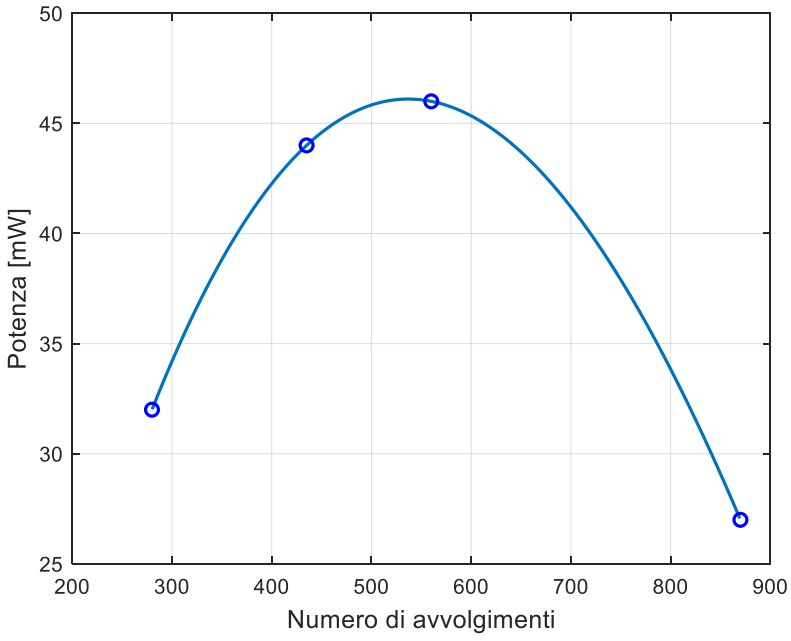

Figura 28. Relazione tra potenza in risonanza e numero di avvolgimenti della bobina

3.3. Discussione dei risultati

L'attività di caratterizzazione sperimentale del comportamento dinamico dell'energy harvester mostra risultati molto promettenti in termini di potenza utile estraibile ed efficienza della conversione energetica. In letteratura è possibile trovare svariate soluzioni per la progettazione di energy harvester elettromagnetici, una delle quali è presentata in questo studio. Le applicazioni di questi dispositivi sono vaste, di conseguenza sono molteplici le configurazioni possibili e le potenze utili generate. In *Tabella 9* è possibile visualizzare un confronto tra i risultati di diversi energy harvester in letteratura simili al dispositivo descritto in questo lavoro. I termini di paragone scelti sono la densità di potenza (PD), che corrisponde al rapporto tra la potenza utile e il volume del dispositivo, e la densità di potenza normalizzata (NPD), pari al rapporto tra la PD e il quadrato dell'ampiezza dell'eccitazione. La NPD permette un confronto più efficace delle prestazioni degli energy harvester, in quanto tiene conto anche dell'ampiezza dell'eccitazione a cui viene prodotta la determinata potenza. Il dispositivo testato genera una delle maggiori potenze utili alle frequenze più basse tra le soluzioni confrontate. La NPD ottenuta è di 1.44 $\mathrm{mW/cm^3g^2}$ ed attesta un buon risultato perché il dispositivo genera una buona potenza nonostante la bassa frequenza di risonanza di 3.4 Hz. Questa caratteristica di funzionamento deve essere sottolineata poiché una frequenza di risonanza bassa è fondamentale per le applicazioni industriali a cui è destinato il dispositivo, come quella nel campo ferroviario.

Data di pubblicazione	**Rif.**	**RMS Pot. [mW]**	**Freq. [Hz]**	**Amp. [g]**	**Vol. [cm^3]**	**PD [mW/cm^3]**	**NPD [mW/cm^3g^2]**
2007	[24]	90	37.0	2	150	0.600	0.5
2011	[25]	1.18	9.0	1.6	7.4	0.159	0.06
2013	[26]	4.48	6.0	0.5	9.05	0.495	2.14
2014	[22]	0.41	6.7	0.1	7.7	0.053	5.3
2015	[27]	2.15	5.17	2.06	6.47	0.33	0.078
2016	[28]	2.06	11.50	0.4	8.12	0.25	1.58
2018	[29]	20.6	5.0	6	6.77	3.04	0.08
2021	Questo lavoro	44.1	3.4	0.4	191	0.23	1.44

Tabella 9. Confronto NPD tra dispositivi in letteratura

La principale problematica del dispositivo studiato sono le sue dimensioni che devono essere ottimizzate per renderle consone alle applicazioni IoT. Futuri studi potranno riguardare le strategie di amplificazione della larghezza di banda delle frequenze e la sintonizzazione attiva della risonanza per migliorare l'efficienza globale del dispositivo.

L'analisi dell'harvester e i buoni risultati ottenuti derivano da una semplificazione sull'input del sistema considerato sinusoidale ad ampiezza e frequenza costanti nel tempo. Il dispositivo in esercizio in applicazioni industriali viene eccitato da un segnale randomico di cui devono essere studiate la PSD e le frequenze fondamentali. Inoltre, il valore di potenza utile deve essere confrontato con il duty cycle del sistema per poterne valutare l'effettiva applicabilità e capacità di alimentare una rete di sensori. Nel capitolo successivo è valutata la potenza generata da un prototipo di energy harvester in esercizio in un'applicazione ferroviaria e il suo duty cycle.

4. Caso studio: energy harvester e sistema di monitoraggio per treni merci

4.1. Monitoraggio del treno merci

Nella prima fase di sviluppo del prototipo di energy harvester, la ricerca è concentrata sullo studio della rigidezza e sull'ottimizzazione dei parametri caratteristici del sistema quali il carico resistente, il numero di avvolgimenti, l'altezza della bobina, le dimensioni dei magneti. I test in laboratorio sul prototipo portano dei risultati ideali in quanto ottenuti eccitando il sistema con una funzione sinusoidale di ampiezza e frequenza costanti nel tempo. Il sistema è destinato ad applicazioni in ambito ferroviario in cui le eccitazioni vibrazionali dal contatto ruota-rotaia sono variabili nel tempo e, di conseguenza, lo è anche la potenza generata. La seconda fase di progetto dell'harvester consiste nel simulare il comportamento in un ambiente reale a partire da un set di dati raccolti durante il funzionamento di un prototipo. Il gruppo di ricerca del DIMEAS ha sviluppato un prototipo di un sistema di monitoraggio montato sul vagone di un treno merci intermodale capace di raccogliere dati sui seguenti parametri: localizzazione, accelerazioni, temperatura, pressione dei freni. [fonte Aimar Somà study and results of..] In *Figura 29* è riportato uno schema del funzionamento del sistema di monitoraggio comprensivo dei sensori installati. L'obiettivo di questo studio è la raccolta dei dati sull'accelerazione verticale per valutare la potenza che l'energy harvester produrrebbe se fosse montato a bordo e se fosse adeguata ad alimentare il sistema di monitoraggio.

