

POLITECNICO DI TORINO

Ingegneria Elettrica



Politecnico
di Torino

Tesi di laurea magistrale

PROGETTAZIONE DI UNO "SMART METER" A SERVIZIO DEL GEMELLO DIGITALE DELLA RETE TRANVIARIA TORINESE

Relatori

PIETRO COLELLA

ENRICO PONS

DOMENICO GIORDANO

MARIANNA COSTA

Candidato

MATTIA ASUNI

Luglio 2025

Sommario

Questa tesi presenta l'identificazione dei requisiti ed il progetto di un prototipo di "smart meter" che fornirà dati utili al funzionamento del gemello digitale della rete tranviaria di Torino. Il lavoro è stato svolto in collaborazione con il Gruppo Torinese Trasporti (GTT) e l'istituto nazionale di ricerca metrologica (INRIM). Dopo una revisione critica dello stato dell'arte in ambito di misura e trasmissione dati nel settore ferroviario, viene proposto un dispositivo innovativo in grado di acquisire, elaborare e trasmettere in tempo reale parametri elettrici fondamentali, come tensione, corrente ed energia, delle motrici. Il progetto ha previsto il rispetto dei principali vincoli normativi in termini di isolamento, compatibilità elettromagnetica e sicurezza elettrica, con particolare riferimento alle normative BS EN 50124, 50121 e 61373. Lo smart-meter è composto da un partitore di tensione, una sonda di corrente, una scheda di acquisizione e un'interfaccia di comunicazione LTE. Nello specifico, si è progettato e realizzato un partitore di tensione e si è provveduto a identificare i requisiti tecnici e le soluzioni già presenti sul mercato degli altri componenti. Le simulazioni e le prove condotte in laboratorio legate al partitore di tensione hanno dimostrato l'affidabilità del sistema e la qualità dei dati raccolti.

Indice

Elenco delle tabelle	VII
Elenco delle figure	VIII
Elenco degli acronimi	IX
1 Introduzione e contesto	1
1.1 La rete tranviaria torinese	1
1.1.1 Dettagli sul funzionamento e sull'alimentazione della rete tranviaria	2
1.1.2 Parco veicoli	4
1.2 Gestione energetica e ottimizzazione dei consumi	5
1.3 Manutenzione predittiva delle infrastrutture e dei veicoli	6
1.4 Il progetto PRIN 2022: DC smart grids for next generation transportation system	6
1.5 Applicazione del Digital Twin nel settore tranviario	7
1.6 Struttura della Tesi	8
2 Normative di riferimento per applicazioni ferroviarie	10
2.1 Introduzione alle normative tecniche	10
2.2 La norma BS EN 50463: Sistemi di misura dell'energia per applicazioni ferroviarie	12
2.2.1 Parte 1 – Requisiti funzionali (<i>BS EN 50463-1</i>)	12
2.2.2 Parte 2 – Interfaccia di comunicazione (<i>BS EN 50463-2</i>)	12
2.2.3 Parte 3 – Software EMS (<i>BS EN 50463-3</i>)	13
2.2.4 Parte 4 – Prove di conformità (<i>BS EN 50463-4</i>)	13
2.2.5 Parte 5 – Struttura dati e formati (<i>BS EN 50463-5</i>)	14
2.3 La norma BS EN 50124: Coordinamento dell'isolamento dello Smart Meter	15
2.3.1 Impulsi di sovratensione e protezione	16

2.4	La norma <i>BS EN 50121</i> : compatibilità elettromagnetica nei sistemi ferroviari	20
2.4.1	Parte 1 – Aspetti generali (<i>BS EN 50121-1</i>)	20
2.4.2	Parte 2 – Emissioni di tutto il sistema verso l’ambiente esterno (<i>BS EN 50121-2</i>)	21
2.4.3	Parte 3 – Emissioni e immunità del materiale rotabile (<i>BS EN 50121-3-1 e 50121-3-2</i>)	21
2.4.4	Parte 4 – Emissioni e immunità delle apparecchiature fisse (<i>BS EN 50121-4</i>)	22
2.4.5	Parte 5 – Classificazione dell’ambiente ferroviario (<i>BS EN 50121-5</i>)	22
2.4.6	Conclusione	23
2.5	La norma <i>BS EN IEC 61373</i> : Prove di vibrazione e urto per apparecchiature ferroviarie	23
2.5.1	Scopo e campo di applicazione	23
2.5.2	Categorie di montaggio	24
2.5.3	Prove di vibrazione	24
2.5.4	Prove di urto (shock test)	24
2.5.5	Criteri di accettazione	25
2.5.6	Rilevanza per la progettazione	25
2.5.7	Conclusioni	25
2.6	La norma <i>BS EN 50343:2024</i> : regole per l’installazione dei cablaggi sui rotabili	25
2.6.1	Scopo e campo di applicazione	26
2.6.2	Aggiornamenti rispetto al 2014	26
2.6.3	Materiali, dimensionamento e criteri di scelta	26
2.6.4	Requisiti meccanici e fissaggio	26
2.6.5	Compatibilità EMC e schermature	26
2.6.6	Resistenza al fuoco e marcature	27
2.6.7	Verifiche e collaudo	27
2.6.8	Implicazioni per lo smart meter tranviario	27
2.7	La norma <i>CEI EN 61180:2016</i> – Tecniche di prova ad alta tensione per apparecchiature a bassa tensione	27
2.7.1	Ambito e campo di applicazione	28
2.7.2	Terminologia e definizioni	28
2.7.3	Requisiti generali per i test	28
2.7.4	Generazione e misura delle tensioni di prova	28
2.7.5	Procedure di prova: tipo e routine	29
2.7.6	Misurazione e incertezza	29
2.7.7	Attrezzature conformi	29
2.7.8	Criteri di accettazione	29

2.7.9	Applicazioni pratiche per lo smart meter	30
2.8	Analisi normativa preliminare e approccio sperimentale	30
3	Stato dell'arte dei sistemi di misura tranviari	32
3.1	Introduzione	32
3.2	Evoluzione dei sistemi di misura	32
3.3	Applicazione in ambito ferroviario	33
3.4	Limiti delle soluzioni esistenti: assenza di veri <i>Smart Meter</i> per l'ambito ferroviario	33
3.4.1	Funzionalità limitate all'ambito contabile	33
3.4.2	Assenza di capacità evolute di misura e controllo	34
3.4.3	Barriere normative e progettuali	35
3.4.4	Motivazione allo sviluppo di una soluzione dedicata	35
3.5	Confronto tra Energy Meter Tradizionale e Smart Meter Ferroviario	35
3.6	Conclusioni	38
4	Progettazione del Dispositivo Smart Meter	39
4.1	Introduzione	39
4.2	Scelta dei veicoli di riferimento: Serie 5000 e 6000 GTT	40
4.3	Vincoli di progetto	40
4.4	Posizionamento dello Smart Meter nella serie 6000	41
4.5	Vincoli normativi per prototipi: Isolamento, Sicurezza Elettrica ed EMC	42
4.6	Componenti e architettura del progetto	43
4.6.1	Divisore di tensione	43
4.6.2	Dimensionamento del partitore resistivo	43
4.6.3	Simulazioni operative del divisore resistivo	46
4.6.4	Simulazione transiente del partitore resistivo con LTspice	50
4.6.5	Sonda di corrente	55
4.6.6	Scheda di acquisizione QA-POWER-M-LV	56
4.6.7	Interfaccia di comunicazione: Datalogger Z-LTE SENECA	58
4.6.8	Conclusioni della sezione	60
	Conclusioni	61
	Bibliografia	64

Elenco delle tabelle

2.1	Valori minimi di clearance e creepage secondo BS EN 50124-1:2017, per Pollution Degree 3 e OVC III	15
2.2	Valori di sovratensione impulsiva per Overvoltage Category III secondo BS EN 50124-1:2017	16
2.3	Tabella A.1 – Tensioni d’impulso nominali U_{Ni} secondo BS EN 50124-2:2017	19
2.4	Livelli massimi di emissione irradiata secondo EN 50121-3-2:2017 (a 3 m)	22
2.5	Profilo di vibrazione - Categoria 1 (Carrello)	24
3.1	Confronto tra Energy Meter Tradizionale e Smart Meter Ferroviario Proposto	37

Elenco delle figure

1.1	Schema elementare di funzioinamento [1]	2
1.2	Il semaforo tranviario [2]	3
1.3	Tram serie 2800 [2]	4
1.5	Tram serie 8000 [2]	5
2.1	Gerarchia delle normative tecniche	11
2.2	EMS struttura e diagramma del dataflow [4]	14
2.3	Classificazione delle sovratensioni secondo BS EN 50124-2:2017. [6] .	18
4.1	Posizione prevista per lo smart meter nella cassa motrice del tram serie 6000	41
4.3	Basetta millefori per test in laboratorio.	47
4.5	Circuito di simulazione in LTspice: partitore con $R_1 = 422\text{ k}\Omega$, $R_2 = 28.7\text{ k}\Omega$ e $R_3 = 1\text{ M}\Omega$ in parallelo a R_2 , sottoposto a un impulso di tensione.	50
4.6	Campo elettrico del divisore immerso in resina.	54

Elenco degli acronimi

SM

Smart Meter

INRIM

Istituto Nazionale di Ricerca e Metrologia

GTT

Gruppo Torinese Trasporti

SSE

Sotto Stazione Elettrica

PRIN

Progetti di Rilevante Interesse Nazionale

EMS

Energy Measurement System

EMF

Energy Measurement Function

DHS

Data Handling System

CTI

Comparative Tracking Index

Capitolo 1

Introduzione e contesto

Il lavoro di questa tesi mira alla realizzazione di uno *Smart Meter* a servizio del gemello digitale della rete tranviaria torinese. Lo SM è un dispositivo in grado di comunicare con estrema precisione le misure elettriche relative alla motrice tranviaria su cui esso sarà installato, mentre il gemello digitale consiste nella rappresentazione mediante un software dell'infrastruttura elettrica e dell'intero parco macchine circolante nella città di Torino. Uno strumento molto utile per l'azienda che possiede la gestione del trasporto pubblico cittadino. Il lavoro svolto è stato eseguito in collaborazione tra Il Politecnico di Torino, l'**istituto nazionale di ricerca e metrologia** INRIM e il **Gruppo Torinese Trasporti** GTT.

1.1 La rete tranviaria torinese

Il sistema tranviario della città di Torino rappresenta uno degli esempi più significativi di trasporto pubblico su rotaia a livello nazionale. Con radici storiche che risalgono alla fine del XIX secolo, la rete si è sviluppata parallelamente alla crescita urbana, accompagnando le trasformazioni economiche, sociali e territoriali della città. Oggi, il tram costituisce un elemento fondamentale della mobilità torinese, contribuendo alla sostenibilità ambientale, alla riduzione del traffico privato e alla valorizzazione del tessuto urbano.

La rete tranviaria torinese è gestita da GTT e si estende per circa 88 chilometri, servendo numerosi quartieri della città. Essa si configura come un sistema di trasporto di tipo leggero su rotaia, alimentato elettricamente tramite linea aerea a corrente continua, con tensione nominale di 600 V. Il servizio è strutturato su linee numerate che collegano punti strategici del territorio urbano, garantendo un'elevata capillarità e una buona integrazione con altri mezzi pubblici, come autobus, metropolitana e ferrovie suburbane.

La rete è costituita da una combinazione di tracciati in sede promiscua e in sede riservata. Nelle tratte a sede promiscua, il tram condivide la carreggiata con il traffico automobilistico, con conseguenti criticità legate alla regolarità del servizio. Tuttavia, negli ultimi anni sono stati effettuati interventi mirati a separare la sede tranviaria dal traffico veicolare, al fine di aumentare l'efficienza e la sicurezza del sistema.

La gestione della circolazione è supportata da sistemi di segnalamento semaforico dedicati e da apparati di controllo della marcia, con priorità semaforica in corrispondenza di alcuni incroci. La manutenzione della rete e dei veicoli è affidata a depositi e officine specificamente attrezzate, localizzate in diverse zone della città.

1.1.1 Dettagli sul funzionamento e sull'alimentazione della rete tranviaria

La rete tranviaria torinese è alimentata mediante una linea aerea di contatto (c.d. "catenaria") che fornisce corrente continua a 600 V. Tale tensione rappresenta uno standard consolidato per il trasporto leggero urbano e consente un buon compromesso tra sicurezza, efficienza energetica e semplicità di conversione. I veicoli assorbono l'energia tramite pantografi montati sul tetto, che mantengono il contatto elettrico costante anche durante il moto.

L'infrastruttura elettrica di alimentazione presenta una configurazione articolata e composta da numerosi sottosistemi, ciascuno indispensabile per garantirne il corretto funzionamento e la sicurezza operativa. Essa è suddivisa in più sezioni elettricamente indipendenti, separate da appositi dispositivi detti separatori di zona. Tale suddivisione consente di trattare ciascuna area come un'entità autonoma dal punto di vista elettrico, facilitando così la gestione e la localizzazione dei guasti.

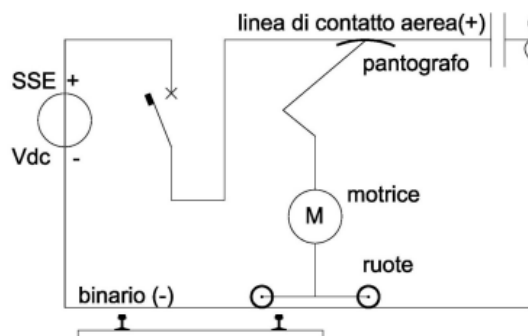


Figura 1.1: Schema elementare di funzionamento [1]

Dal punto di vista schematico, ogni zona può essere rappresentata come un circuito elettrico che parte da una sottostazione elettrica SSE di conversione. Questa SSE riceve energia in media tensione (tipicamente 22 kV in corrente alternata) e la trasforma in corrente continua a 600 V, adatta al sistema di trazione, tramite un processo di trasformazione e raddrizzamento. Sul lato a bassa tensione della SSE è presente un interruttore extrarapido, il cui scopo è proteggere i cavi di alimentazione e la linea aerea da sovracorrenti.

L'alimentazione viene poi distribuita lungo la linea mediante cavi detti "feeder positivi", che trasportano la corrente dalla SSE ai punti di erogazione tramite una rete magliata. Quest'ultima è organizzata mediante cassette di derivazione che fungono da nodi di distribuzione e permettono una configurazione flessibile della rete.

La linea aerea di contatto, costituita da un conduttore in rame sagomato, è in contatto diretto con i pantografi dei tram e fornisce loro l'alimentazione elettrica. Il circuito si chiude attraverso il ritorno di corrente che avviene tramite le rotaie del binario, spesso affiancate da cavi negativi collegati direttamente alla SSE. Le rotaie sono appositamente isolate da terra per minimizzare le correnti parassite e garantire un ritorno efficiente a bassa resistenza, limitando così le cadute di tensione.

I tram rappresentano i carichi elettrici più significativi del sistema. L'assorbimento di corrente può risultare particolarmente elevato, specialmente in fase di avviamento simultaneo di più convogli, rendendo in alcuni casi difficile distinguere tale condizione da un eventuale cortocircuito in fondo linea. Il veicolo analizzato come caso studio è la motrice serie 6000, equipaggiata con 12 motori asincroni, ciascuno controllato da un inverter dedicato. Questo tipo di veicolo è in grado di effettuare la frenatura rigenerativa, restituendo energia alla rete (se recettiva) grazie a un chopper integrato che regola il processo.

La regolazione della marcia dei convogli avviene tramite sistemi di segnalamento semaforico coordinato con la centrale operativa, che può intervenire in tempo reale in caso di anomalie o congestioni. Alcuni incroci sono dotati di sistemi di priorità semaforica per i tram, che consentono di ridurre i tempi di percorrenza e migliorare la regolarità del servizio.

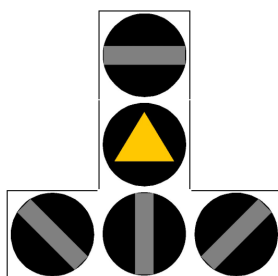


Figura 1.2: Il semaforo tranviario [2]

1.1.2 Parco veicoli

Il parco veicoli della rete tranviaria torinese è eterogeneo e comprende diverse tipologie di tram, suddivise tra modelli storici e convogli moderni. Tra i mezzi storici ancora in esercizio si distinguono le vetture serie 2800, caratterizzate da una struttura robusta e una lunga vita operativa, impiegate soprattutto sulle linee ad alta capacità.