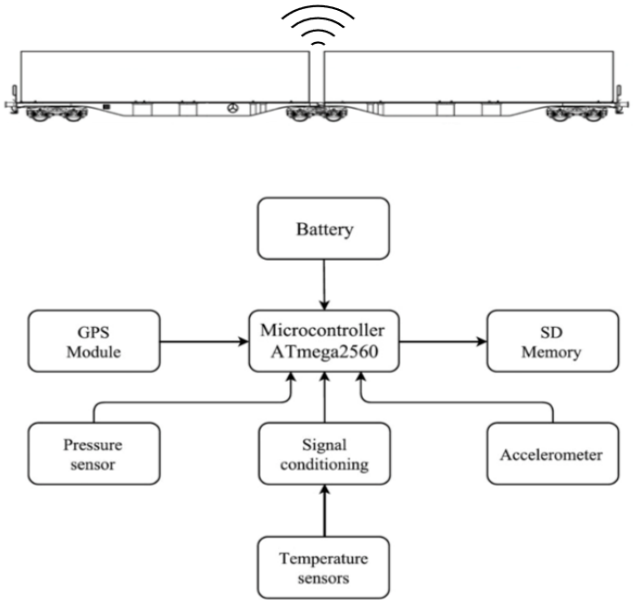

Figura 29. Schema di funzionamento del sistema di monitoraggio studiato

I dati sono raccolti dal sistema con una frequenza di campionamento di 200 Hz durante una giornata di esercizio del treno merci e memorizzati su una SD in file di testo. Dopo un filtraggio e post processing del set di dati è possibile ricavare diverse informazioni sul veicolo come la localizzazione real time (in termini di longitudine, latitudine e altitudine) per conoscere il percorso, la velocità istantanea e la temperatura a bordo. Queste informazioni possono essere plottate in maniera efficace tramite delle "heatmap" ovvero grafici che riportano l'andamento di una variabile tramite una scala graduata a colori. Il sistema di monitoraggio permette solamente la rilevazione della latitudine e longitudine del treno, mentre l'altitudine è ottenuta per interpolazione di quest'ultime utilizzando un software online chiamato "GPS Visualizer". In *Figura 30* sono riportate delle heatmap da dati ottenuti nella giornata del 9 agosto 2020 tra le 9:00 e le 14:00 in cui si valuta l'andamento durante il percorso dal treno dell'altitudine, velocità e della temperatura a bordo.

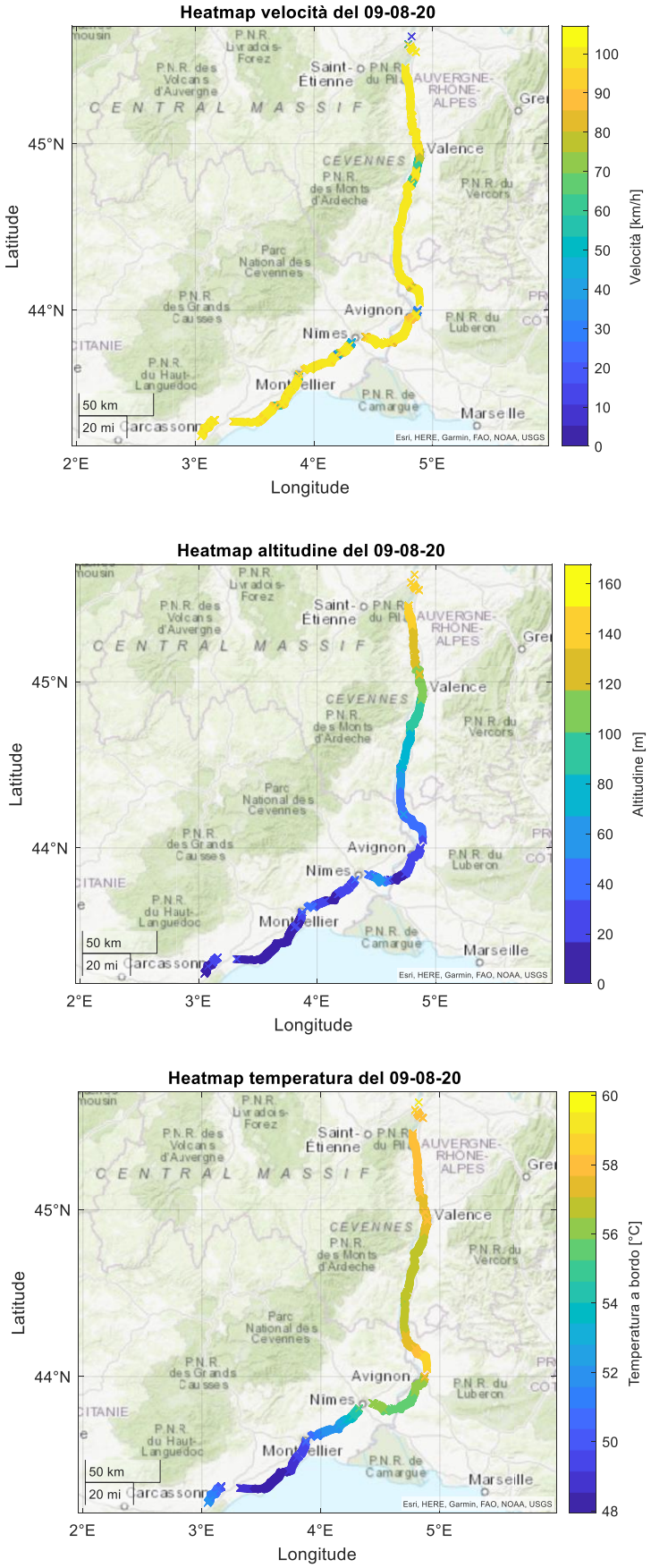

Figura 30. Heatmap velocità-altitudine-temperatura del treno in data 09/08/20

Le informazioni sulla velocità possono essere ricavate dalla localizzazione e il relativo istante temporale di rilevazione del dato. Dalla heatmap sopra riportata si evince che la velocità del treno si mantiene pressochè costante ad un valore pari a 100 km/h per tutto il percorso, tranne per qualche fermata o sosta. Incrociando i valori della velocità istantanea del treno con quelli della temperatura rilevata a bordo è possibile valutare le condizioni del veicolo durante le frenate. In corrispondenza delle decelerazioni si possono evidenziare dei picchi di temperatura ed eventuali anomalie dell'impianto freni dovute a surriscaldamenti. Per effettuare questa valutazione è comunque importante considerare l'intervallo temporale delle frenate e l'altitudine del treno. Ad esempio, le frenate possono essere in corrispondenza di stazioni, soste prolungate oppure dovute a tratti del percorso in discesa. La durata delle fermate lungo il percorso può essere ottenuta incrociando i dati del GPS con i rispettivi valori temporali. Inoltre, bisogna tenere in considerazione i fattori ambientali che influenzano le rilevazioni della temperatura. La stagione e il periodo della giornata in cui il treno è in esercizio, le condizioni meteorologiche, il lato di esposizione del veicolo al sole influenzano e complicano l'analisi. Pertanto, si ritiene necessario un corretto post processing che tenga conto di tutte queste condizioni al contorno per estrapolare delle valutazioni efficaci. Una soluzione può essere quella di valutare la differenza di temperatura tra due periodi più o meno ravvicinati per mettere in mostra i surriscaldamenti strettamente legati alle frenate, eliminando l'effetto della temperatura ambiente. In *Figura 31* sono riportati dei grafici di velocità, altitudine e temperatura rispetto alla distanza percorsa del treno ottenuti dal post processing dei dati raccolti dal sistema di monitoraggio durante la giornata del 9 agosto 2020. Durante le giornate in cui sono raccolti i dati non si notano surriscaldamenti particolari dovuti alle frenate, segno di buone condizioni del treno e di efficacia del sistema di monitoraggio.

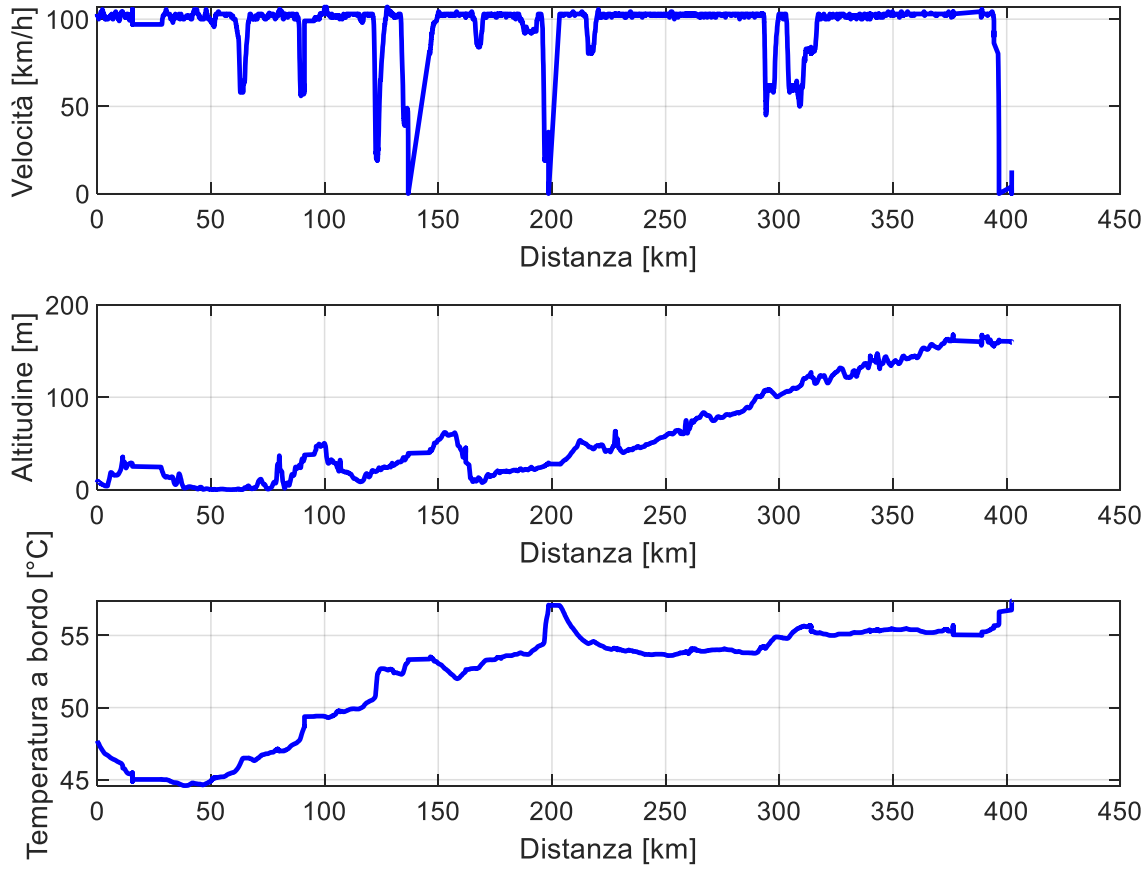

Figura 31. Grafici velocità-altitudine-temperatura rispetto alla distanza percorsa

4.2. Valutazione dell'efficienza dell'energy harvester

I dati sull'accelerazione verticale sono salvati in termini di RMS e necessitano di un filtraggio dei picchi tramite uno smooth per valutare solo quelli significativi. Per poter definire l'input del sistema e poterlo simulare nell'ambiente Matlab/Simulink è necessario ricostruire il segnale da randomico a periodico. La metodologia utilizzata è quella del conteggio dei cicli e del diagramma delle eccedenze. A partire dal segnale dell'accelerazione filtrato ottenuto da una giornata d'esercizio si rilevano i picchi e si attribuiscono a dei range di ampiezza scelta opportunamente per visualizzare un buon risultato. Di conseguenza, si ottiene una matrice di due colonne in cui, per ogni range dell'accelerazione scelto, è presente il corrispondente numero di cicli per cui il sistema viene eccitato a quella determinata ampiezza. Da queste informazioni è possibile costruire il diagramma delle eccedenze tagliando opportunamente i cicli conteggiati ad ampiezze troppo basse in quanto sono plausibilmente legati alla rumorosità del segnale. Si eliminano anche i valori ad ampiezze troppo alte che insistono per uno o un minor numero di cicli poiché possono essere degli shock non attribuibili al normale funzionamento del sistema. Poiché il periodo d'esercizio e il percorso del treno merci sono variabili nelle diverse giornate, il numero totale di cicli che viene conteggiato è generalmente differente. Al fine di uniformare la valutazione dell'input del sistema, il numero di cicli nel diagramma delle eccedenze è valutato in maniera percentuale rispetto al numero totale degli stessi.

In questo modo si può definire un periodo di funzionamento generico del treno, ad esempio un'ora, di cui si conoscono gli intervalli temporali in percentuale per cui il sistema è sottoposto ad una determinata ampiezza d'eccitazione. A questo punto è immediato poter definire il segnale composto da sinusoidi di ampiezze costanti a tratti e ordinati in modo decrescente. Le frequenze principali delle eccitazioni verticali sul vagone del treno dove è montato l'energy harvester sono basse, solitamente tra 1 e 5 Hz. In prima istanza, il segnale ricostruito è definito con una frequenza di 3.5 Hz, ovvero quella di risonanza del generatore per porsi nella condizione di ottimo. In *Figura 32* sono riportati i grafici del diagramma delle eccedenze e del segnale ricostruito a 3.5 Hz per la giornata del 9 agosto 2020.