Figura 1.3: Tram serie 2800 [2]

I mezzi più moderni includono le vetture serie 5000 e 6000, progettate con pianale ribassato per agevolare l'accesso e conformi agli standard di accessibilità per persone con mobilità ridotta.



(a) Tram Serie 5000 [2]



(b) Tram serie 6000 [2]

Recentemente, la città ha avviato un piano di rinnovamento della flotta con l'introduzione di nuovi tram a pianale integralmente ribassato, serie 8000, dotati di tecnologie avanzate per la sicurezza, l'efficienza energetica e il comfort dei passeggeri.



Figura 1.5: Tram serie 8000 [2]

La gestione dell'energia a bordo dei veicoli è affidata a convertitori statici che alimentano i circuiti ausiliari (illuminazione, climatizzazione, sistemi elettronici) e ai motori di trazione, spesso asincroni trifase alimentati tramite inverter. Questo schema permette un controllo preciso della velocità e della coppia, oltre al recupero di energia in frenata, che viene in parte riutilizzata a bordo o restituita alla rete, quando possibile in funzione della motrice.

1.2 Gestione energetica e ottimizzazione dei consumi

La rete tranviaria adotta strategie di gestione energetica mirate a ridurre il consumo complessivo e a massimizzare l'efficienza operativa. Uno degli aspetti fondamentali è l'uso del *freno elettrico rigenerativo*, che consente ai tram di convertire l'energia cinetica in energia elettrica durante le fasi di rallentamento. Tale energia può essere riutilizzata direttamente da altri convogli nelle vicinanze oppure, nei tratti con impianti adeguati, reimmessa nella rete tramite le sottostazioni reversibili.

L'ottimizzazione dell'orario di marcia e la regolazione dinamica della frequenza del servizio in funzione della domanda sono ulteriori strumenti di gestione efficiente, supportati da algoritmi predittivi e modelli di simulazione del traffico tranviario.

1.3 Manutenzione predittiva delle infrastrutture e dei veicoli

Al fine di garantire la continuità e la sicurezza del servizio, si vogliono sviluppare tecniche di *manutenzione predittiva*, che affiancano e in parte sostituiscono la tradizionale manutenzione programmata. Tale approccio si basa sull'impiego di sensori distribuiti, sistemi IoT e piattaforme di monitoraggio centralizzate in grado di rilevare in tempo reale parametri critici relativi all'usura e alle condizioni operative dei principali componenti, sia a bordo veicolo che sull'infrastruttura.

Nel caso delle SSE e delle linee di contatto, i sistemi di diagnostica monitorano costantemente tensione, corrente, temperatura e vibrazioni per individuare segnali precoci di anomalia. A bordo dei tram, invece, vengono rilevati dati relativi a trazione, frenatura, apertura porte, stato dei pantografi e condizionamento, che vengono analizzati per prevenire guasti improvvisi.

Le informazioni raccolte vengono elaborate mediante algoritmi di *machine learning* che riconoscono pattern ricorrenti associati a condizioni di degrado o a probabili rotture. In questo modo, è possibile pianificare interventi manutentivi mirati con anticipo, riducendo i tempi di fermo, contenendo i costi di riparazione e migliorando l'affidabilità complessiva della rete.

Questa strategia rappresenta un passo importante verso un sistema di trasporto intelligente e resiliente, in linea con i principi della manutenzione 4.0 e della smart mobility.

1.4 Il progetto PRIN 2022: DC smart grids for next generation transportation system

Nell'ambito del programma PRIN 2022 (Progetti di Rilevante Interesse Nazionale), è stato avviato un progetto di ricerca dedicato allo sviluppo e all'implementazione di un *gemello digitale* per la rete tranviaria della città di Torino. Il progetto, promosso da un consorzio di enti di ricerca e università italiane, mira a realizzare una rappresentazione digitale avanzata e dinamica dell'infrastruttura tranviaria urbana, con l'obiettivo di supportare la gestione operativa, la pianificazione, la manutenzione predittiva e l'efficienza energetica del sistema [3].

Il gemello digitale viene concepito come un sistema cyber-fisico in grado di ricevere dati in tempo reale dai sottosistemi fisici della rete (alimentazione, trazione, sottostazioni, veicoli, sensori distribuiti), integrandoli in un modello virtuale aggiornato dinamicamente. Questo modello consente di simulare scenari futuri, prevedere guasti, ottimizzare i flussi energetici e migliorare la sicurezza dell'intera rete.

Nello specifico, il progetto PRIN 2022 si concentra su:

- lo sviluppo di architetture software scalabili per il digital twin;
- l'integrazione di algoritmi di manutenzione predittiva basati su tecniche di machine learning;
- il monitoraggio continuo dei parametri elettrici e meccanici del sistema tranviario;
- la riduzione dei consumi energetici tramite strategie di gestione intelligente della trazione e della frenatura rigenerativa.

Per il caso studio torinese, il gemello digitale è stato progettato per dialogare con i dati provenienti da specifici modelli di veicoli, tra cui la motrice serie 6000, e dalle infrastrutture di alimentazione in corrente continua a 600 V. L'iniziativa rappresenta un importante passo verso la digitalizzazione intelligente delle reti di trasporto pubblico locale e si inserisce in una più ampia strategia nazionale di innovazione urbana e sostenibilità ambientale.

1.5 Applicazione del Digital Twin nel settore tranviario

Il concetto di *Digital Twin*, ovvero gemello digitale, trova oggi crescente applicazione anche nel contesto dei sistemi di trasporto pubblico su rotaia, in particolare nel settore tranviario. Un digital twin è una replica digitale dinamica di un asset fisico — come un veicolo, una sottostazione elettrica o un'intera infrastruttura di rete — che integra modelli virtuali e dati operativi in tempo reale, consentendo analisi, simulazioni e ottimizzazioni avanzate.

Nel caso della rete tranviaria, il digital twin può essere impiegato per rappresentare virtualmente l'intero sistema di trazione, includendo i veicoli, le sottostazioni, le linee di contatto, il circuito di ritorno e i parametri ambientali e di traffico urbano. Attraverso l'integrazione con sensori distribuiti e piattaforme IoT, è possibile acquisire continuamente informazioni su posizione, velocità, consumi energetici, condizioni ambientali, stato dei componenti meccanici ed elettrici. Questi dati alimentano in tempo reale il modello digitale, rendendolo una copia fedele e aggiornata del sistema reale.

Uno degli impieghi più significativi riguarda la **manutenzione predittiva**. Il digital twin consente di monitorare l'usura dei componenti (come freni, pantografi, inverter, linee aeree), stimarne la vita residua e pianificare interventi manutentivi solo quando effettivamente necessari, riducendo così i costi e i tempi di fermo.

Altre applicazioni includono:

- **Ottimizzazione energetica:** attraverso simulazioni su scenari futuri, è possibile valutare strategie di guida ottimizzata, recupero energetico e gestione della ricarica in reti con accumulo.
- **Supporto alla progettazione:** il digital twin consente di simulare l'inserimento di nuovi convogli o modifiche all'infrastruttura, prevedendone l'impatto su traffico, consumi e prestazioni della rete.
- **Formazione del personale:** grazie a interfacce grafiche immersive, i digital twin possono essere usati per addestrare conducenti, manutentori e operatori di rete in ambienti simulati ma realistici.
- **Gestione delle emergenze:** in caso di guasto o evento critico, il modello digitale può fornire in tempo reale una visione d'insieme utile a prendere decisioni rapide e mirate.

Nel contesto di reti tranviarie intelligenti e integrate in una visione di *smart city*, il digital twin rappresenta una tecnologia abilitante per la trasformazione digitale, migliorando efficienza, sicurezza, sostenibilità e qualità del servizio.

Per la realizzazione del gemello digitale sono necessarie, tra le altre, due componentistiche fondamentali:

- **L'infrastruttura digitale:** Questa è la componente che anzitutto permette la visualizzazione grafica di tutta la struttura tranviaria come sopra descritta attraverso un'interfaccia, in secondo luogo consente l'elaborazione dei dati in ingresso che sono utilizzati per valutare l'ottimizzazione energetica, gestione delle emergenze e altro.
- **Lo Smart Meter:** Con esso si intende lo strumento in grado di rilevare in maniera accurata principalmente due valori elettrici fondamentali; Tensione e Corrente. Oltre alla misurazione lo SM è in grado di elaborare i dati ricavando il valore dell'energia e della potenza, trasmettere queste informazioni attraverso protocolli di comunicazione a lunga distanza e infine può essere programmato anche a distanza per scegliere quali e come trasmettere i dati.

1.6 Struttura della Tesi

Questa tesi si è concentrata sullo studio, la progettazione e la realizzazione dello smart meter. Nelle pagine successive verrà illustrato il lavoro svolto ed è strutturato nel seguente modo:

- La prima parte sarà dedicata allo stato dell'arte e alle normative, in generale, che disciplinano il mondo tranviario e ferroviario e in particolare quelle in vigore riguardanti l'installazione di dispositivi elettronici a bordo veicolo.

- La parte centrale invece tratterà della progettazione dei componenti del dispositivo. Dell'assemblaggio e delle prove eseguite per verificare il funzionamento.
- Nella parte conclusiva verrà illustrato il risultato raggiunto e quali saranno gli sviluppi futuri.

Capitolo 2

Normative di riferimento per applicazioni ferroviarie

2.1 Introduzione alle normative tecniche

Le normative tecniche rappresentano un insieme di regole, specifiche e linee guida formalmente riconosciute, redatte da enti di normazione nazionali e internazionali, con l'obiettivo di garantire la sicurezza, l'interoperabilità, la qualità e l'affidabilità dei prodotti e dei sistemi. La loro osservanza assicura che i dispositivi progettati siano conformi ai requisiti minimi previsti dalla legge e compatibili con le infrastrutture e gli standard tecnici già esistenti.

Le normative si articolano su più livelli gerarchici. A livello internazionale troviamo organismi come:

- **IEC** (International Electrotechnical Commission), per il settore elettrotecnico;
- **ISO** (International Organization for Standardization), per standard trasversali;

mentre a livello europeo operano:

- **CENELEC** (European Committee for Electrotechnical Standardization), che recepisce e armonizza gli standard IEC per il mercato europeo;
- **ETSI** (European Telecommunications Standards Institute), per le telecomunicazioni;

In Italia, l'ente di normazione di riferimento è il **CEI** (Comitato Elettrotecnico Italiano), responsabile dell'elaborazione, traduzione e recepimento delle norme in ambito elettrotecnico, elettronico e delle telecomunicazioni.

Le norme possono essere:

- **obbligatorie**, quando il loro rispetto è imposto da direttive europee o leggi nazionali (ad esempio nel caso della marcatura CE);
- **volontarie**, quando il loro impiego non è vincolato per legge ma rappresenta una buona prassi tecnica condivisa nel settore.

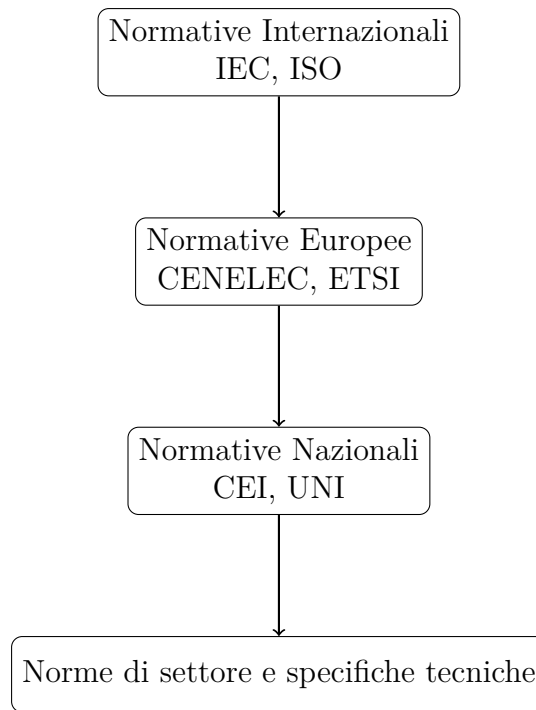


Figura 2.1: Gerarchia delle normative tecniche

La Figura 2.1 illustra la struttura gerarchica delle normative tecniche, evidenziando il flusso dalle organizzazioni internazionali fino agli enti nazionali e alle specifiche di settore. Questa struttura consente un'armonizzazione progressiva degli standard, facilitando la compatibilità tecnica dei prodotti nei diversi contesti normativi.

L'applicazione coerente delle normative durante la progettazione consente non solo di garantire la sicurezza e la funzionalità del prodotto, ma anche di facilitare eventuali processi di certificazione e immissione sul mercato.

Nel presente capitolo si analizzano le principali norme tecniche applicabili al prodotto sviluppato, con particolare attenzione agli aspetti relativi alla sicurezza elettrica, alla compatibilità elettromagnetica e alla gestione dell'interfaccia con infrastrutture esistenti.

2.2 La norma BS EN 50463: Sistemi di misura dell'energia per applicazioni ferroviarie

La serie di norme **BS EN 50463** stabilisce i requisiti tecnici e le linee guida per la progettazione, l'implementazione e la verifica dei sistemi di misura dell'energia impiegati nei veicoli ferroviari. Questi sistemi, noti come *Energy Measurement Systems* (EMS), sono fondamentali sia ai fini della fatturazione dell'energia consumata che per la diagnostica e l'ottimizzazione dell'uso dell'energia nei moderni sistemi di trazione. La norma si articola in cinque parti, ciascuna dedicata a un aspetto specifico dell'EMS.

2.2.1 Parte 1 – Requisiti funzionali (*BS EN 50463-1*)

La prima parte definisce i requisiti funzionali minimi per un EMS, indipendentemente dalla tecnologia impiegata. Vengono precisati:

- Le grandezze elettriche da misurare: energia attiva, energia reattiva, fattore di potenza, corrente di picco e tensione di linea.
- La precisione di misura richiesta in funzione delle classi metrologiche (tipicamente Classe A e Classe B).
- I range operativi: sistema DC (600–1500 V) e AC (1,5–25 kV), con tolleranze e limiti di sovratensione.
- Le modalità di acquisizione: misura sincrona di tensione e corrente, campionamento minimo a 1 kHz per la cattura dei transitori di trazione.
- Le funzionalità di auto-diagnostica e rilevamento guasti interni.

Questi requisiti garantiscono che ogni sistema EMS sia in grado di fornire dati affidabili e comparabili, indipendentemente dal fornitore o dal modello di veicolo.

2.2.2 Parte 2 – Interfaccia di comunicazione (*BS EN 50463-2*)

La seconda parte specifica il protocollo di comunicazione tra il misuratore di energia e il sistema di controllo di bordo (Vehicle Control Unit, VCU). I punti principali sono:

- Definizione dello stack di comunicazione.
- Oggetti di dati che trasportano le misure istantanee, gli accumuli di energia e gli stati di errore.

- Meccanismi di sincronizzazione temporale, per garantire coerenza tra più nodi EMS su convoglio.
- Gestione dei comandi di reset dell'accumulatore e di calibrazione remota.

Questa interfaccia standardizzata permette l'integrazione plug-and-play dei misuratori in diversi sistemi veicolari e la raccolta centralizzata dei dati.

2.2.3 Parte 3 – Software EMS (*BS EN 50463-3*)

La terza parte fornisce linee guida per lo sviluppo del firmware del misuratore di energia:

- Architettura software modulare, con separazione tra driver di periferica, motore di misura e protocollo di comunicazione.
- Algoritmi di filtraggio digitale per il calcolo di RMS in presenza di armoniche e disturbi.
- Procedure di calibrazione interna, con coefficienti conservati in memoria non volatile.
- Gestione degli eventi di diagnostica, logging di anomalie e registrazione di dati a bordo (black box).

L'obiettivo è garantire la replicabilità del comportamento metrologico e facilitare aggiornamenti software in campo.

2.2.4 Parte 4 – Prove di conformità (*BS EN 50463-4*)

La quarta parte definisce le procedure di collaudo per verificare la conformità di un EMS ai requisiti delle parti precedenti:

- Test metrologici in laboratorio: precisione in DC, AC, carichi variabili, test di linearità e di ripetibilità.
- Test funzionali: corretto funzionamento dell'interfaccia di comunicazione, procedure di reset e di calibrazione.
- Prove di immunità EMC, in accordo con BS EN 50121-3-2, per emissioni e immunità irradiata/condotta.
- Verifica dell'aderenza ai vincoli ambientali e meccanici (vibrazioni secondo IEC 61373 e temperatura da -40 °C a $+85\text{ °C}$).