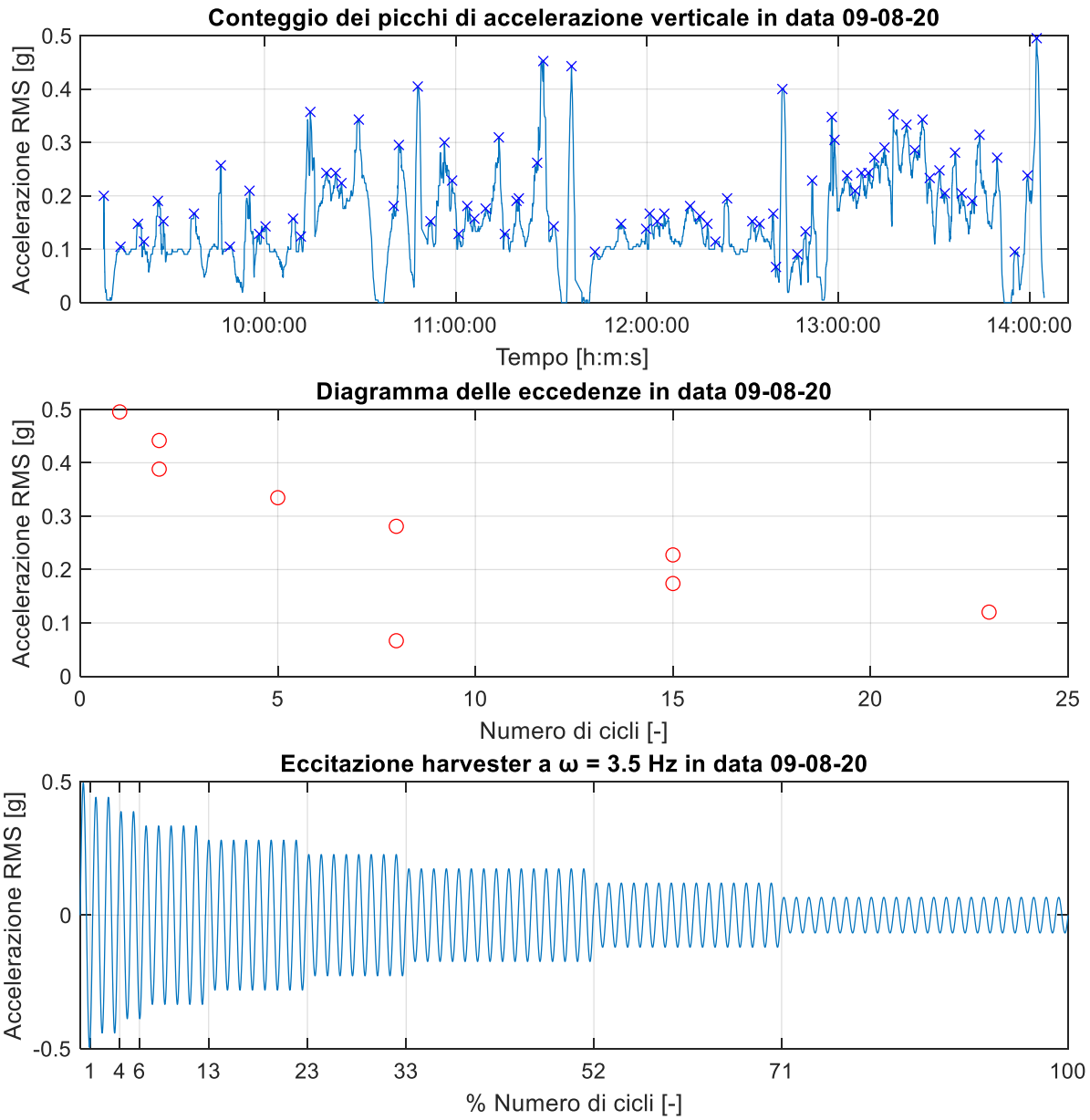

Figura 32. Metodo di conteggio dei cicli e costruzione del segnale di eccitazione

Il segnale periodico di input è modellato in ambiente Simulink come una serie di blocchi Sine Wave condizionati, attivati uno alla volta durante la simulazione per diversi periodi temporali secondo il diagramma delle eccedenze. La restante parte del modello del comportamento dinamico dell'energy harvester è la stessa mostrata in *Figura 13*. Le simulazioni permettono di valutare in output le grandezze elettriche generate dal sistema sotto il carico reale variabile nel tempo e, dunque, l'efficienza dell'harvester in condizioni diverse da quelle ideali. In *Figura 33* sono riportati gli andamenti nel tempo delle potenze ottenuti dalle nuove simulazioni per le diverse giornate testate.