Questi test assicurano che il sistema misuri in modo affidabile e resista alle sollecitazioni reali di esercizio.

2.2.5 Parte 5 – Struttura dati e formati (*BS EN 50463-5*)

L'ultima parte definisce il formato dei dati registrati e trasmessi:

- Struttura dei record di archiviazione: timestamp, energia cumulata, eventi di reset, parametri di diagnostica.
- Formati standard per il dump dati su memoria esterna.
- Identificatori univoci di dispositivo e di veicolo, per consentire l'aggregazione centralizzata dei dati da più convogli.
- Codifica dei registri di diagnostica per facilitare l'analisi automatica degli errori.

Queste specifiche rendono i dati prodotti dagli EMS interoperabili con le piattaforme di gestione dell'energia, i sistemi SCADA e i digital twin delle infrastrutture tranviarie.

generic figure

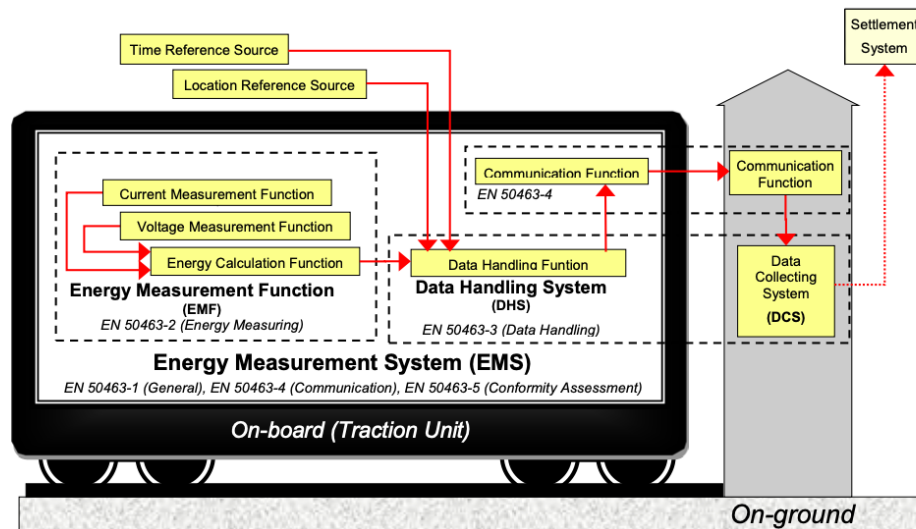


Figura 2.2: EMS struttura e diagramma del dataflow [4]

Considerazioni finali

L'adozione della serie BS EN 50463 consente lo sviluppo di sistemi di misura dell'energia affidabili, comparabili e standardizzati per il settore ferroviario. L'integrazione dei requisiti funzionali, delle interfacce, del software, delle prove di conformità e della strutturazione dei dati garantisce che i misuratori possano essere

impiegati sia per la fatturazione che per analisi avanzate di efficienza energetica e manutenzione predittiva.

2.3 La norma BS EN 50124: Coordinamento dell'isolamento dello Smart Meter

Il coordinamento dell'isolamento rappresenta una fase essenziale nella progettazione dei sistemi elettrici, specialmente in ambito ferroviario, dove le condizioni ambientali, le sovratensioni e i requisiti di sicurezza impongono criteri rigorosi. Lo smart meter progettato per l'impiego sulla rete tranviaria deve garantire un adeguato livello di isolamento tra i circuiti interni e il sistema di trazione a 600 V DC. A tal fine, sono stati adottati i criteri previsti dalle norme **BS EN 50124-1:2017** e **BS EN 50124-2:2017**.

La norma **BS EN 50124-1:2017**, intitolata *“Railway applications – Insulation coordination – Part 1: Basic requirements – Clearances and creepage distances for all electrical and electronic equipment”*, definisce i requisiti fondamentali per le distanze di isolamento, sia in aria (clearance¹) che superficiali (creepage²), in relazione alla tensione nominale e alle condizioni ambientali.

Tabella 2.1: Valori minimi di clearance e creepage secondo BS EN 50124-1:2017, per Pollution Degree 3 e OVC III

Tensione nominale DC	Clearance [mm]	Creepage [mm]	Materiale minimo CTI ³
600 V DC	10,0	20,0	175
1500 V DC	18,0	35,0	175

Nel caso specifico dello smart meter, classificato come apparecchiatura installata in ambiente con grado di inquinamento PD4 (Pollution Degree 4), sono state determinate:

- la **distanza in aria** minima tra i conduttori attivi e le parti a massa secondo la tensione nominale e la categoria di sovratensione;
- la **distanza superficiale** in funzione del materiale isolante, della tensione e del livello di inquinamento previsto.

[5]

La norma prevede inoltre la definizione delle categorie di sovratensione, indicando il livello massimo di impulso che il sistema deve sopportare senza perdita di

¹Distanza minima in aria tra due conduttori attivi o tra conduttore attivo e massa.

²Distanza lungo la superficie isolante tra due conduttori.

isolamento. Per applicazioni ferroviarie con tensione nominale di 600 V DC, la categoria di sovratensione di riferimento è la **OVC III**, corrispondente a dispositivi connessi permanentemente all'impianto di trazione.

Tabella 2.2: Valori di sovratensione impulsiva per Overvoltage Category III secondo BS EN 50124-1:2017

Tensione nominale DC	Categoria OVC	Sovratensione impulsiva [kV]
600 V DC	OVC III	6 kV
1500 V DC	OVC III	12 kV

Note tecniche : I valori indicati sono tipicamente riferiti a impulsi di prova di tipo 1,2/50 μ s (standard). La scelta del livello di isolamento si basa sul valore di sovratensione impulsiva in funzione della categoria di sovratensione e del livello di inquinamento ambientale (Pollution Degree). Per applicazioni ferroviarie in ambiente esterno, il Pollution Degree 4 è il caso più severo previsto dalla norma.

Sulla base di tali prescrizioni normative, lo smart meter è stato progettato con:

- distanze in aria superiori a 14 mm tra le parti attive e la massa;
- percorsi superficiali maggiori di 20 mm con utilizzo di materiali CTI adeguati;
- protezione contro polvere e umidità, mediante incapsulamento conforme a grado IP54 o superiore.

[6]

La norma **BS EN 50124-2:2017** integra quanto previsto dalla Parte 1, fornendo linee guida per l'applicazione pratica, le modalità di verifica e le procedure di collaudo dell'isolamento. In particolare, essa suggerisce metodi di prova per determinare la resistenza all'arco elettrico, alla contaminazione e al degrado dei materiali isolanti nel tempo.

2.3.1 Impulsi di sovratensione e protezione

La norma **BS EN 50124-2:2017** integra i requisiti dimensionali fissati dalla Parte 1 introducendo una trattazione specifica delle *sovratensioni transitorie* che possono interessare i sistemi di trazione. Vengono distinti due meccanismi principali di generazione:

1. **Impulsi di origine atmosferica (fulmini indiretti):** accoppiamento induttivo o resistivo tra conduttori aerei e linea di contatto; impulsi tipicamente modellati con fronti di 1.2 μ s e code di 50 μ s (*impulso 1,2/50*).

2. **Impulsi di manovra (*switching*)**: derivanti da commutazioni di carico, operazioni di sezionamento o ritorni di arco nei circuiti di trazione; modellati spesso con forma d'onda $8\text{ }\mu\text{s}/20\text{ }\mu\text{s}$ o $10\text{ }\mu\text{s}/350\text{ }\mu\text{s}$, a seconda della potenza di scorrimento energetico richiesta.

Profili di impulso realistici La norma fornisce grafici di corrente e tensione che descrivono l'andamento temporale dei transitori pertinenti ai sistemi ferroviari in CC. Le curve energetiche, espresse in termini di integrale $\int i^2 dt$, sono utilizzate per verificare la robustezza dell'isolamento e la tenuta termica degli SPD installati in serie o in parallelo al carico.

Modalità di protezione e mitigazione Per limitare le sollecitazioni dielettriche occorre una combinazione di:

- **Coordinamento dell'isolamento** (valori di *clearance/creepage* dalla Parte 1).
- **Surge Protective Devices (SPD)** selezionati e coordinati secondo i criteri seguenti:
 - *Tensione nominale di scarica* U_n non superiore al 90 % della tensione di tenuta a impulso dell'apparecchiatura.
 - *Corrente impulsiva* I_{imp} pari almeno alla corrente di fulmine indiretto di riferimento (valore tabulato in funzione della posizione lungo la linea).
 - *Classe di prova*: per installazioni di trazione in esterno la norma suggerisce SPD di **Classe I** con capacità di scarica di picco fino a 25 kA (forma $10/350\text{ }\mu\text{s}$) o equivalenti $8/20\text{ }\mu\text{s}$.
 - *Coordinamento energetico* fra SPD in cascata, ottenuto garantendo rapporti di clamping progressivi ($U_{p1} < U_{p2} < U_{p3}$) e distanze minime per evitare inneschi indesiderati.
- **Schermature e collegamenti equipotenziali** per ridurre le differenze di potenziale fra masse metalliche.
- **Filtri RC o LC** dedicati ai circuiti di misura, qualora la larghezza di banda consentita lo permetta.

Legenda:

- **Zona A** – Sovratensioni da fulminazione indiretta: impulsi di origine atmosferica trasmessi per accoppiamento alla linea di contatto.

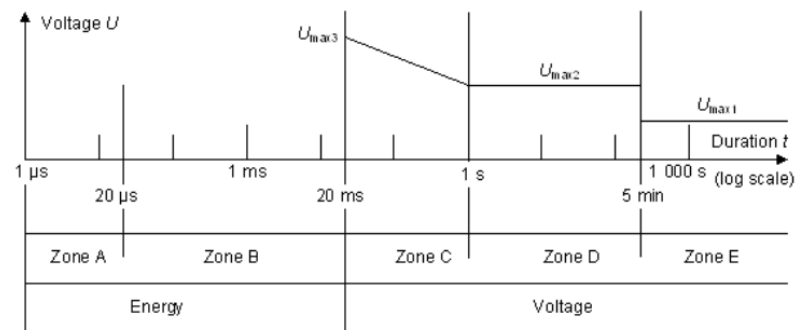


Figura 2.3: Classificazione delle sovratensioni secondo BS EN 50124-2:2017. [6]

- **Zona B** – Sovratensioni di manovra dovute a fenomeni ad alta impedenza, come l'interruzione di correnti in circuiti fortemente induttivi.
Nota: Le sovratensioni nelle zone A e B non sono considerate nel dimensionamento standard perché dipendono fortemente dalle caratteristiche specifiche della sorgente e del carico della linea.
- **Zona C** – Sovratensioni temporanee causate da fenomeni a bassa impedenza, tipicamente dovute a variazioni di tensione nella rete primaria di alimentazione.
Nota: Il termine “sovratensione temporanea” è equivalente a “sovratensione di lunga durata” secondo la EN 50163.
- **Zona D** – Massima tensione non permanente $U_{\max 2}$, definita come il valore più alto raggiunto per brevi durate.
- **Zona E** – Massima tensione permanente $U_{\max 1}$, corrispondente alla massima tensione continua che può essere mantenuta indefinitamente senza danneggiare l'isolamento.

La variazione del rapporto di tensione $U/U_{\max 2}$ in funzione del tempo t (nell'intervallo $0,02 \text{ s} \leq t \leq 1 \text{ s}$) segue la legge:

$$U = U_{\max 2} \cdot t^{-k}$$

dove k è un coefficiente dipendente dalla categoria del sistema, riportato nella Tabella A.1 della norma.

In una rappresentazione a coordinate logaritmiche, tale relazione descrive una retta con pendenza determinata dal coefficiente k .

Tabella 2.3: Tabella A.1 – Tensioni d'impulso nominali U_{Ni} secondo BS EN 50124-2:2017

Tensione nominale U_n (V, valore massimo)	U_{Ni} (kV) per categoria di sovratensione			
	OVC 1	OVC 2	OVC 3	OVC 4
≤ 50	0.33	0.50	0.80	1.50
≤ 100	0.50	0.80	1.50	2.50
120 – 240 ($\leq 150 \text{ V } U_{N_m}$)	0.80	1.50	2.50	4.00
230/400 – 277/480 ($\leq 300 \text{ V } U_{N_m}$)	1.50	2.50	4.00	6.00
400/690 ($\leq 600 \text{ V } U_{N_m}$)	2.50	4.00	6.00	8.00
1000 ($\leq 1000 \text{ V } U_{N_m}$)	4.00	6.00	8.00	12.0

Indicazioni progettuali per lo smart meter Applicando le linee guida della BS EN 50124-2, lo smart meter destinato alla rete tranviaria è stato dimensionato per:

- sopportare un impulso di tensione di 6 kV (600 V DC) e 12 kV (1500 V DC) con forma 1,2/50 μ s senza scariche disruptive;
- integrare SPD a varistore metal-ossido (MOV) di Classe I con $I_{\text{imp}} \geq 25$ kA (10/350 μ s) in parallelo all'ingresso di misura;
- mantenere, dopo l'intervento degli SPD, una tensione residua $U_{\text{res}} \leq 0.8U_{\text{imp}}$ per proteggere l'elettronica interna.

Queste prescrizioni assicurano che gli stress elettrici transitori rimangano al di sotto delle capacità di tenuta dell'isolamento definito in Parte 1, garantendo l'affidabilità a lungo termine del dispositivo in esercizio sulle linee tranviarie.

Inoltre, il sistema sarà stato sottoposto a simulazioni e prove di tipo per verificare la tenuta dielettrica, la resistenza alle sovratensioni e il comportamento in condizioni ambientali estreme, come previsto dalla parte 2 della norma.

L'adozione di tali standard garantisce che lo smart meter operi in sicurezza, minimizzando il rischio di scariche o guasti interni e mantenendo l'integrità dell'isolamento per tutta la durata prevista del ciclo di vita.

2.4 La norma **BS EN 50121**: compatibilità elettromagnetica nei sistemi ferroviari

La serie di norme **BS EN 50121** si occupa della compatibilità elettromagnetica (EMC) nell'ambito ferroviario, stabilendo i requisiti e le metodologie di prova per garantire che le apparecchiature elettriche ed elettroniche funzionino correttamente in un ambiente soggetto a elevate interferenze. La norma si articola in cinque parti, ciascuna delle quali affronta un aspetto specifico del sistema ferroviario, dal livello infrastrutturale fino al materiale rotabile e alle apparecchiature ausiliarie.

2.4.1 Parte 1 – Aspetti generali (**BS EN 50121-1**)

La prima parte della norma definisce i principi generali e le condizioni di applicazione delle restanti sezioni. Essa stabilisce le definizioni fondamentali, il campo di applicazione e la suddivisione delle responsabilità tra i vari soggetti coinvolti nella progettazione e installazione dei sistemi ferroviari. Viene chiarito che la norma si applica a sistemi ferroviari tradizionali, metropolitane, tramvie e ferrovie leggere, escluse le linee di alimentazione ad alta tensione. [7]

Tra i principali concetti introdotti vi sono:

- La distinzione tra *emissione* (le interferenze irradiate o condotte verso l'esterno) e *immunità* (la capacità dell'apparato di resistere alle interferenze esterne).

- I livelli di severità delle prove EMC e i criteri di accettazione.
- Il concetto di ambiente ferroviario misto, in cui coesistono infrastrutture e sottosistemi con caratteristiche differenti.

2.4.2 Parte 2 – Emissioni di tutto il sistema verso l’ambiente esterno (*BS EN 50121-2*)

Questa parte della norma specifica i limiti di emissione elettromagnetica generati da un sistema ferroviario completo (composto da materiale rotabile, linee di contatto, sottostazioni e infrastruttura) verso l’ambiente esterno. L’obiettivo è assicurare che il sistema non interferisca con altre infrastrutture sensibili (es. telecomunicazioni, dispositivi medici o stazioni radio). [8]

I principali requisiti includono:

- Misure di emissioni irradiate nel campo di frequenza da 9 kHz a 1 GHz (fino a 40 GHz in casi particolari).
- Misure condotte lungo le linee di alimentazione.
- Procedure di misura su linee di prova ferroviarie o tramite simulazioni con banchi di prova.

Sono previsti livelli differenziati di emissione in base alla distanza dalla sorgente e all’ambiente di installazione (urbano, industriale, rurale).

2.4.3 Parte 3 – Emissioni e immunità del materiale rotabile (*BS EN 50121-3-1 e 50121-3-2*)

Questa parte è suddivisa in due sezioni:

- **BS EN 50121-3-1:** tratta le emissioni irradiate e condotte del materiale rotabile, come locomotive, vagoni, tram e metropolitane. [9]
- **BS EN 50121-3-2:** si occupa dell’immunità dei veicoli ferroviari alle interferenze elettromagnetiche.[10]

Le prove vengono effettuate in condizioni operative reali o simulate, includendo:

- Emissioni irradiate (frequenze tra 30 MHz e 1 GHz) e condotte (fino a 150 kHz).
- Immunità ai campi irradiati (es. telefoni cellulari, radiotrasmettitori), scariche elettrostatiche (ESD), transitori rapidi (EFT), surges e interferenze condotte.

Tabella 2.4: Livelli massimi di emissione irradiata secondo EN 50121-3-2:2017 (a 3 m)

Frequenza	Quasi-peak [dB μ V/m]	Average [dB μ V/m]
30 MHz–230 MHz	50	—
230 MHz–1 GHz	57	—
1 GHz–3 GHz	—	56
3 GHz–6 GHz	—	60

Particolare attenzione è riservata ai convertitori statici (inverter, alimentatori), che rappresentano una fonte significativa di disturbi EMI.

2.4.4 Parte 4 – Emissioni e immunità delle apparecchiature fisse (*BS EN 50121-4*)

La quarta parte riguarda le apparecchiature fisse installate lungo la linea ferroviaria, come segnali, dispositivi di comando e controllo, sensori e SCADA. Essa stabilisce i requisiti EMC sia in termini di emissioni che di immunità per tali apparecchiature, che spesso operano in ambienti severi, con elevate correnti e tensioni. [11]

I test principali includono:

- Prove di immunità a impulsi di modo comune e differenziale.
- Emissioni irradiate e condotte verso la rete di alimentazione e i segnali di controllo.
- Resistenza a disturbi provenienti dal materiale rotabile o da sottosistemi di trazione.

Le apparecchiature devono inoltre rispettare i requisiti di isolamento galvanico e protezione contro le sovratensioni, in conformità con la BS EN 50124.

2.4.5 Parte 5 – Classificazione dell’ambiente ferroviario (*BS EN 50121-5*)

L’ultima parte della norma fornisce una classificazione degli ambienti elettromagnetici ferroviari. Essa aiuta a determinare il corretto livello di severità per le prove di immunità e a selezionare le strategie progettuali più adeguate. [12]

Gli ambienti sono classificati in base a:

- Prossimità al sistema di trazione (es. zona binari, cabine di comando, sottostazioni).

- Tipologia di sistema ferroviario (alta velocità, tram, metropolitana, linea suburbana).
- Livelli di disturbo misurati o previsti, secondo criteri statistici.

Vengono inoltre fornite raccomandazioni per l'installazione e il cablaggio dei sistemi, al fine di ridurre il rischio di accoppiamento elettromagnetico e facilitare la compatibilità tra sottosistemi differenti.

2.4.6 Conclusione

L'applicazione corretta della serie *BS EN 50121* è fondamentale per garantire il funzionamento affidabile e sicuro dei sistemi ferroviari moderni. La crescente digitalizzazione del materiale rotabile, l'adozione di tecnologie a semiconduttore e la presenza di infrastrutture complesse rendono indispensabile un approccio sistemico alla compatibilità elettromagnetica. Ogni sottosistema deve essere progettato non solo per funzionare in modo autonomo, ma anche per convivere armoniosamente con gli altri componenti, riducendo al minimo le emissioni e massimizzando l'immunità ai disturbi.

2.5 La norma BS EN IEC 61373: Prove di vibrazione e urto per apparecchiature ferroviarie

La norma **BS EN IEC 61373** definisce i requisiti e le procedure per le prove di vibrazione e urto applicabili alle apparecchiature elettriche, elettroniche e meccaniche destinate ad essere installate su veicoli ferroviari. Essa ha lo scopo di garantire che i dispositivi siano in grado di resistere agli sforzi dinamici tipici dell'ambiente ferroviario durante la loro vita utile [13].

2.5.1 Scopo e campo di applicazione

La norma si applica a qualsiasi tipo di apparecchiatura destinata all'installazione su materiale rotabile, inclusi tram, metropolitane, treni suburbani, regionali e ad alta velocità. Le prove prescritte simulano le sollecitazioni meccaniche che l'apparecchiatura può incontrare durante l'esercizio normale, compresi:

- Vibrazioni casuali causate dal moto del veicolo sul binario;
- Urti accidentali derivanti da manovre o impatti;
- Sollecitazioni meccaniche derivanti da frenate, accelerazioni e deformazioni strutturali.

2.5.2 Categorie di montaggio

La norma classifica le apparecchiature in tre categorie principali in base alla posizione e alle modalità di montaggio:

1. **Categoria 1:** Equipaggiamenti montati su carrelli (sottoposti a sollecitazioni più intense);
2. **Categoria 2:** Equipaggiamenti montati sul corpo veicolo (condizioni meno severe rispetto alla categoria 1);
3. **Categoria 3:** Equipaggiamenti montati all'interno della cabina o del vano tecnico (livelli di vibrazione significativamente inferiori).

2.5.3 Prove di vibrazione

La norma prescrive l'utilizzo di prove di vibrazione **casuali** (random vibration) piuttosto che sinusoidali, in quanto maggiormente rappresentative del reale spettro di vibrazioni registrato sui veicoli ferroviari. Ogni asse (X , Y , Z) deve essere testato indipendentemente.

Esempio di profilo di vibrazione random per la Categoria 1 (carrello):

Tabella 2.5: Profilo di vibrazione - Categoria 1 (Carrello)

Frequenza (Hz)	PSD (g^2/Hz)	Durata (min/asse)
5–10	da 0 a 0.02	20
10–150	0.02	
150–500	da 0.02 a 0	

L'area sotto la curva di densità spettrale fornisce il valore complessivo di accelerazione RMS, tipicamente 1.04 g per Categoria 1.

2.5.4 Prove di urto (shock test)

Le prove d'urto simulano eventi transitori ad alta energia, come impatti o movimenti bruschi. Vengono utilizzati impulsi di forma semisinusoidale, generalmente con durata di 30 ms e ampiezza variabile in funzione della categoria:

- **Categoria 1:** 50 m/s^2 (5 g)
- **Categoria 2:** 30 m/s^2 (3 g)
- **Categoria 3:** 15 m/s^2 (1.5 g)

Ogni asse deve essere testato per tre impulsi in ciascuna direzione (positiva e negativa), per un totale di 18 urti.

2.5.5 Criteri di accettazione

Durante e dopo le prove, il dispositivo in esame deve:

- Mantenere la propria funzionalità operativa;
- Non presentare danni meccanici permanenti;
- Non mostrare disconnessioni elettriche o disturbi critici;
- Rispettare le tolleranze meccaniche previste.

2.5.6 Rilevanza per la progettazione

La norma BS EN IEC 61373 è fondamentale per la certificazione di dispositivi ferroviari [13]. Essa:

- Guida la progettazione meccanica e il fissaggio dei componenti;
- Definisce vincoli ambientali utili per i test di laboratorio;
- È spesso richiesta per l'omologazione di sistemi di bordo da parte degli operatori ferroviari.

2.5.7 Conclusioni

Il rispetto della norma BS EN IEC 61373 assicura che i dispositivi siano idonei a resistere alle condizioni operative reali presenti a bordo dei veicoli ferroviari. La corretta implementazione delle prove di vibrazione e urto è un passaggio chiave per la sicurezza, l'affidabilità e la durabilità dei sistemi elettronici ferroviari, inclusi contatori intelligenti, sensori, convertitori e unità di controllo.

2.6 La norma ***BS EN 50343:2024***: regole per l'installazione dei cablaggi sui rotabili

La norma **BS EN 50343:2024**, pubblicata il 31 ottobre 2024, sostituisce la precedente versione 2014 con emendamento A1:2017. Essa stabilisce i requisiti minimi per il cablaggio elettrico (cavi, canaline, busbar, terminazioni) all'interno di veicoli ferroviari (rotabili, tram, metropolitane, filobus a guida automatica, sistemi di levitazione magnetica), con rigore progettuale volto a garantire sicurezza elettrica, funzionalità, durata e conformità EMC nel tempo [14].

2.6.1 Scopo e campo di applicazione

La norma riguarda tutti i cablaggi che collegano componenti elettrici dei veicoli (a trazione, controllo, segnalazione), fatta eccezione per sistemi speciali come fibre ottiche o guide d'onda. Sono esclusi mezzi stradali non ferroviari, come tram estivi, funivie, veicoli ad uso minerario e automobili. Essa si colloca in sinergia con norme come EN 50264, EN 50306, EN 50382 e EN 50355.

2.6.2 Aggiornamenti rispetto al 2014

La revisione 2024 introduce cambiamenti rilevanti:

- Aggiornamento e armonizzazione dei riferimenti a standard EN/IEC;
- Integrazione dei requisiti relativi all'**IEC 62995**, per l'indice di vita utile dei cavi;
- Nuovi dettagli sui requisiti meccanici, incluse flessioni e ancoraggi;
- Introduzione del calcolo della vita utile dei materiali tramite *Arrhenius model*.

2.6.3 Materiali, dimensionamento e criteri di scelta

I materiali conduttori previsti sono in rame, con isolamento e schermature resistenti a vibrazioni, umidità, oli e atmosfera salina. La sezione minima dei cavi è calcolata in funzione della corrente permanente, del corto circuito e degli effetti termici, considerati nell'Annex A (es. temperatura ambiente, durata di guasto). Le linee guida basate sull'equazione di Arrhenius permettono di stimare la vita nominale, compensando l'invecchiamento accelerato.

2.6.4 Requisiti meccanici e fissaggio

I sistemi di giunzione (fascette, morsetti, staffe) devono resistere a vibrazioni CA/CC e urti conformi a IEC 61373. Il fissaggio deve essere tale da prevenire abrasioni, allentamenti o stress sui conduttori durante l'intera vita operativa del veicolo.

2.6.5 Compatibilità EMC e schermature

È richiesta la continuità schermata per tutti i conduttori di potenza e segnale. Le schermature devono essere collegate al telaio con bassa impedenza, per garantire protezione da disturbi elettromagnetici e rispetto alle norme EN 50121-3-2 (materiale rotabile) e EN 50121-4 (infrastruttura fissa).

2.6.6 Resistenza al fuoco e marcature

Secondo EN 45545-5, i materiali devono raggiungere almeno HL2 (o HL3 se specificato), in condizioni operative di temperatura da $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Le impugnature, connessioni, morsetti e fascette devono essere etichettati con codici identificativi per facilitare manutenzione, sicurezza e tracciabilità.

2.6.7 Verifiche e collaudo

Le procedure di collaudo prevedono:

- Ispezione visiva del percorso dei cavi, evitando tensioni e strozzature;
- Misura della resistenza di isolamento ($> 100\text{ M}\Omega$);
- Prova elettrica di tenuta a 1 kV DC per 60 s ;
- Test di continuità schermatura ($< 100\text{ m}\Omega$).

2.6.8 Implicazioni per lo smart meter tranviario

Per l'integrazione sui tram torinesi:

- i cavi verso sensori e alimentatori dovranno avere schermature coassiali schermate anch'esse al telaio;
- il dimensionamento seguente la norma EN 50343 garantisce una vita utile > 25 anni a $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ nominali;
- le prove di collaudo rientrano nei test EMC già previsti per smart meter conformi a EN 50121-3-2.

2.7 La norma CEI EN 61180:2016 – Tecniche di prova ad alta tensione per apparecchiature a bassa tensione

La norma **CEI EN 61180:2016** specifica le tecniche di prova dielettrica ad alta tensione per apparecchiature elettriche a bassa tensione (fino a 1 kV AC o $1,5\text{ kV DC}$). L'obiettivo è garantire la sicurezza e l'affidabilità elettrica attraverso prove sistematiche di tipo e di routine [15].

2.7.1 Ambito e campo di applicazione

Questa norma si applica a:

- Prove dielettriche con tensione continua (DC);
- Prove dielettriche con tensione alternata (AC);
- Prove dielettriche con tensione impulsiva (impulse voltage);
- Apparecchiature di prova e dispositivi di misura schermati per misure ad alta tensione su prodotti fino a 1 kV AC / 1,5 kV DC.

Il testo chiarisce che non è progettata per prove di compatibilità elettromagnetica (EMC): gli impulsi misti tensione/corrente sono disciplinati da altre norme, come IEC 61000-4-5 [15].

2.7.2 Terminologia e definizioni

Fornisce un vocabolario unificato comprendente:

- Definizione di *tensione nominale*, *tensione di prova*, *tensione d'irradiazione*;
- Differenziazione tra prove di tipo (più severe, su campioni scelti) e prove di routine (su tutti gli esemplari);
- Distinzione tra *resistenza dielettrica* e *tenuta dielettrica*.

2.7.3 Requisiti generali per i test

La norma definisce:

- Condizioni ambientali di prova: temperatura, umidità, pressione e correzioni necessarie (csi. Annex C sul fattore ambientale);
- Margini di incertezza metrologica ammessi, coerenti con IEC Guide 98-3;
- Requisiti minimi per generatori ad alta tensione e misuratori schermati, inclusa la coerenza dei sistemi di schermatura e controllo [15].

2.7.4 Generazione e misura delle tensioni di prova

La norma descrive le misure per:

- Tensione continua: applicazione graduale per testare la resistenza nel tempo;
- Tensione alternata: salti di tensione a frequenza di rete o 50/60 Hz;

- Impulsi: forma onda 1,2/50 μ s con generatori specializzati.

Tutti i generatori devono essere protetti e schermati per evitare interferenze e garantire misure affidabili [15].

2.7.5 Procedure di prova: tipo e routine

Prova di tipo Eseguita su campioni selezionati, seguendo differenti strategie:

- *Test di tenuta*: applicazione della tensione nominale più un margine (es. $1,5 \times U_n$) per un periodo determinato;
- *Test impulsivi*: dosaggio di impulsi di tensione con forma 1,2/50 μ s, ripetuti e controllati.

Prova di routine Ogni singolo dispositivo viene sottoposto a prova di tenuta (test DC/AC) seguendo una forma semplificata e tempi ridotti.

2.7.6 Misurazione e incertezza

Viene definito l'uso di sistemi di misura schermati e l'applicazione delle linee guida del Guide IEC 98-3 sul calcolo dell'incertezza, includendo contributi da ambiente, strumenti e ripetibilità.

2.7.7 Attrezzature conformi

Richieste:

- Generatore di alta tensione e misuratori a differenziale con schermatura DC/AC;
- Doppio equipaggio schermato per evitare accoppiamenti parassiti;
- Verifica periodica dell'accuratezza e della linearità del sistema.

2.7.8 Criteri di accettazione

Superamento della tensione di prova senza scariche visibili o errori di misura; nessun guasto sotto tensione nominale + margine.

2.7.9 Applicazioni pratiche per lo smart meter

Per lo smart meter tranviario, conforme a CEI EN 61180:

- Tensione DC di tenuta: $1,5U_n$, per 60 s;
- Impulsi $1,2/50 \mu s$ sovrastati alla tensione nominale per simulazioni di transitori;
- Strumentazione di prova conforme, con schermatura continua fino al livello specificato.

—

2.8 Analisi normativa preliminare e approccio sperimentale

In fase preliminare alla progettazione dello *Smart Meter* (SM), è stata condotta un'attenta ricerca e analisi delle normative tecniche applicabili al fine di garantire la conformità del dispositivo agli standard richiesti per le installazioni ferroviarie. Questo processo si è rivelato cruciale, data la natura altamente regolamentata del settore ferroviario e il rigore con cui vengono stabiliti i requisiti di sicurezza, affidabilità e compatibilità elettromagnetica per tutti gli apparati elettrici destinati ad essere installati a bordo treno.

Le norme tecniche prese in considerazione includono, ma non si limitano a, quelle relative al coordinamento dell'isolamento, alla resistenza alle vibrazioni meccaniche, alla compatibilità elettromagnetica (EMC), alla sicurezza elettrica, nonché alla gestione delle sovratensioni e alla protezione dei circuiti. La scelta e l'interpretazione di tali norme sono state guidate da una valutazione approfondita delle condizioni ambientali, elettriche e operative cui il dispositivo sarebbe stato sottoposto durante il servizio.