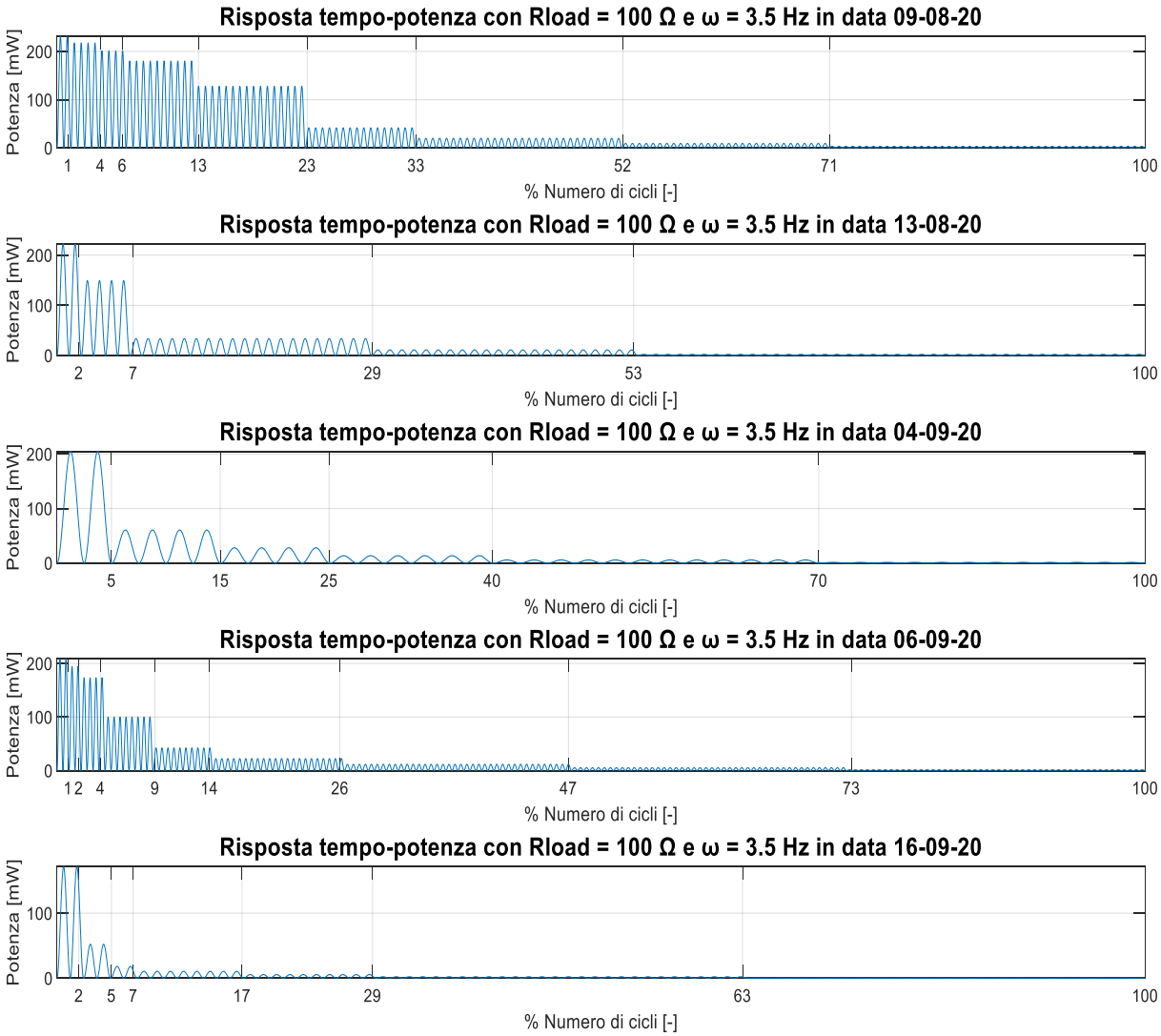

Figura 33. Potenze generate da simulazione con eccitazione reale per le diverse giornate

Dalle simulazioni precedenti nel *Capitolo 3* con input sinusoidale ad ampiezza costante pari a 0.4g e frequenza 3.5 Hz si ottiene il massimo della potenza generata dal modello matematico pari a 50 mW. Il numero di avvolgimenti, l'altezza della bobina e il carico resistente utilizzati nelle simulazioni con l'eccitazione reale sono quelli ottimali utilizzati nel caso ideale di eccitazione sinusoidale. Mettendo a rapporto il valore RMS della potenza ottenuta dal segnale periodico reale e quella ideale massima ottenuta dal segna sinusoidale è possibile ottenere un parametro di efficienza dell'energy harvester. Nella *Tabella 10* sono riportate le efficienze del generatore ottenute alla frequenza di risonanza 3.5 Hz nelle diverse giornate di funzionamento del treno valutate.

Giorno	Potenza effettiva a 3.5 Hz [mWh]	Potenza ideale [mWh]	Efficienza
09-08-20	30.5	50	61%
13-08-20	20	50	40%
04-09-20	20.4	50	41%
06-09-20	17.4	50	35%
16-09-20	10.5	50	21%

Tabella 10. Efficienza dell'energy harvester a 3.5 Hz

Un ulteriore grado di libertà che deve essere introdotto nella valutazione dell'efficienza del dispositivo è la frequenza dell'eccitazione. Dalla letteratura è noto che le eccitazioni sulla cassa hanno una frequenza bassa variabile tra 1 e 5 Hz. Ai fini dell'analisi condotta e conoscendo la risposta in frequenza del dispositivo, si è deciso di utilizzare un range di frequenze del ±30% rispetto alla frequenza di risonanza che va da 2.5 Hz a 4.5 Hz. L'efficienza del sistema è valutata sempre rispetto alla condizione ideale massima di 50 mW ottenuta a 3.5 Hz. In *Figura 34* è graficata una relazione tra l'efficienza e la frequenza d'eccitazione ottenuta interpolando i dati sperimentali medi nelle varie giornate alle diverse frequenze.

La potenza generata dall'energy harvester decresce ulteriormente spostandoci dalla frequenza di ottimo in maniera asimmetrica. Questo comportamento è un riflesso della caratteristica non lineare di tipo softening della rigidezza del sistema messo già in luce dalle FRF in *Figura 22* del capitolo 3. Spostandosi verso l'estremo inferiore del range di frequenze scelto si ha un crollo rapido dell'efficienza, mentre la diminuzione verso l'estremo superiore è più graduale.

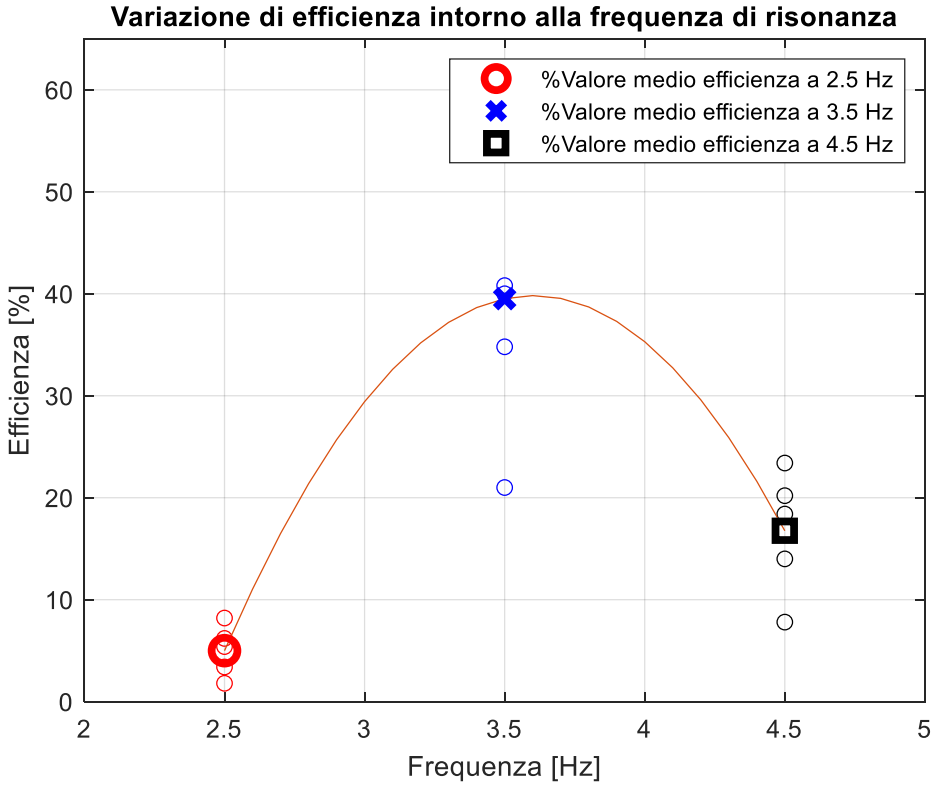

Figura 34. Variazione di efficienza con la frequenza d'eccitazione

Da questa analisi si evince la variabilità delle prestazioni del dispositivo con le caratteristiche di ampiezza e frequenza dell'eccitazione esterna randomica. Risulta, dunque, importante un corretto design dell'energy harvester per sintonizzare correttamente la frequenza di risonanza e per avere una banda della risposta in frequenza larga, così da mantenere l'efficienza del dispositivo costante e più alta possibile.