Durante questo processo, è stato identificato un potenziale ostacolo: le prove previste per la certificazione di dispositivi destinati all'ambiente ferroviario risultano particolarmente severe, sia in termini di costi che di tempi di esecuzione, rendendo difficoltosa la validazione rapida di prototipi in fase iniziale.

Per affrontare tale problematica in modo pragmatico e ottenere un riscontro reale sul funzionamento del sistema, è stato avviato un confronto tecnico con l'azienda GTT (Gruppo Torinese Trasporti), responsabile della gestione della rete tranviaria torinese. A seguito di un incontro tecnico con i referenti aziendali, è stato concordato un approccio sperimentale, che ha previsto un parziale rilassamento dei criteri di prova per l'installazione provvisoria del prototipo. In particolare, è stato stabilito che il dispositivo potesse essere installato in ambito controllato, su un veicolo in servizio non commerciale, con l'obiettivo di validare le funzionalità

essenziali del sistema e raccogliere dati utili in vista dell'ottimizzazione del progetto per la successiva fase di certificazione completa.

Questa strategia consente di ottenere un'importante validazione sul campo, riducendo significativamente i tempi e i costi associati allo sviluppo iniziale, pur mantenendo un'aderenza di massima ai requisiti normativi fondamentali. In tale contesto, il dispositivo opera in condizioni operative reali, permettendo di monitorare le prestazioni del sistema di misura, la resistenza alle sollecitazioni ambientali e il comportamento elettrico dell'elettronica di potenza impiegata.

L'esperienza acquisita durante questa fase sperimentale costituirà la base per la successiva industrializzazione del prodotto, nella quale verrà garantito il pieno rispetto di tutte le prescrizioni previste dalle norme applicabili, in vista dell'ottenimento della certificazione ufficiale e della messa in produzione su scala industriale.

Capitolo 3

Stato dell'arte dei sistemi di misura tranviari

3.1 Introduzione

Negli ultimi decenni, il concetto di *Smart Metering* ha assunto un ruolo sempre più centrale nella gestione intelligente dell'energia, con l'obiettivo di migliorare l'efficienza dei sistemi elettrici, ridurre gli sprechi e abilitare nuove forme di monitoraggio remoto e manutenzione predittiva. Gli *Smart Meter* (SM), o contatori intelligenti, sono dispositivi elettronici che integrano capacità di misura, comunicazione, elaborazione dati e, in alcuni casi, controllo attivo delle utenze. Il loro impiego si è rapidamente diffuso in ambito residenziale e industriale, trovando successivamente applicazione anche nei settori critici come quello ferroviario.

3.2 Evoluzione dei sistemi di misura

Tradizionalmente, la misura dell'energia elettrica nelle reti di distribuzione avveniva tramite contatori elettromeccanici, basati su principi magnetici e rotativi. L'avvento dell'elettronica ha progressivamente sostituito tali dispositivi con soluzioni digitali, in grado di fornire misure più precise e affidabili, e soprattutto in grado di dialogare con sistemi informatici esterni.

La generazione attuale di Smart Meter è caratterizzata da una forte integrazione tra sensori, microcontrollori, moduli di comunicazione (es. LoRa, NB-IoT, ZigBee, 4G), sistemi di memorizzazione dei dati, e interfacce di rete. Questi dispositivi non si limitano a misurare energia attiva e reattiva, ma possono fornire informazioni dettagliate sul profilo di carico, qualità della tensione, frequenza delle interruzioni e altri parametri diagnostici fondamentali.

3.3 Applicazione in ambito ferroviario

Nel settore ferroviario, l'applicazione degli Smart Meter presenta peculiarità e complessità specifiche legate alle condizioni operative gravose e alla necessità di garantire affidabilità in ambienti ad alta variabilità elettrica, come nel caso delle reti a corrente continua (es. 600 V DC).

In questi contesti, lo Smart Meter deve essere in grado di:

- Misurare tensione, corrente e potenza in tempo reale in presenza di transitori e disturbi ad alta frequenza.
- Operare in ambienti con elevata vibrazione e shock meccanici (conformità alla BS EN IEC 61373).
- Garantire l'isolamento elettrico tra i circuiti ad alta tensione e l'elettronica di misura (conformità a BS EN 50124).
- Resistere a condizioni ambientali estreme (temperatura, umidità, inquinamento conduttivo).
- Fornire dati diagnostici per la manutenzione predittiva e l'ottimizzazione energetica del parco veicoli.

3.4 Limiti delle soluzioni esistenti: assenza di veri *Smart Meter* per l'ambito ferroviario

Nonostante il concetto di *Smart Meter* sia ormai consolidato in ambito civile e industriale, la sua trasposizione nel contesto ferroviario, in particolare su veicoli leggeri come tram o metropolitane, risulta ancora largamente inesplorata. La maggior parte dei dispositivi oggi disponibili sul mercato sono classificabili come *energy meter*, ovvero strumenti destinati principalmente alla misura dell'energia elettrica ai fini della fatturazione. Questi dispositivi, pur rispettando rigorose norme metrologiche e garantendo elevata precisione, risultano inadeguati rispetto agli obiettivi più ampi di monitoraggio, diagnostica e controllo richiesti nei moderni scenari di mobilità urbana intelligente.

3.4.1 Funzionalità limitate all'ambito contabile

I contatori energetici attualmente certificati, sono progettati con un unico scopo: garantire la tracciabilità e la correttezza della misura dell'energia attiva consumata. Per raggiungere tale obiettivo, essi implementano:

- Catene di misura calibrate per la sola energia attiva;

- Memorie sigillate per impedire manomissioni;
- Interfacce dati spesso chiuse o proprietarie;
- Nessuna o limitata capacità di acquisizione in tempo reale o gestione eventi transitori.

Queste caratteristiche, seppur ideali in contesti statici di fornitura elettrica convenzionale, risultano insufficienti per un uso in campo ferroviario, dove la rete di trazione è soggetta a rapide fluttuazioni, sovratensioni temporanee, disturbi EMI e condizioni ambientali aggressive. Il contesto applicativo, inoltre, richiede misure sincrone, rilevamento di eventi transitori, capacità di auto-diagnostica e registrazione continua dei dati per fini di manutenzione predittiva e analisi delle prestazioni di bordo.

3.4.2 Assenza di capacità evolute di misura e controllo

Nel contesto del progetto trattato in questa tesi, lo Smart Meter viene concepito non solo come un dispositivo per la misura dell'energia, ma come un nodo intelligente della rete ferroviaria. Le funzionalità richieste includono:

- Misura di corrente, tensione, energia attiva e rigenerativa, potenza istantanea, sfasamenti;
- Riconoscimento e classificazione degli eventi anomali (sovratensioni, interruzioni, armoniche);
- Logging ad alta risoluzione e sincronizzazione temporale;
- Interfacce aperte per la trasmissione dati su reti LoRa, Wi-Fi, Ethernet;
- Supporto alla manutenzione predittiva attraverso modelli di degrado;
- Capacità di calcolo a bordo per algoritmi di analisi in tempo reale.

A oggi, non esistono sul mercato dispositivi standard che integrino tutte queste funzionalità in un unico sistema conforme agli standard ferroviari. In particolare, è assente l'integrazione con strumenti di modellazione virtuale (Digital Twin), che consentano una rappresentazione dinamica del comportamento elettrico del mezzo in condizioni operative reali.

3.4.3 Barriere normative e progettuali

Un ulteriore ostacolo alla diffusione di veri *smart meter ferroviari* è rappresentato dalla complessità normativa. Il rispetto simultaneo delle norme IEC/EN relative a:

- Sicurezza elettrica (BS EN 61010-1, BS EN 50124-1/-2),
- Compatibilità elettromagnetica (BS EN 50121-3-2),
- Prove ambientali e meccaniche (BS EN 61373, BS EN 60068),
- Interoperabilità e comunicazione,

implica sfide progettuali e ingegneristiche che vanno ben oltre il semplice conteggio dell'energia.

3.4.4 Motivazione allo sviluppo di una soluzione dedicata

Alla luce delle criticità sopra esposte, il presente lavoro di tesi ha ritenuto necessario lo sviluppo di un dispositivo dedicato, progettato specificamente per le reti di trazione in corrente continua e orientato a soddisfare le esigenze di monitoraggio avanzato a bordo mezzo. Il dispositivo proposto, denominato *Smart Meter tranviario*, nasce come strumento di sperimentazione ma con possibilità di futura industrializzazione. Esso si distingue dalle soluzioni esistenti per:

- Miniaturizzazione dei sistemi e riduzione dei consumi.
- Flessibilità architettuale,
- Conformità agli standard ferroviari,
- Apertura verso future espansioni software (edge computing, AI),
- Maggiore interoperabilità con i sistemi SCADA e di controllo flotte.
- Capacità di integrazione in scenari di Smart City e Digital Twin.

3.5 Confronto tra Energy Meter Tradizionale e Smart Meter Ferroviario

Nella progettazione del dispositivo di misura presentato in questa tesi, si è reso necessario distinguere chiaramente tra i contatori di energia tradizionali, comunemente utilizzati a fini di fatturazione, e i requisiti funzionali richiesti per un vero e proprio *smart meter* destinato all'ambiente ferroviario.

I primi, infatti, sono dispositivi pensati esclusivamente per garantire precisione nella contabilizzazione dell'energia elettrica consumata, senza però offrire funzionalità diagnostiche avanzate, resistenza a condizioni ambientali estreme o capacità di integrazione nei moderni sistemi digitali. Al contrario, il sistema sviluppato ha lo scopo di fornire un monitoraggio continuo e dinamico della rete di bordo, supportando anche funzionalità predittive e diagnostiche.

La tabella 3.1 riassume le principali differenze tra un energy meter tradizionale e lo smart meter ferroviario proposto, evidenziando le lacune dei sistemi esistenti rispetto agli obiettivi perseguiti in questo progetto.

Tabella 3.1: Confronto tra Energy Meter Tradizionale e Smart Meter Ferroviario Proposto

Caratteristica	Energy Meter Tradizionale	Smart Meter Ferroviario Proposto
Finalità principale	Misura per la fatturazione	Monitoraggio, diagnostica, integrazione sistemi
Grandezze misurate	Energia attiva (kWh)	Tensione, corrente, energia attiva/reactiva, potenza istantanea, armoniche
Frequenza di campionamento	Bassa (tipicamente 1 ogni 15 min)	Alta (fino a centinaia di Hz per eventi rapidi)
Resistenza ambientale	Solo uso indoor o in quadri	Certificato per urti, vibrazioni, polveri, umidità (IEC 61373)
Protezione contro disturbi EMI	Limitata, uso industriale	Compatibile EMC ferroviaria (EN 50121-3-2)
Sincronizzazione temporale	Non prevista	Presente (es. tramite RTC o GPS)
Registrazione eventi transitori	Assente	Presente (log di eventi e forme d'onda)
Comunicazione	Proprietaria o limitata (es. Modbus)	Interfacce aperte (LoRa, Wi-Fi, CAN, MQTT)
Capacità computazionale	Nulla o minima	Embedded system con analisi edge (es. ARM Cortex)
Conformità a norme ferroviarie	No	Progettato secondo EN 50124, EN 61373, EN 50121
Flessibilità architetturale	Bassa (sistema chiuso)	Alta (modulare, aggiornabile)
Supporto Digital Twin	Assente	Compatibile con sistemi di simulazione e digitalizzazione

Come evidenziato nella tabella, il sistema sviluppato si differenzia nettamente per versatilità, robustezza e capacità di integrazione rispetto agli energy meter tradizionali. Questo rafforza la necessità di una nuova generazione di strumenti di misura per applicazioni ferroviarie, capaci non solo di quantificare l'energia consumata ma anche di supportare attivamente la manutenzione predittiva, la diagnostica di rete e l'integrazione con architetture digitali complesse.

3.6 Conclusioni

Lo stato dell'arte degli Smart Meter mostra un'evoluzione significativa sia a livello tecnologico che funzionale. In ambito ferroviario, la progettazione di dispositivi dedicati richiede un'attenta considerazione dei vincoli normativi, ambientali ed elettrici. In conclusione, sebbene esistano oggi numerosi energy meter avanzati, nessuno di essi può essere definito a tutti gli effetti un vero e proprio *smart meter* per applicazioni ferroviarie. La ricerca presentata in questa tesi si propone quindi di colmare tale lacuna, fornendo una soluzione progettata ad hoc che unisce precisione metrologica, robustezza ambientale, capacità di comunicazione e intelligenza distribuita, aprendo la strada a nuove forme di gestione intelligente delle reti di trazione urbana.

Capitolo 4

Progettazione del Dispositivo Smart Meter

4.1 Introduzione

La progettazione del dispositivo rappresenta il cuore dell'intero lavoro di tesi, poiché traduce in soluzioni concrete i requisiti funzionali, ambientali e normativi individuati nei capitoli precedenti. Il dispositivo, concepito come *smart meter* per applicazioni ferroviarie, è stato sviluppato tenendo conto delle sfide tecniche poste dall'ambiente d'esercizio, delle caratteristiche elettriche tipiche delle reti di bordo, nonché delle prescrizioni imposte dalle normative vigenti, in particolare dalla serie BS EN 50463, EN 50121 e BS EN 50124.

L'obiettivo principale di questo capitolo è illustrare il processo di design che ha guidato la realizzazione dell'apparato, descrivendo in dettaglio sia le scelte architettoniche che quelle circuitali. Verranno presentati il layout funzionale generale, la selezione dei componenti critici (sensori, microcontrollore, sistemi di comunicazione, protezioni), le modalità di acquisizione dei segnali elettrici e le strategie implementate per garantire robustezza, affidabilità e interoperabilità del sistema.

Particolare attenzione è stata posta anche alla flessibilità e scalabilità del dispositivo, con l'intento di garantire aggiornabilità futura e compatibilità con i paradigmi di monitoraggio avanzato e manutenzione predittiva, nonché l'integrazione in contesti digitali più ampi come i sistemi SCADA o le architetture di tipo *Digital Twin*.

Nel seguito del capitolo, ogni sottosistema verrà analizzato separatamente, motivando le scelte progettuali, documentando le simulazioni svolte e le verifiche normative eseguite. L'approccio seguito unisce rigore tecnico e praticità ingegneristica, con l'obiettivo di ottenere un dispositivo prototipale affidabile, ripetibile e conforme agli standard ferroviari.

4.2 Scelta dei veicoli di riferimento: Serie 5000 e 6000 GTT

Per la fase di test e validazione del prototipo, in collaborazione con GTT (Gruppo Torinese Trasporti), sono stati selezionati come contesto applicativo i veicoli tranviari delle serie 5000 e 6000, attualmente in esercizio sulla rete urbana di Torino.

I tram serie 5000 (FIAT/Alstom) e serie 6000 (Alstom Cityway) presentano caratteristiche tecniche rilevanti per la definizione dei parametri di progetto:

- Tensione di alimentazione nominale di 600 V in corrente continua (DC), con possibili variazioni transitorie fino a 900 V e temporanee fino a 750 V secondo EN 50163.
- Presenza di motori a trazione asincroni con inverter di potenza, che introducono disturbi elettrici significativi sulla rete di trazione.
- Configurazioni multiple di carico dinamico, frenatura rigenerativa e avviamenti simultanei.
- Spazi limitati per l'installazione di dispositivi ausiliari, impattando sulla scelta dei formati e sul raffreddamento passivo.

La scelta di queste due serie è motivata dalla disponibilità tecnica, dalla loro diffusione sulla rete e dalla possibilità di acquisire dati reali per il collaudo funzionale. In particolare, la motrice serie 6000 rappresenta un riferimento significativo per lo studio delle condizioni elettriche gravose, grazie alla presenza di 12 motori asincroni alimentati da inverter dedicati, e dotata di sistemi di frenatura rigenerativa.

4.3 Vincoli di progetto

Nel processo di progettazione dello smart meter destinato all'installazione a bordo di veicoli tranviari, è stato necessario considerare una serie di vincoli che influenzano le scelte architettoniche, meccaniche ed elettriche. Tali vincoli derivano sia dalle caratteristiche operative dei tram di riferimento, sia dai requisiti imposti dalle normative tecniche di settore, pur con una certa flessibilità dovuta alla natura prototipale del dispositivo.

4.4 Posizionamento dello Smart Meter nella serie 6000

L'individuazione del corretto punto di installazione dello smart meter è una fase fondamentale per garantire l'accuratezza della misura e la sicurezza del dispositivo. Nel caso specifico dei veicoli tranviari serie 6000 in servizio a Torino, si è optato per una posizione che fosse facilmente accessibile per operazioni di manutenzione, prossima ai punti di misura di tensione e corrente, e protetta rispetto a vibrazioni, umidità e interferenze elettromagnetiche.

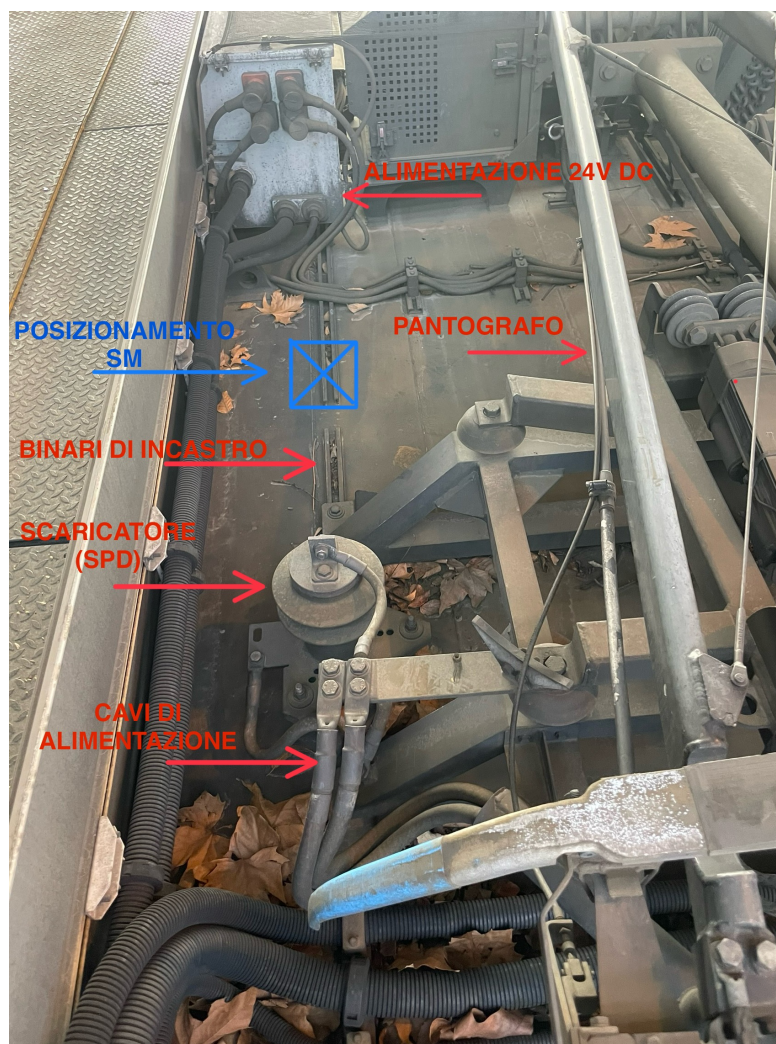


Figura 4.1: Posizione prevista per lo smart meter nella cassa motrice del tram serie 6000

La figura 4.1 mostra, all'esterno della cassa motrice del tram, l'esatta collocazione prevista per lo smart meter, evidenziando le connessioni ai cavi di alimentazione e al circuito di ritorno, nonché la distanza di sicurezza da altri componenti ad alta tensione.

La scelta di questa posizione è frutto di un compromesso tra esigenze impiantistiche, accessibilità e conformità ai vincoli normativi in materia di sicurezza elettrica ed elettromagnetica. Inoltre, la vicinanza ai punti di misura consente di ridurre gli errori dovuti alla lunghezza dei cavi e ai disturbi, rendendo la soluzione adottata ottimale per il prototipo in fase di sperimentazione.

4.5 Vincoli normativi per prototipi: Isolamento, Sicurezza Elettrica ed EMC

Anche se il dispositivo è stato concepito in versione prototipale, la sua installazione a bordo veicolo richiede il rispetto di alcuni fondamentali requisiti normativi, in particolare legati all'isolamento elettrico, alla sicurezza e alla compatibilità elettromagnetica.

Le principali norme tecniche di riferimento considerate sono le seguenti:

- **BS EN 50124-1:2017 e 50124-2:2017:** definiscono i requisiti di isolamento per apparecchiature elettriche nei sistemi ferroviari, considerando le distanze di sicurezza (clearance, creepage), i profili di sovratensione, i gradi di inquinamento e le categorie di sovratensione. È stato applicato il *Pollution Degree 4* e *Overvoltage Category III*, con riferimento alla tensione nominale di 600 V DC e 1500 V DC.
- **BS EN IEC 61373:2010:** specifica le prove di vibrazione e urto meccanico per apparecchiature montate su veicoli ferroviari. Anche se non obbligatoria per il prototipo, la norma è stata consultata per definire le sollecitazioni attese.
- **BS EN 50121 (serie):** regola la compatibilità elettromagnetica (EMC) nei sistemi ferroviari. Le parti 3-2 e 4 sono state particolarmente rilevanti per garantire che il dispositivo non generi disturbi verso altri apparati sensibili e sia immune a perturbazioni ambientali, in particolare per quanto riguarda le emissioni condotte e irradiate.
- **CEI EN 61180:** fornisce le tecniche di prova ad alta tensione per apparecchiature a bassa tensione. È stata utilizzata come riferimento per l'esecuzione di prove dielettriche di tipo 1,2/50 μ s (tensione impulsiva), al fine di verificare la tenuta all'isolamento.

Il rispetto anche parziale di queste norme, in accordo con il gestore GTT, ha consentito l'autorizzazione all'installazione sperimentale del prototipo per validarne le prestazioni in campo reale. Sono state concordate semplificazioni per alcune prove (ad es. prove EMC condotte in laboratorio su banco), mantenendo però intatti i requisiti minimi di sicurezza funzionale e protezione del personale operativo.

4.6 Componenti e architettura del progetto

La realizzazione del prototipo di *Smart Meter* per applicazioni tranviarie si fonda su una configurazione modulare, che garantisce flessibilità, affidabilità e aderenza alle normative ferroviarie vigenti. Ogni componente è stato selezionato in funzione delle specifiche esigenze legate alla misura elettrica ad alta tensione in ambienti critici, come quello di bordo veicolo. Di seguito vengono analizzati i principali sottosistemi che compongono l'architettura del dispositivo.

4.6.1 Divisore di tensione

Il campionamento della tensione di linea avviene mediante un divisore resistivo progettato per operare con tensioni continue nominali di 600 V e massime di 1500 V DC.

4.6.2 Dimensionamento del partitore resistivo

Nel sistema di misura della tensione, è stato adottato un partitore resistivo come metodo di attenuazione per portare il segnale ad un livello compatibile con l'ingresso della scheda di acquisizione. Considerando che quest'ultima ha un limite massimo di tensione in ingresso pari a 100 V, è stato definito un rapporto di divisione pari a 15, al fine di garantire un adeguato margine di sicurezza anche in presenza di picchi o fluttuazioni della tensione di rete.

Il partitore resistivo è composto da due resistenze in serie, denominate R_1 (resistenza superiore) e R_2 (resistenza inferiore). Il valore del rapporto di divisione è dato da:

$$\frac{V_{\text{in}}}{V_{\text{out}}} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} = 15$$

Da questa relazione si ricava:

$$R_1 = 14 \cdot R_2$$

La scelta dei valori assoluti delle resistenze è guidata da diversi criteri progettuali, tra cui:

- **Compatibilità con l'impedenza di ingresso del sistema di acquisizione:** il valore complessivo del partitore deve garantire che il carico visto dalla rete non alteri significativamente la misura.
- **Minimizzazione della potenza dissipata:** valori elevati delle resistenze riducono le perdite per effetto Joule.
- **Sicurezza e isolamento:** l'utilizzo di resistori ad alta tensione, isolati e con appropriato coefficiente di temperatura, è fondamentale per applicazioni ferroviarie.

Alla luce del vincolo di potenza massima dissipabile pari a 5 W, si è proceduto alla scelta dei valori delle resistenze R_1 ed R_2 in modo da rispettare sia il corretto rapporto di divisione (pari a 15), sia i limiti termici e funzionali imposti dalla scheda di acquisizione.

In particolare, per ottenere un rapporto di divisione di 15 e garantire che la tensione in ingresso alla scheda di acquisizione non superi i 100 V quando la tensione di linea è pari a 1,500 V, si è scelto di utilizzare una resistenza di alta tensione $R_1 = 420 \text{ k}\Omega$ e una resistenza di bassa tensione $R_2 = 30 \text{ k}\Omega$. In questa configurazione, il valore equivalente di R_2 risulta leggermente influenzato dall'impedenza di ingresso della scheda ($1 \text{ M}\Omega$), ma l'effetto sul rapporto di divisione è contenuto.

Il valore complessivo della resistenza totale è dunque:

$$R_{\text{tot}} = R_1 + R_2 = 450 \text{ k}\Omega$$

che, per una tensione applicata di 1,500 V, determina una corrente:

$$I = \frac{V}{R_{\text{tot}}} = \frac{1500}{450\,000} = 3.3 \text{ mA}$$

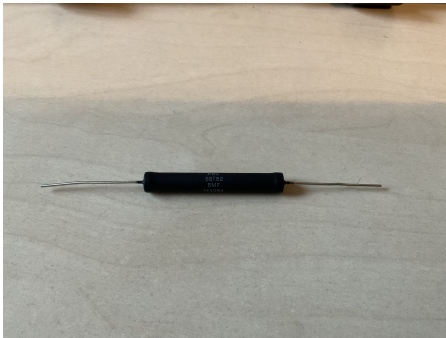
e una potenza dissipata complessiva pari a:

$$P = V \cdot I = 1500 \cdot 3.3 \cdot 10^{-3} = 5 \text{ W}$$

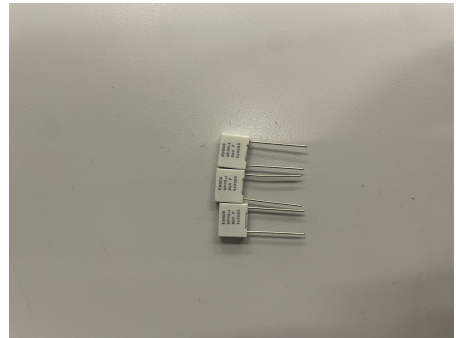
rispettando così il limite massimo di 5 W. In particolare, la potenza dissipata su R_1 è dominante rispetto a quella su R_2 , quindi si è fatto ricorso a resistenze ad alto valore di isolamento, con adeguato coefficiente termico e potenza nominale almeno pari a 2 W per ciascun componente (eventualmente in configurazione serie).

Questa scelta bilancia in modo efficace le esigenze di sicurezza, precisione e affidabilità del sistema di misura.

“ La scelta dei resistori è stata effettuata tenendo conto anche di una tolleranza inferiore all'1% per garantire la fedeltà della misura.



(a) Serie di resistenze utilizzate per lato alta tensione.



(b) Serie di resistenze utilizzate per lato bassa tensione.

Per garantire la protezione del dispositivo dalle sovratensioni transitorie, è installato uno *scaricatore di sovratensione* (SPD, Surge Protective Device) in testa alla linea di alimentazione. Questo componente ha la funzione di deviare verso terra le sovratensioni impulsive, come quelle causate da manovre di interruzione del carico o da eventi atmosferici (es. fulminazioni indirette), proteggendo così i circuiti elettronici a valle.

Lo scaricatore entra in conduzione solo quando la tensione supera una determinata soglia (tensione di clamping), limitando l'ampiezza dell'impulso che raggiunge il dispositivo. In condizioni normali, invece, presenta un'elevata impedenza, risultando trasparente al funzionamento del sistema. L'installazione dello scaricatore in prossimità del punto di ingresso della linea garantisce una protezione efficace e tempestiva, riducendo il rischio di danni agli apparati sensibili come il sistema di misura.

Nel contesto tranviario, in particolare, la presenza di carichi fortemente induttivi e l'interazione con la rete di trazione possono generare sovratensioni significative, rendendo necessario l'impiego di dispositivi SPD certificati secondo le norme CEI EN 61643 o equivalenti.

Per la realizzazione pratica del partitore resistivo, si è fatto ricorso ai componenti disponibili presso il laboratorio dell'Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRiM), ottimizzando l'utilizzo delle resistenze già in dotazione.

Non essendo disponibili resistenze singole con i valori esatti richiesti per R_1 ed R_2 , si è scelto di costruire i due rami del partitore attraverso opportune combinazioni in serie e/o parallelo di resistenze standard. Questa soluzione ha permesso di ottenere i valori equivalenti desiderati, garantendo al contempo la compatibilità elettrica e la robustezza meccanica dell'insieme.

In particolare, per il ramo ad alta tensione R_1 è stata realizzata una catena in parallelo di resistenze da 5 M Ω , ciascuna con potenza nominale di almeno 2 W, mentre per il ramo a bassa tensione R_2 si è optato per una combinazione in serie di due resistenze da 20 k Ω e 2 k Ω , ottenendo un valore equivalente prossimo a 30 k Ω .

Il montaggio è stato eseguito su una basetta isolante, con distanza sufficiente tra i componenti per soddisfare i requisiti di isolamento e ridurre il rischio di archi elettrici, secondo quanto indicato dalle normative applicabili.

Infine, è stato opportuno prevedere l'inserimento di una capacità in parallelo a R_2 per attenuare eventuali disturbi ad alta frequenza. Il segnale in uscita dal divisore viene quindi filtrato e indirizzato all'ingresso analogico del sistema di acquisizione.

4.6.3 Simulazioni operative del divisore resistivo

Prima della realizzazione fisica del partitore resistivo, sono state condotte due tipologie di simulazioni con l'obiettivo di valutare il comportamento elettrico e le

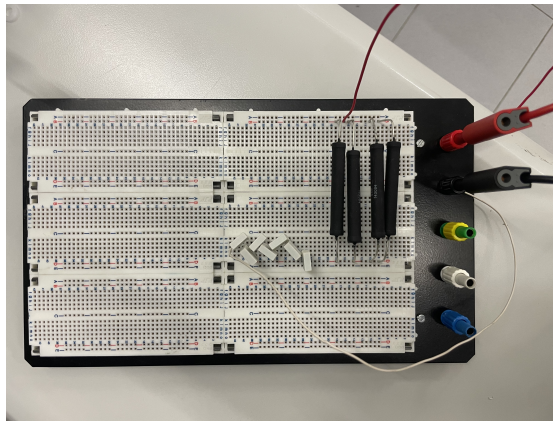


Figura 4.3: Basetta millefori per test in laboratorio.

condizioni elettromagnetiche del sistema durante il funzionamento.