4.3. Duty cycle e il range di applicazione dell'energy harvester

Il dimensionamento del generatore deve tenere necessariamente conto dell'applicazione in cui il dispositivo lavora. Bisogna definire le caratteristiche del sistema di monitoraggio e della rete di sensori come le performance, la frequenza di campionamento e la frequenza di trasmissione dei dati. In questo modo è noto come e cosa il sistema deve misurare e ogni quanto deve inviare i dati al server. Anche se a seconda delle applicazioni specifiche possono esserci delle differenze, i sistemi autoalimentati in letteratura sono solitamente composti dai seguenti blocchi funzionali: rettificatore di corrente, batteria, uno o più sensori, trasmettitore. In *Figura 35* è presente una rappresentazione schematica dei blocchi di un sistema autonomo.

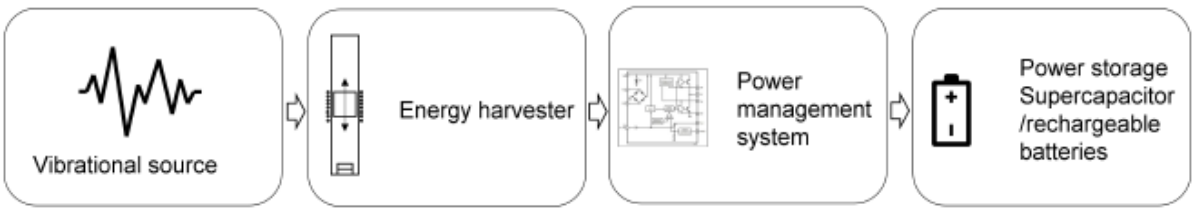

Figura 35. Schema dei blocchi di un sistema autonomo

Il normale funzionamento di questi sistemi prevede l'immagazzinamento dell'energia prodotta dagli energy harvester in batterie o supercondensatori. Questa operazione richiede la conversione della corrente alternata prodotta dal generatore in continua tramite il rettificatore ed è un'attività dispendiosa dal punto di vista dell'efficienza energetica del sistema. Nonostante ciò, è spesso necessaria per due motivazioni principali: garantire alimentazione continua anche in caso di irregolarità nella produzione di potenza da parte dell'harvester, ad esempio quando il treno è fermo; raggiungere la soglia minima di energia necessaria per poter alimentare l'utilizzatore. L'energia prodotta dall'harvester e immagazzinata nella batteria può alimentare l'utilizzatore solo quando la minima soglia di energia richiesta dallo stesso è raggiunta. Inoltre, l'intervallo di tempo in cui la potenza fluisce dalla batteria all'utilizzatore deve essere calcolato per valutare l'energia consumata nell'unità di tempo. Anche se si ricorre ad una batteria ricaricabile, il sistema rimane comunque autonomo poiché è autoalimentato dall'harvester. I vincoli di soglia e intervallo di tempo sopra menzionati sono tenuti in considerazione per la definizione del duty cycle del sistema autoalimentato. In *Figura 36* è riportato uno schema esplicativo di un duty cycle. I parametri principali sono il tempo di trasmissione dei dati (t in rosso) e il tempo operativo del sistema (T) che comprende sia il tempo di trasmissione stesso che quello di misurazione ed immagazzinamento (in giallo). In parallelo è presente il processo di harvesting (in blu) che avviene in maniera continua nel tempo.

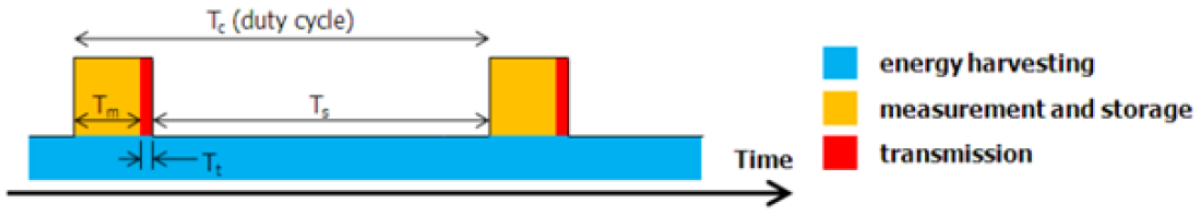

Figura 36. Rappresentazione grafica del concetto di duty cycle

Il duty cycle consiste nel rapporto t/T e permette di valutare l'effettiva applicabilità dell'harvester nell'alimentare il sistema di monitoraggio. Un generatore che produce una potenza dell'ordine di grandezza del mW deve essere installato in un sistema con un duty cycle minore di 1 per poter funzionare correttamente a lungo termine. In questo modo il sistema invia dati per un breve periodo rispetto a quello totale di funzionamento e dunque è richiesta una potenza bassa (vedi *Figura 37a*). Se in un'applicazione è richiesto al sistema di monitoraggio di inviare dati più frequentemente e con continuità, ovvero il duty cycle tende ad 1, il generatore deve produrre potenza dell'ordine del W (vedi Figura *37b*). L'informazione di primo livello sulla potenza generata dall'energy harvester, pertanto, non è sufficiente ma deve essere contestualizzata nell'applicazione di destinazione. Non è importante massimizzare la potenza in termini assoluti ma deve essere rapportata al duty cycle del sistema che il generatore deve alimentare.