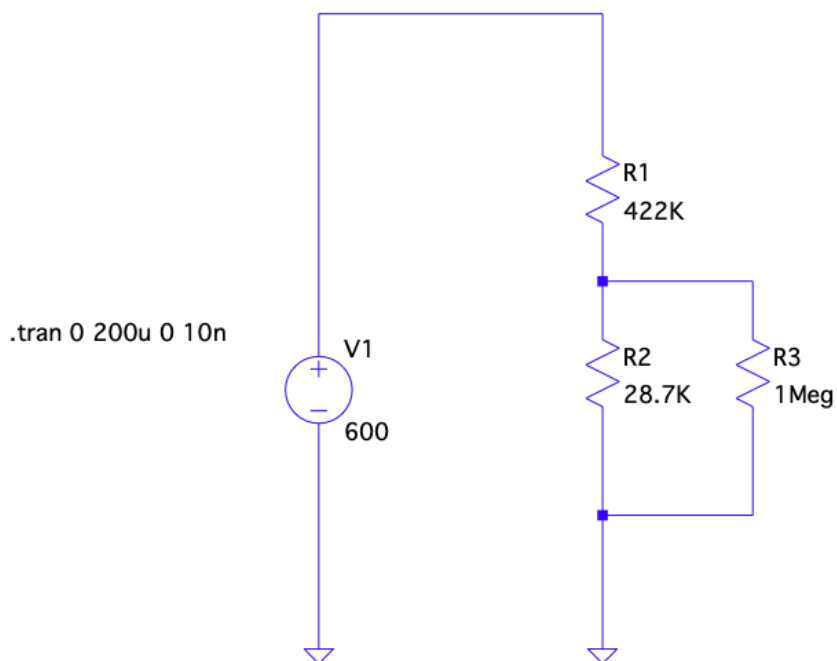
Simulazione circuitale in LTspice

La prima fase di simulazione è stata eseguita in ambiente LTspice, modellando il circuito del partitore resistivo con i valori reali delle resistenze selezionate. Lo scopo principale era verificare:

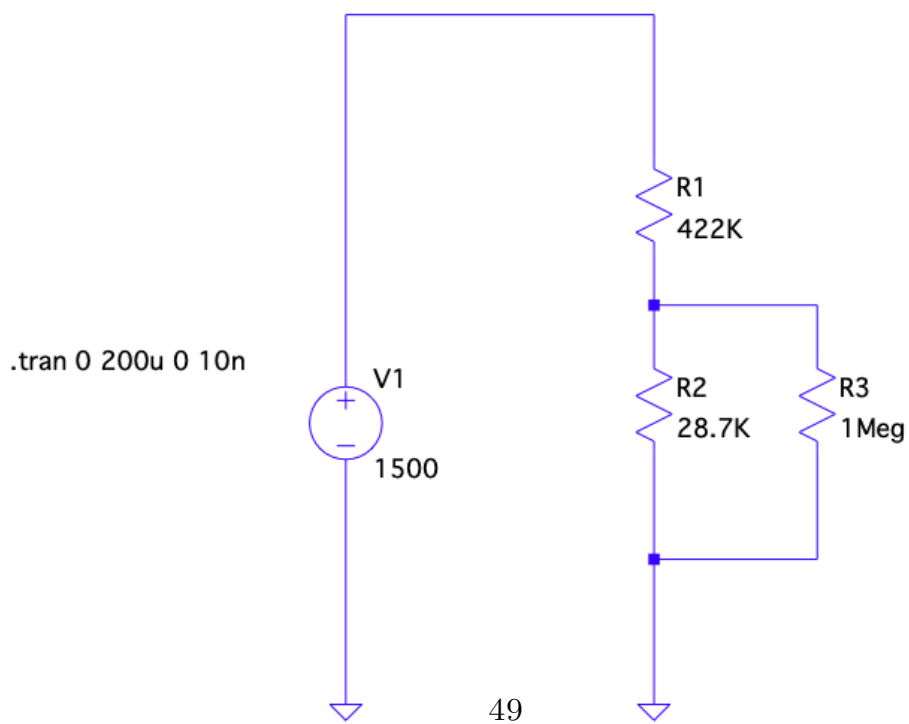
Modello di sorgente La tensione di ingresso al partitore è stata modellata come un generatore DC di valore costante 6001,500 V (componente V1);

Resistenze del partitore

- $R_1 = 422 \text{ k}\Omega$ (ramo superiore).
- $R_2 = 28.7 \text{ k}\Omega$ (ramo inferiore).
- $R_3 = 1 \text{ M}\Omega$, parallelo a R_2 , a modellare l'impedenza di ingresso della scheda di acquisizione.
- l'andamento della tensione d'uscita in funzione della tensione d'ingresso;



(a) Tensione V2 con V1=600V.



(b) Tensione V2 con V1=1500V.

4.6.4 Simulazione transiente del partitore resistivo con LTspice

Per verificare il comportamento dinamico del partitore resistivo e l'influenza dell'impedenza di ingresso ($1\text{ M}\Omega$) in parallelo a R_2 , è stata condotta una simulazione transiente in LTspice secondo lo schema riportato in figura.

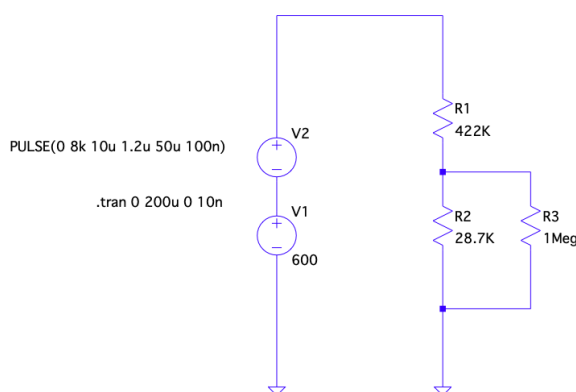


Figura 4.5: Circuito di simulazione in LTspice: partitore con $R_1 = 422\text{ k}\Omega$, $R_2 = 28.7\text{ k}\Omega$ e $R_3 = 1\text{ M}\Omega$ in parallelo a R_2 , sottoposto a un impulso di tensione.

Modello di sorgente La tensione di ingresso al partitore è stata modellata come somma di:

- un generatore DC di valore costante 600 V (componente V1);
- un generatore a impulsi definito con la direttiva `PULSE(0 8000 10u 1.2u 1.2u 50u 100n)` (componente V2), che genera un impulso da 0 V a $8,000\text{ V}$, con tempo di ritardo $10\text{ }\mu\text{s}$, fronti di salita e discesa di $1.2\text{ }\mu\text{s}$, durata dell'impulso $50\text{ }\mu\text{s}$ e periodo 100 ns .

Parametri di simulazione Il comando di analisi transiente è stato specificato come:

`.tran 0 200u 0 10n`

il che consente di simulare l'evoluzione del circuito per $200\text{ }\mu\text{s}$, salvando i punti di analisi ogni 10 ns .

Risultati attesi La simulazione permette di:

1. Verificare che, all'applicazione dell'impulso, il nodo di mezzo rimanga entro i 100 V di massima tensione d'ingresso alla scheda di acquisizione.
2. Valutare la risposta in frequenza grossolana del partitore, individuando eventuali ritardi o deformazioni dell'impulso introdotte dalle capacità parassite intrinseche.
3. Confermare che la presenza di R_3 non alteri significativamente il rapporto di divisione statico, ma fornisca un corretto caricamento del nodo di misura.

I risultati ottenuti hanno mostrato un'attenuazione stabile di 1:15 in condizioni DC e transienti, con picchi di tensione al nodo di misura inferiori a 95 V. Inoltre, non sono emerse oscillazioni o risonanze rilevanti, confermando la robustezza del dimensionamento anche in presenza dell'impedenza di ingresso della scheda.

Nella pratica, i componenti reali e il cablaggio introducono capacità parassite (e in misura minore induttanze parassite) che diventano significative ad alte frequenze. Queste capacità parassite, come la capacità tra i terminali dei resistori o la capacità verso massa, formano filtri RC passa-basso impliciti. l'influenza delle capacità parassite, introdotte nel modello mediante componenti capacitivi tra i nodi ad alta, bassa tensione e terra. Per calcolare le capacità parassite, si applica una tensione di prova unitaria (ad esempio, 1 Volt) a un nodo o a un terminale specifico del divisore alla volta. Contemporaneamente, tutte le altre parti metalliche e i terminali delle resistenze non coinvolte nella misurazione in corso devono essere posti al potenziale di terra.

- La risposta in frequenza del dispositivo, per valutare la banda passante.

$$H(s) = \frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Se consideriamo una capacità parassita C_p in parallelo con R_2 , la funzione di trasferimento diventa dipendente dalla frequenza:

$$H(j\omega) = \frac{Z_2}{R_1 + Z_2}$$

Dove Z_2 è l'impedenza del parallelo tra R_2 e C_p :

$$Z_2 = \frac{R_2 \cdot \frac{1}{j\omega C_p}}{R_2 + \frac{1}{j\omega C_p}} = \frac{R_2}{1 + j\omega R_2 C_p}$$

Sostituendo Z_2 in $H(j\omega)$:

$$H(j\omega) = \frac{\frac{R_2}{1+j\omega R_2 C_p}}{R_1 + \frac{R_2}{1+j\omega R_2 C_p}} = \frac{R_2}{R_1(1+j\omega R_2 C_p) + R_2}$$

$$H(j\omega) = \frac{R_2}{(R_1 + R_2) + j\omega R_1 R_2 C_p} = \frac{\frac{R_2}{R_1 + R_2}}{1 + j\omega \frac{R_1 R_2 C_p}{R_1 + R_2}}$$

Questa è la forma di un filtro passa-basso del primo ordine. La frequenza di taglio (f_c) a -3dB (o banda passante) è data da:

$$f_c = \frac{1}{2\pi \cdot \tau}$$

Dove τ è la costante di tempo del filtro, che in questo caso è $\frac{R_1 R_2 C_p}{R_1 + R_2}$.

Quindi, la banda passante (frequenza di taglio a -3dB) è:

$$f_c = \frac{1}{2\pi \left(\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \right) C_p}$$

O in termini di pulsazione angolare ω_c :

$$\omega_c = \frac{1}{\left(\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \right) C_p}$$

Questo significa che, sebbene un partitore resistivo ideale abbia una banda passante infinita, i partitori resistivi reali hanno una banda passante limitata a causa degli effetti capacitivi parassiti. La limitazione della banda passante diventa più evidente man mano che la frequenza aumenta o che i valori di resistenza sono più elevati.

L'analisi transitoria ha confermato il corretto rapporto di divisione di tensione e ha evidenziato un leggero smorzamento del segnale ad alta frequenza dovuto alle capacità parassite. Questo risultato è stato ritenuto accettabile per l'applicazione di misura, non influenzando significativamente la banda utile del sistema di circa $1\text{M}\Omega$.

Analisi elettromagnetica in FEMM

In parallelo, è stata eseguita una simulazione del modello fisico del partitore mediante software FEMM (Finite Element Method Magnetics). L'obiettivo era analizzare:

- il campo elettrico generato tra i conduttori e verso massa;
- l'intensità del campo magnetico indotto in condizioni operative nominali;
- l'eventuale insorgenza di punti critici di concentrazione del campo (punti di scarica potenziale).

Il modello è stato costruito su una sezione trasversale rappresentativa, con materiali conduttivi e dielettrici coerenti con l'assemblaggio reale. L'analisi ha mostrato che il campo elettrico massimo risulta distribuito uniformemente lungo le resistenze in serie, con valori inferiori ai limiti critici di rigidità dielettrica dell'aria e dei materiali isolanti impiegati. Analogamente, il campo magnetico indotto si è mantenuto su valori trascurabili, coerenti con le basse correnti in gioco. L'integrità dell'isolamento è un requisito fondamentale per i dispositivi elettronici operanti ad alte tensioni, specialmente quando si devono rispettare stringenti limiti normativi riguardanti il campo elettrico verso massa o tra potenziali differenti. Nel contesto di un divisore resistivo, l'esposizione di conduttori a potenziali elevati può comportare rischi di scariche parziali, scariche superficiali (creepage) o perforazione dielettrica (breakdown) attraverso l'aria o altri materiali isolanti non adeguati.

Grazie all'utilizzo della ****resina siliconica**** per l'immersione (o "potting") del divisore resistivo, è possibile mitigare significativamente queste problematiche e garantire il rispetto dei requisiti normativi. I principali vantaggi derivanti dall'utilizzo di questo materiale dielettrico superiore sono:

1. **Elevata Rigidità Dielettrica:** La resina siliconica possiede una ****rigidità dielettrica**** (o resistenza dielettrica) intrinseca notevolmente superiore a quella dell'aria o di molti altri materiali isolanti comuni. Ciò significa che può sopportare campi elettrici molto più intensi prima di subire un guasto dielettrico. Incapsulando completamente il divisore, si sostituisce l'aria (che ha una rigidità dielettrica relativamente bassa e variabile con pressione e umidità) con un isolante solido e stabile. Questo riduce drasticamente il rischio di scariche disruptive all'interno del componente.
2. **Eliminazione delle Bolle d'Aria e Scariche Parziali:** La resina siliconica, se correttamente applicata e polimerizzata, riempie ogni cavità e interstizio attorno ai componenti del divisore, eliminando efficacemente le bolle d'aria. Le bolle d'aria all'interno di un isolante solido rappresentano punti deboli dove il

campo elettrico si concentra, portando a ****scariche parziali****. Queste scariche, sebbene non immediatamente distruttive, degradano l'isolamento nel tempo, compromettendo l'affidabilità a lungo termine del dispositivo. L'eliminazione di tali vuoti garantisce una distribuzione più uniforme del campo elettrico e previene questo fenomeno degenerativo.

3. **Aumento delle Distanze di Creepage e Clearance Elettriche:** Anche se l'incapsulamento non aumenta fisicamente le distanze superficiali (creepage) o quelle nello spazio (clearance) come definite geometricamente prima del potting, la presenza della resina siliconica con la sua elevata rigidità dielettrica e resistenza al tracking (formazione di percorsi conduttivi sulla superficie) rende il percorso di scarica estremamente difficile. Questo permette di soddisfare i requisiti normativi di isolamento, anche in design più compatti, fornendo una barriera dielettrica robusta tra le parti a potenziale elevato e quelle a potenziale di terra o tra sezioni del divisore a differenti potenziali.
4. **Stabilità Ambientale e Meccanica:** La resina siliconica offre un'eccellente protezione contro umidità, polvere, vibrazioni e shock termici. Questi fattori ambientali possono degradare le proprietà isolanti dei materiali e portare a fallimenti. L'incapsulamento garantisce che le prestazioni dielettriche del divisore rimangano stabili anche in condizioni operative avverse, contribuendo alla sua affidabilità e longevità.

In sintesi, l'immersione del divisore resistivo in resina siliconica è una soluzione ingegneristica efficace che, grazie alle sue superiori proprietà dielettriche e alla capacità di eliminare le discontinuità isolanti, consente di gestire e contenere il campo elettrico in modo da rispettare agevolmente i limiti normativi di sicurezza e prestazionali, anche in presenza di elevate differenze di potenziale.

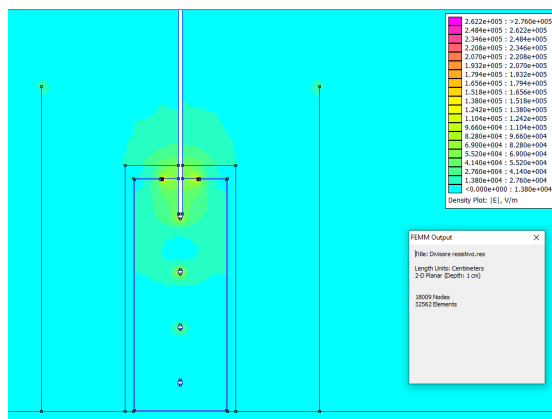


Figura 4.6: Campo elettrico del divisore immerso in resina.

Conclusioni delle simulazioni

Le simulazioni in LTspice e FEMM hanno permesso di validare il design preliminare del partitore resistivo, evidenziando un comportamento stabile e conforme alle aspettative. In particolare, la risposta in frequenza e le sollecitazioni elettromagnetiche risultano compatibili con il funzionamento a bordo veicolo, in presenza di tensioni nominali fino a 1500 V DC. Tali analisi hanno costituito un passaggio fondamentale per confermare la sicurezza e l'affidabilità del progetto prima della realizzazione fisica del prototipo.

4.6.5 Sonda di corrente

Per la misura della corrente assorbita dal carico sono stati considerati due approcci:

- **Shunt resistivo:** per basse correnti, mediante resistenze di precisione a basso valore ohmico e alto coefficiente di potenza.
- **Sonda ad effetto Hall:** per alte correnti, senza introdurre cadute di tensione significative e con isolamento galvanico intrinseco.

La scelta finale è stata la seconda non potendo eseguire modifiche strutturali per l'inserimento del dispositivo di misura.

Trasduttore di corrente per la misura dell'assorbimento

Per la misura della corrente assorbita dal carico è stato scelto un trasduttore di corrente AC/DC della serie **AHR-B10**, un dispositivo di tipo a effetto Hall progettato per applicazioni di misura ad alta precisione in ambienti industriali e ferroviari. Il modello utilizzato permette la rilevazione di correnti continue, alternate e impulsive, risultando particolarmente adatto alla variabilità tipica dei carichi a bordo veicolo.

Caratteristiche principali del sensore AHR-B10

Il trasduttore AHR-B10 è in grado di misurare correnti nominali (*IPN*) comprese tra 500 A e 2000 A, offrendo flessibilità nella configurazione del range di misura in funzione del carico reale connesso al sistema. Di seguito si riportano le principali specifiche tecniche del dispositivo:

- **Tecnologia di misura:** effetto Hall con feedback di corrente (closed loop);
- **Tensione di alimentazione:** ± 15 V DC;
- **Uscita:** segnale analogico proporzionale alla corrente misurata;

- **Tempo di risposta tipico:** $<1\ \mu\text{s}$;
- **Precisione:** $\leq 1\%$;
- **Isolamento galvanico:** fino a 8 kV (dipendente dal modello e dall'installazione);
- **Temperatura di esercizio:** $-40^{\circ}\text{C} \div +85^{\circ}\text{C}$;
- **Area foro passante:** adatto al conduttore primario fino a 104x40 mm.

Motivazioni della scelta

La scelta del modello AHR-B10 è stata dettata da diversi fattori tecnici e pratici:

- **Compatibilità con il range di corrente previsto**, compreso tra 0 e 1200 A continui con picchi impulsivi;
- **Elevato isolamento galvanico**, indispensabile per il funzionamento in ambienti ad alta tensione come le linee tranviarie a 600 V o 1500 V;
- **Banda passante sufficientemente ampia**, in grado di catturare anche eventi transitori e sovracorrenti istantanee;
- **Affidabilità e robustezza**, con certificazioni per l'uso in ambito ferroviario;
- **Facilità d'integrazione meccanica**, grazie al foro centrale che consente l'inserzione diretta del conduttore principale senza interruzioni.

Implementazione nel sistema di misura

Il trasduttore AHR-B10 è sarà montato in prossimità del conduttore di uscita del carico monitorato, assicurando un corretto accoppiamento meccanico ed elettrico. Il segnale in uscita, proporzionale alla corrente primaria, è condizionato e acquisito dalla scheda di acquisizione mediante un opportuno stadio di adattamento analogico.

Questa soluzione permette di ottenere una misura affidabile della corrente assorbita dal carico a bordo tram, garantendo nel contempo la necessaria sicurezza elettrica e conformità ai requisiti EMC e di isolamento.

4.6.6 Scheda di acquisizione QA-POWER-M-LV

Nel sistema di misura sviluppato per lo *smart meter* destinato all'installazione a bordo dei veicoli tranviari, la scheda di acquisizione ricopre un ruolo centrale. In particolare, è stata adottata la scheda **QA-POWER-M-LV**, un modulo di acquisizione analogico-digitale per applicazioni industriali, in grado di acquisire segnali analogici in bassa tensione con elevata precisione.

Descrizione generale

La scheda QA-POWER-M-LV è un dispositivo di acquisizione multicanale progettato per il monitoraggio di segnali elettrici provenienti da sonde e trasduttori. È ottimizzata per operare in ambienti critici, garantendo affidabilità e robustezza. Essa integra convertitori analogico-digitali (ADC) a 16 bit, buffer analogici per la protezione dei canali, e interfacce di comunicazione digitali per l'integrazione nei sistemi embedded o nei data logger.

Principali caratteristiche tecniche

- **Numero di canali:** fino a 8 ingressi analogici indipendenti;
- **Range di ingresso:** ± 100 V DC max (configurabile);
- **Risoluzione:** 16 bit;
- **Tensione di alimentazione:** 10-40 V DC;
- **Frequenza di campionamento:** fino a 5 kS/s per canale;
- **Interfaccia:** RS485 per la comunicazione con protocollo Modbus RTU, con microcontrollore o PC;
- **Isolamento:** isolamento galvanico tra i canali e il bus digitale;
- **Compatibilità EMC:** conforme alle direttive industriali e ferroviarie.

Funzionamento all'interno del sistema di misura

Nel progetto in esame, la scheda QA-POWER-M-LV riceve i segnali in bassa tensione provenienti da:

- **Il partitore resistivo**, che riduce la tensione nominale del sistema (600 V o 1500 V DC) a un segnale inferiore a 100 V, compatibile con il range di ingresso della scheda;
- **Il trasduttore di corrente AHR-B10**, che restituisce un segnale analogico proporzionale alla corrente assorbita dal carico;

I segnali acquisiti vengono convertiti in digitale e trasmessi al microcontrollore o alla stazione di registrazione tramite l'interfaccia. Grazie all'elevata risoluzione (16 bit) e alla frequenza di campionamento configurabile, è possibile ottenere una rappresentazione accurata e continua dei parametri elettrici istantanei, utile per la successiva elaborazione ed estrazione di grandezze energetiche (potenza attiva, energia, corrente RMS, ecc.).

Ruolo nella catena di misura

La QA-POWER-M-LV rappresenta l'anello di congiunzione tra il mondo analogico della misura (tensione e corrente) e quello digitale dell'elaborazione. Essa consente di:

- Effettuare acquisizioni sincronizzate di tensione e corrente;
- Garantire il rispetto delle specifiche di isolamento e sicurezza;
- Raccogliere dati ad alta risoluzione per analisi energetiche e diagnostiche;

L'impiego della QA-POWER-M-LV ha permesso una realizzazione modulare e affidabile del prototipo, mantenendo compatibilità con le normative ferroviarie e flessibilità nelle future implementazioni su larga scala.

4.6.7 Interfaccia di comunicazione: Datalogger Z-LTE SENECA

L'interfaccia di comunicazione riveste un ruolo cruciale per la gestione, memorizzazione e trasmissione remota dei dati acquisiti. A tal fine è stato scelto il datalogger **Z-LTE** prodotto da *SENECA*, un dispositivo industriale programmabile dotato di connettività LTE/4G, progettato per applicazioni di telemetria e automazione distribuita.

Caratteristiche tecniche principali

Il modulo Z-LTE si distingue per la sua versatilità e robustezza, offrendo una gamma completa di funzionalità di acquisizione, comunicazione e gestione dati. Le principali caratteristiche rilevanti per il progetto sono:

- **Connettività:** Modulo LTE/4G integrato, con supporto per fallback su 3G/2G;
- **Protocolli supportati:** MQTT, FTP, Modbus RTU/TCP, HTTP, SNMP;
- **Interfacce di I/O:**
 - 2 ingressi analogici (0–10 V / 0–20 mA),
 - 4 ingressi digitali isolati,
 - 2 uscite digitali a relè;
- **Memoria interna:** fino a 8 GB (espandibile via microSD);

- **Alimentazione:** 11–40 V DC, consumo tipico max 6.5 W;
- **Temperatura di esercizio:** da -20 °C a +65 °C;
- **Certificazioni:** CE, EMC, compatibilità ambientale industriale.

Integrazione con la catena di misura

Nel sistema in oggetto, il datalogger Z-LTE riceve i segnali analogici dalla scheda di acquisizione **QA-POWER-M-LV**, che fornisce i valori di tensione e corrente convertiti in segnali compatibili con i range di ingresso (0–10 V) del modulo. I segnali rappresentano:

- La tensione ridotta tramite il partitore resistivo;
- La corrente trasdotta attraverso il sensore AHR-B10;
- Eventuali segnali aggiuntivi (temperatura, stato relè, ecc.).

Grazie all’elevata flessibilità dei protocolli supportati, i dati possono essere letti localmente tramite interfaccia Modbus RTU o TCP, oppure inviati a un server remoto tramite MQTT o HTTP, rendendo il sistema pienamente integrabile in infrastrutture cloud o piattaforme di monitoraggio remoto.

Funzionamento operativo

Il datalogger opera ciclicamente secondo uno scheduler configurabile, leggendo i dati dai canali di ingresso, registrandoli su memoria locale e, a intervalli predefiniti, trasmettendoli via LTE a un endpoint remoto. In caso di assenza di rete, i dati vengono temporaneamente conservati nella memoria interna e trasmessi appena disponibile il collegamento.

Il modulo consente inoltre la configurazione remota, l’aggiornamento firmware over-the-air e l’invio di notifiche in caso di eventi critici (superamento soglie, errori, interruzioni).

Ruolo nel progetto

Nel contesto del sistema prototipale, il modulo Z-LTE consente di:

- Rendere il sistema **interamente autonomo e remoto**, senza necessità di connessione fissa;
- **Monitorare in tempo reale** le grandezze elettriche misurate;

- **Raccogliere dati storici** per verifiche sperimentali, analisi di rete e validazione dello smart meter;
- **Semplificare la messa in servizio** grazie a un'interfaccia web e strumenti di diagnostica integrati.

L'adozione del datalogger Z-LTE ha permesso una transizione naturale dal prototipo a un'architettura scalabile e interoperabile, mantenendo la compatibilità con gli standard industriali e ferroviari di sicurezza, affidabilità e comunicazione.

4.6.8 Conclusioni della sezione

La scelta e l'integrazione dei singoli componenti sono state guidate dalla necessità di ottenere un sistema di misura robusto, preciso e conforme agli standard ferroviari, mantenendo al tempo stesso la modularità necessaria per la sperimentazione. L'architettura sviluppata rappresenta una solida base per l'industrializzazione futura del dispositivo, con possibilità di espansione e adattamento ad altri scenari di rete elettrica urbana o suburbana.

Conclusioni

Il lavoro svolto in questa tesi si è concentrato sulla ricerca normativa, progettazione e validazione del divisore di tensione e l'analisi per la progettazione di un sistema prototipale di *smart meter* destinato all'impiego a bordo dei veicoli tranviari della rete urbana torinese, con l'obiettivo di monitorare e trasmettere in tempo reale i principali parametri elettrici della linea di alimentazione.

L'approccio adottato è stato multidisciplinare, integrando competenze di elettrotecnica, progettazione elettronica, compatibilità elettromagnetica, sicurezza elettrica e trasmissione dati. In particolare:

- Sono state analizzate e selezionate le norme tecniche di riferimento, tra cui la **BS EN 50121** (compatibilità elettromagnetica), la **BS EN 50124** (coordinamento dell'isolamento), la **CEI EN 61180** (tecniche di prova ad alta tensione) e la **BS EN IEC 61373** (prove meccaniche su apparecchiature ferroviarie), per individuare i vincoli applicabili al prototipo.
- È stato progettato un sistema di misura composto da un partitore resistivo per la tensione, una sonda di corrente, una scheda di acquisizione analogica e un'interfaccia di comunicazione remota basata su datalogger LTE. Ogni componente è stato dimensionato oppure scelto tenendo conto delle condizioni operative reali e delle limitazioni di laboratorio.
- Sono state effettuate simulazioni circuitali (LTspice) ed elettromagnetiche (FEMM) per valutare l'efficacia del divisore di tensione.
- Il sistema di trasmissione dei dati è stato implementato tramite il modulo **Z-LTE** di SENECA, che garantisce un'efficiente gestione e comunicazione delle misure verso un server remoto.
- È stato valutato l'impatto dell'installazione del dispositivo sui veicoli tranviari delle serie 5000 e 6000 di GTT, selezionando il punto di installazione più idoneo e realizzando una prima fase sperimentale in laboratorio.

Sebbene siano stati applicati criteri semplificati rispetto all'intero corpus normativo (in quanto prototipo), le scelte progettuali sono state effettuate in modo

conservativo, privilegiando la sicurezza, la scalabilità e la possibilità di successiva certificazione.

A seguito della caratterizzazione del prototipo di *smart meter*, è stata pianificata una fase sperimentale di prova su veicolo reale, al fine di verificarne il corretto funzionamento in condizioni operative e raccogliere dati utili alla validazione dell'intero sistema. Questa fase costituisce un passaggio fondamentale per dimostrare la robustezza, l'affidabilità e l'efficacia del dispositivo nella sua applicazione finale.

Il periodo di prova sul campo ha i seguenti obiettivi principali:

- Valutare il comportamento elettrico e la stabilità del sistema in presenza di sollecitazioni reali, quali vibrazioni, variazioni di temperatura, disturbi elettromagnetici e variazioni del carico.
- Validare l'accuratezza delle misure di tensione, corrente ed energia rispetto a strumenti di riferimento installati in parallelo.
- Verificare la qualità e l'affidabilità della trasmissione dati via rete LTE, monitorando continuità, latenza e perdita di pacchetti.
- Analizzare le forme d'onda e gli eventi transitori acquisiti durante l'esercizio, con particolare attenzione a sovratensioni, armoniche e fluttuazioni.
- Raccogliere un dataset significativo per future attività di analisi energetica, diagnostica predittiva e ottimizzazione operativa.

Contesto operativo

Il dispositivo verrà installato a bordo di un veicolo della serie 6000 della rete GTT di Torino, selezionato in collaborazione con il personale tecnico dell'azienda. L'installazione sarà effettuata nel compartimento tecnico.

La configurazione include:

- Il partitore resistivo con isolamento adeguato alle sovratensioni transitorie.
- La sonda di corrente posizionata in serie all'ingresso del carico di trazione.
- La scheda di acquisizione QA-POWER-M-LV, collegata all'interfaccia di comunicazione Z-LTE.
- L'alimentazione autonoma, derivata dalla linea o da un convertitore DC-DC apposito.

Strategia di raccolta e analisi dei dati

Durante la prova, il sistema registrerà dati in modo continuo su una memoria locale e li invierà periodicamente a un server remoto tramite connessione LTE. I dati saranno strutturati in pacchetti contenenti timestamp, tensione istantanea, corrente, potenza attiva e reattiva, energia accumulata, posizione reale della motrice tramite gps, frequenza di campionamento ed eventuali eventi rilevati.

Saranno inoltre introdotte soglie per il rilevamento automatico di:

- Sovratensioni e sottotensioni (relativi a $U_{\max2}$ e $U_{\min}$ definiti nelle norme).
- Correnti di spunto e picchi di carico.
- Anomalie temporanee o transitorie.

I dati raccolti saranno analizzati mediante strumenti di post-processing, tra cui script in `Python` e ambienti come `MATLAB`, per l'elaborazione delle forme d'onda, il filtraggio del rumore e il confronto con modelli teorici.

Bibliografia

- [1] E. Pons e R. Rizzoli. *Slide 14 del corso di Impianti elettrici e sicurezza: Introduzione ai sistemi di trazione elettrica*. Torino: Politecnico di Torino, 2024 (cit. a p. 2).
- [2] TramdiTorino.it. *Il semaforo Tranviario*. Ultimo accesso: maggio 2025. 2025. URL: <https://www.tramditorino.it> (cit. alle pp. 3–5).
- [3] *PRIN 2022 - Gemello Digitale per la rete tranviaria torinese*. <https://prin.miur.it/2022/gemello-digitale-tranvia>. Progetto di Rilevante Interesse Nazionale, MIUR. 2022 (cit. a p. 6).
- [4] *BS EN 50463-1 Railway applications - Energy measurement on board trains - Part 1: General*. Standard BS EN 50463-2:2017+A1:2024. UK: The British Standards Institution, 2024 (cit. a p. 14).
- [5] *BS EN 50124-1:2017 - Railway applications – Insulation coordination – Part 1: Basic requirements – Clearances and creepage distances for all electrical and electronic equipment*. 2017 (cit. a p. 15).
- [6] *BS EN 50124-2:2017 - Railway applications – Insulation coordination – Part 2: Application guide*. 2017 (cit. alle pp. 16, 18).
- [7] *BS EN 50121-1:2017 - Railway applications - Electromagnetic compatibility - Part 1: General*. 2017 (cit. a p. 20).
- [8] *BS EN 50121-2:2017 - Railway applications - Electromagnetic compatibility - Part 2: Emission of the whole railway system to the outside world*. 2017 (cit. a p. 21).
- [9] *BS EN 50121-3-1:2017 - Railway applications - Electromagnetic compatibility - Part 3-1: Rolling stock — Train and complete vehicle*. 2017 (cit. a p. 21).
- [10] *BS EN 50121-3-2:2017 - Railway applications - Electromagnetic compatibility - Part 3-2: Rolling stock — Apparatus*. 2017 (cit. a p. 21).
- [11] *BS EN 50121-4:2017 - Railway applications - Electromagnetic compatibility - Part 4: Emission and immunity of the signalling and telecommunications apparatus*. 2017 (cit. a p. 22).

- [12] *BS EN 50121-5:2017 - Railway applications - Electromagnetic compatibility - Part 5: Emission and immunity of fixed power supply installations and apparatus*. 2017 (cit. a p. 22).
- [13] *BS EN IEC 61373: Railway applications – Rolling stock equipment – Shock and vibration tests*. Edizione confermata 2010, con corrigendum 2011. 2010 (cit. alle pp. 23, 25).
- [14] *BS EN 50343:2024 – Railway applications. Rolling stock. Rules for installation of cabling*. Sostituisce EN 50343:2014/A1:2017. 2024 (cit. a p. 25).
- [15] *BS EN 61180:2016 – High-voltage test techniques for low-voltage equipment*. Identical to IEC 61180:2016; copre test dielettrici DC, AC e impulso. 2016 (cit. alle pp. 27–29).