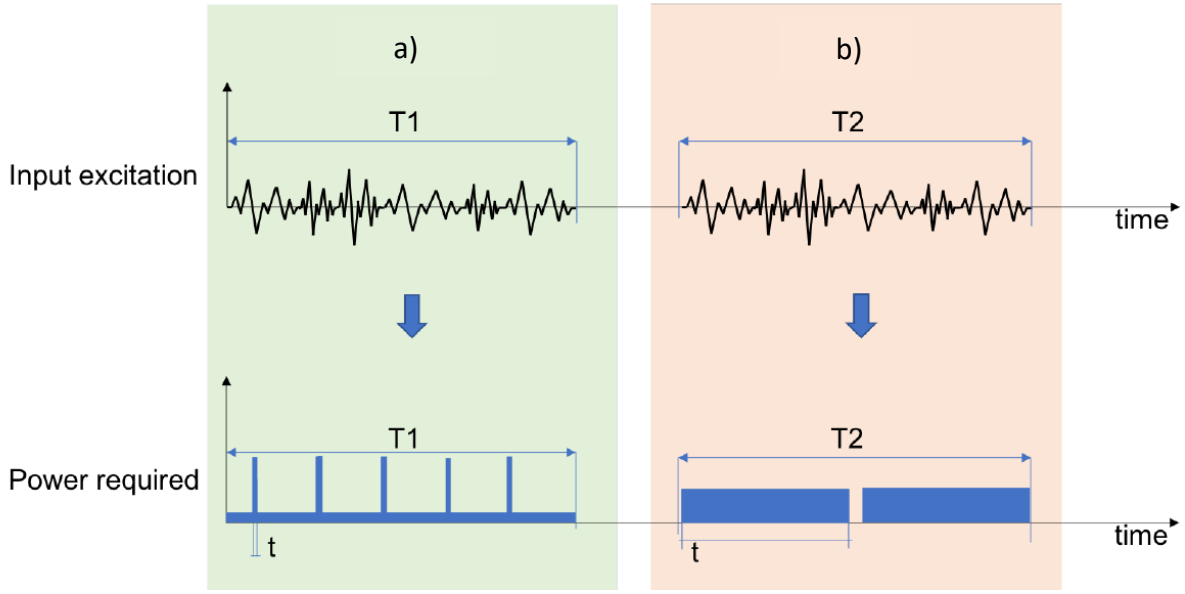

Figura 37. Sistema con duty cycle minore di 1 (a). Sistema con duty cycle tendente a 1 (b).

5. Conclusioni e sviluppi futuri

Il lavoro condotto in questo studio consiste in una prima valutazione delle performance di un dispositivo di energy harvesting elettromagnetico a levitazione magnetica. La realizzazione di un modello numerico in ambiente Matlab/Simulink per l'analisi del comportamento dinamico del dispositivo genera dei risultati compatibili con quelli osservati sperimentalmente nei test in laboratorio. L'applicazione a cui il dispositivo è destinato è l'alimentazione di sistemi di monitoraggio autonomi per treni merci. Dunque la seconda fase dello studio prevede una valutazione delle prestazioni in esercizio nell'ambiente reale. Tramite la rilevazione dei dati sperimentali da un sistema di monitoraggio sviluppato dal gruppo di ricerca del DIMEAS è possibile ricostruire analiticamente il segnale di eccitazione reale dal contatto ruota-rotaia. La potenza ipoteticamente generata dal dispositivo se montato sul vagone ha un'efficienza significativamente inferiore rispetto a quella dei test sul banco prova. La presenza di un segnale di eccitazione ad ampiezza e frequenza variabile nel tempo gioca un ruolo decisivo nella perdita delle performance dell'harvester quando non lavora nelle condizioni ottimali di risonanza. Inoltre, le dimensioni del prototipo testato in laboratorio non sono adatte al montaggio sul treno merci.

Un obiettivo importante per gli sviluppi futuri è la realizzazione di un prototipo ottimizzato dal punto di vista delle dimensioni e delle prestazioni. A questo scopo, è necessario valutare il numero di bobine e di spire, le dimensioni del cilindro, le dimensioni e le proprietà dei magneti e dunque la sospensione magnetica. Il dimensionamento è strettamente legato all'applicazione sia in termini di ingombri che in termini di banda. Una precisa rilevazione delle frequenze fondamentali d'eccitazione sulla cassa del treno merci è necessaria al fine di conoscere la banda di frequenze su cui la molla magnetica deve essere sintonizzata. Una volta noto ciò, è possibile definire le dimensioni, le masse e le proprietà dei magneti e dunque gli ingombri totali del dispositivo. La non linearità del sistema è una caratteristica importante su cui si deve lavorare più approfonditamente per aumentare la banda di funzionamento del sistema e avere una generazione di potenza sufficiente anche a frequenze lontane dalla risonanza. La generazione di una maggiore potenza è possibile aumentando la velocità del magnete tramite una riduzione dello smorzamento meccanico del sistema. Questo può essere ottenuto riprogettando opportunamente il cilindro aggiungendo dei fori lungo la superficie per evacuare l'aria interna e scegliendo un materiale opportuno. L'utilizzo di una guida centrale per il magnete mobile potrebbe facilitarne lo scorrimento nel tubo e aumentarne la velocità. Infine, si prevede lo sviluppo di un circuito elettrico completo in cui inserire il generatore per valutarne l'effettiva applicabilità in relazione al duty cycle del sistema complessivo sensorizzato.

Bibliografia

1. Russo, C., Lo Monaco, M., Fraccarollo, F., & Somà, A. Experimental and numerical characterization of a gravitational electromagnetic energy harvester. *Energies* **2021**, *14*(15).
2. Dewan, A., Ay, S. U., Karim, M. N., & Beyenal, H. Alternative power sources for remote sensors: A review. *Journal of Power Sources* **2014**, *245*, 129–143.
3. Beeby, S. P., & O'Donnell, T. *Electromagnetic Energy Harvesting*; Priya, S., Inman, D.J., Eds.; Springer: Boston, MA, USA, **2009**
4. Chalasani, S.; Conrad, J. M.; A survey of energy harvesting sources for embedded systems, Proceedings - IEEE Southeastcon, **2008**, 442–447.
5. De Pasquale, G.; Soma, A.; Zampieri, N. Design, Simulation, and Testing of Energy Harvesters With Magnetic Suspensions for the Generation of Electricity From Freight Train Vibrations *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics* **2012**, 7, 41011.
6. De Pasquale, G.; Soma, A.; Fraccarollo, F. Comparison between piezoelectric and magnetic strategies for wearable energy harvesting *Journal of Physics: Conference Series* **2013**, 476, 12097.
7. De Pasquale, G.; Soma, A.; Fraccarollo, F. Piezoelectric energy harvesting for autonomous sensors network on safety-improved railway vehicles, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: *Journal of Mechanical Engineering Science*, **2012**, 226, 1107–1117.
8. Frantz, G.; Freeman, D. Approaching the horizon of energy harvesting, Texas Instruments.
9. Roundy, S.; Wright, P.; K. Rabaey, J. A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes *Computer Communications* **2003**, 26, 1131–1144.
10. Bosso,N.; Magelli,M.; Zampieri,N. Application of low-power energy harvesting solutions in the railway field: a review *Vehicle System Dynamics* **2021** 59, 841–871.
11. Shi, H.; Liu, Z.; Mei, X. Overview of human walking induced energy harvesting technologies and its possibility for walking robotics *Energies* **2019**, 13.
12. Sneller, A.; Mann, B. On the nonlinear electromagnetic coupling between a coil and an oscillating magnet *Journal of Physics D: Applied Physics* **2010**, 43.
13. Mocera,F.; Aquilino,G.; Soma,A. NordicWalking Performance Analysis with an Integrated Monitoring System Sensors **2018** 5.
14. Donoso, G.; Ladera, C.; Martin, P. Magnet fall inside a conductive pipe: Motion and the role of the pipe wall thickness European *Journal of Physics* **2009**, 30.
15. Yuen,S.; Lee,J.; Li,W.; Leong,P. An AA-Sized Vibration-Based Microgenerator for Wireless Sensors *Pervasive Computing*, IEEE **2007** 6, 64–72.
16. Nico,V.; Boco,E.; Frizzell, R.; Punch,J. A C-battery scale energy harvester, part a: System dynamics, ASME 2015 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems, **2015**, 2, 1-10.
17. Boco,E.; Nico,V.; Frizzell, R.; Punch,J. A C-battery scale energy harvester, part b: Transducer optimization and modeling, ASME 2015 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems, **2015**,2, 1-10.
18. Bedekar,V.; Oliver,J.; Priya,S. Pen harvester for powering a pulse rate sensor *Journal of Physics D: Applied Physics* **2009** 42, 64–72.
19. Dallago,E.; Marchesi,M.; Venchi, G. Analytical Model of a Vibrating Electromagnetic Harvester Considering Nonlinear Effects, IEEE Transactions on Power Electronics, **2010**, 25, 1989–1997.

20. Lee,C.; Stamp,D.; Kapania, N. R.; Mur-Miranda, J. O. Harvesting vibration energy using nonlinear oscillations of an electromagnetic inductor *Energy Harvesting and Storage: Materials, Devices, and Applications* **2010** 7683, p. 76830.
21. Soares dos Santos, M.; Ferreira, J.; Simoes, J. et al. Magnetic levitation-based electromagnetic energy harvesting: a semi-analytical non-linear model for energy transduction. Sci Rep 6, **2016**, 18579
22. Berdy, D. F.; Valentino D.J.; Peroulis, D. Design and optimization of a magnetically sprung block magnet vibration energy harvester *Sensors and Actuators, A: Physical* **2014** 218, 69–79.
23. Beeby, S.; Torah, R.; Tudor, M.; Glynne-Jones, P.; O'Donnell, T.; Saha, C. Roy, S. Micro electromagnetic generator for vibration energy harvesting, *Journal of Micromechanics and Microengineering* **2007** 17.
24. Constantinou, P.; Mellor, P.H.; Wilcox, P. A model of a magnetically sprung vibration generator for power harvesting applications, Proceedings of IEEE International Electric Machines and Drives Conference, **2007**, 1, 725–730.
25. Foisal, A. R. M.; Lee, B. C.; Chung, G. S.Fabrication and performance optimization of an AA size electromagnetic energy harvester using magnetic spring, Proceedings of IEEE Sensors, **2011**, 1125–1128.
26. Munaz, A.; Lee, B.C.; Chung, G.S. A study of an electromagnetic energy harvester using multi-pole magnet, *Sensors and Actuators, A: Physical* **2013** 201, 134–140.
27. Halim, M. A.; Park, J. Y. A non-resonant, frequency up-converted electromagnetic energy harvester from human-body-induced vibration for hand-held smart system applications, *Journal of Applied Physics* **2014** 115.
28. Nico,V.; Boco,E.; Frizzell, R.; Punch,J. A high figure of merit vibrational energy harvester for low frequency applications, *Applied Physics Letters* **2016** 108.
29. Zhao,X.; Cai,J.; Guo, Y.; Li,C.; Wang, J.; Zheng, H. Modeling and experimental investigation of an AA-sized electromagnetic generator for harvesting energy from human motion, Smart *Materials and Structures* **2018** 27.
30. Batra, A. K., & Alomari, A. *Power Harvesting via Smart Materials*. *Power Harvesting via Smart Materials* **2017**.
31. Bernal, E., Spiryagin, M., & Cole, C. Onboard Condition Monitoring Sensors, Systems and Techniques for Freight Railway Vehicles: A Review. *IEEE Sensors Journal* **2019**, *19*(1), 4–24.
32. Hosseinkhani, A., Younesian, D., Eghbali, P., Moayedizadeh, A., & Fassih, A. Sound and vibration energy harvesting for railway applications: A review on linear and nonlinear techniques. *Energy Reports* **2021**, *7*, 852–874.
33. M. McClanachan, B. Scown, D. Roach, D. Skerman, and B. Payne, Autonomous detection of severe wagon-track interaction dynamics, in *Proc. IHHA*, Brisbane, QLD, Australia, **2001**, pp. 305–312.
34. R. S. Hartley, J. L. Swart, and J. M. Mulder, Development of an instrumented measuring wagon to monitor the performance of electronically controlled pneumatic brakes, in *Proc. IHHA*, New Delhi, India, **2013**, pp. 452–458.
35. M. Darby, E. Alvarez, J. McLeod, G. Tew, and G. Crew, The development of an instrumented wagon for continuously monitoring track condition, in *Proc. AusRAIL Plus*, Sydney, NSW, Australia, **2003**, pp. 1–7.
36. J. Donelson *et al.*, On-board condition monitoring system performance in a revenue service demonstration, in *Proc. Int. Heavy Haul Assoc. Conf. (IHHA)*, Rio de Janeiro, Brazil, **2005**, pp. 571–578.

37. M. Macucci, S. Di Pascoli, P. Marconcini, and B. Tellini, Derailment detection and data collection in freight trains, based on a wireless sensor network, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 65, no. 9, pp. 1977–1987, May **2016**.
38. Nelson, C.A., Platt, S.R., Albrecht, D., Kamarajugadda, V., Fateh, M., **2008**. Power harvesting for railroad track health monitoring using piezoelectric and inductive devices. Int. Soc. Opt. Photonics 69280.
39. Perez, M., Chesné, S., Jean-Mistral, C., Billon, K., Augez, R., Clerc, C., **2020**. A two degree-of-freedom linear vibration energy harvester for train applications. Mech. Syst. Signal Process. 140, 106657.
40. Nexxiot. https://nexxiot.com/products/globehopper-crossmodal/
41. Perpetuum. https://perpetuum.com/rail-applications/
42. Wu, X., Qi, L., Zhang, T., Zhang, Z., Yuan, Y., & Liu, Y. A novel kinetic energy harvester using vibration rectification mechanism for self-powered applications in railway. *Energy Conversion and Management* **2021**, *228*(August 2020), 113720.
43. Williams, C.B.; Yates, R.B. Analysis of a micro-electric generator for microsystems. Sens. Actuators A **1996**, 52, 8−11.
44. Stephen, N.G. On energy harvesting from ambient vibration. J. Sound Vib. **2006**, 293, 409−425