

# Ricerca di Sistema elettrico



Caratterizzazione elettromagnetica di tamponature prefabbricate in legno con accumulo energetico integrato (LA3.14)

Leonardo Sandrolini, Mattia Simonazzi



ALMA MATER STUDIORUM  
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA  
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'ENERGIA ELETTRICA  
E DELL'INFORMAZIONE "GUGLIELMO MARCONI"

## CARATTERIZZAZIONE ELETTROMAGNETICA DI TAMPONATURE PREFABBRICATE IN LEGNO CON ACCUMULO ENERGETICO INTEGRATO (LA3.14)

L. Sandrolini, M. Simonazzi (Alma Mater Studiorum – Università di Bologna, Dipartimento di Ingegneria dell'Energia Elettrica e dell'Informazione "Guglielmo Marconi")

Dicembre 2024

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica - ENEA Piano Triennale di Realizzazione 2022-2024

Obiettivo: *Decarbonizzazione*

Progetto: *Edifici ad alta efficienza per la transizione energetica*

Linea di attività: 3.14

Responsabile del Progetto: Giovanni Puglisi, ENEA

Responsabile del Work Package: Paolo Sdringola, ENEA

Responsabile Linea di Attività: Alma Mater Studiorum Università di Bologna – Dipartimento di Ingegneria dell'Energia Elettrica e dell'Informazione "G. Marconi" (UNIBO\_DEI\_2)

Mese inizio previsto: 19

Mese inizio effettivo: 19

Mese fine previsto: 36

Mese fine effettivo: 36

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "*Caratterizzazione elettromagnetica di tamponature prefabbricate in legno con accumulo energetico integrato*".

Responsabile scientifico ENEA: Simone Beozzo

Responsabile scientifico Co-beneficiario: Leonardo Sandrolini

## Indice

1	Risultati attesi .....	4
2	Risultati ottenuti.....	5
2.1	Simulazioni elettromagnetiche .....	5
2.2	Misure di efficienza di schermatura .....	6
3	Prodotti attesi .....	7
4	Prodotti sviluppati .....	8
5	Analisi degli scostamenti su attività e risultati.....	9
6	Sintesi delle attività svolte .....	10
7	Dettaglio delle attività svolte.....	11
7.1	Introduzione .....	11
7.2	Efficienza di schermatura.....	11
7.3	Simulazioni elettromagnetiche .....	12
7.4	Definizione del setup sperimentale e del prototipo di parete prefabbricata.....	14
7.5	Misure sperimentali .....	15
7.6	Riferimenti bibliografici .....	20
8	Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte.....	22
9	Pubblicazioni scientifiche.....	23
10	Eventi di disseminazione .....	24

## Indice delle figure

Figura 1 Setup di misura secondo la normativa STD IEEE 299:2006 [4].	14
Figura 2 Parete prefabbricata con i due vani riempiti da isolante termico (a) e da 6 SC (b).	15
Figura 3 - Foto dell'antenna horn utilizzata nelle misure di SE (a) con relative dimensioni: L=119 mm, E=86 mm, H=119 mm (b).	16
Figura 4 Misura della SE con antenne TX e RX in polarizzazione verticale in assenza di schermo.	17
Figura 5 Misura della SE con antenne TX e RX in polarizzazione verticale in presenza di schermo.	17
Figura 6 SE misurata con antenne TX e RX in polarizzazione verticale: confronto tra parete ad accumulo e parete senza accumulo.	18
Figura 7 Misura della SE con antenne TX e RX in polarizzazione orizzontale in assenza di schermo.	19
Figura 8 Misura della SE con antenne TX e RX in polarizzazione orizzontale in presenza di schermo.	19
Figura 9 SE misurata con antenne TX e RX in polarizzazione orizzontale: confronto tra parete ad accumulo e parete senza accumulo.	20
Figura 10 Modello FEM semplificato della parete con accumulo e dominio di simulazione.	13
Figura 11 SE calcolata con simulatore elettromagnetico FEM per polarizzazione verticale del campo.	13
Figura 12 SE calcolata con simulatore elettromagnetico FEM per polarizzazione orizzontale del campo.	14

## Indice delle tabelle

Tabella 1 Strumentazione impiegata per le misure.	16
---	----

# 1 Risultati attesi

I risultati attesi come da capitolato vigente sono i seguenti:

1. Simulazioni elettromagnetiche del comportamento schermante dei prototipi di tamponatura con accumulo elettrico integrato
2. Misura dell'efficienza di schermatura dei prototipi di tamponatura con accumulo elettromagnetico integrato a varie frequenze

## 2 Risultati ottenuti

I risultati ottenuti nell'attività di ricerca svolta nella LA3.14 sono i seguenti:

1. Simulazioni elettromagnetiche eseguite su un modello semplificato di parete ad accumulo energetico
2. Misure di efficienza di schermatura su prototipi di parete prefabbricata

Le simulazioni elettromagnetiche sono state eseguite preliminarmente alle prove sperimentali, permettendo di ottenere delle prime indicazioni sul comportamento delle pareti ad accumulo. Per esempio, si è verificato come la schermatura dipenda dalla polarizzazione del campo, risultato poi confermato anche nell'esecuzione delle misure. Il modello utilizzato nelle simulazioni è stato realizzato sulla base delle informazioni ricevute dai fornitori delle pareti prefabbricate in legno e dei supercondensatori. I risultati delle simulazioni sono stati successivamente confrontati con quelli sperimentali; benché ottenuti con un modello semplificato e quindi solo indicativi, hanno consentito di ricavare l'ordine di grandezza della quantità assunta come rappresentativa delle prestazioni schermanti delle pareti con accumulo integrato, ovvero l'efficienza di schermatura.

Le prove sperimentali hanno consentito di caratterizzare sperimentalmente i prototipi di pareti ad accumulo, fornendo indicazioni sulle loro proprietà schermanti maggiormente rappresentative delle prestazioni operative. I risultati ottenuti confermano la dipendenza della schermatura dalla polarizzazione del campo, ancora più evidente che nelle simulazioni. Il modello semplificato usato nelle simulazioni consente pertanto di ricavare indicazioni utili per l'esecuzione delle prove e per interpretare i risultati delle prove stesse. Le prestazioni schermanti misurate risultano dello stesso ordine di grandezza di quelle simulate; questo ha consentito di validare il modello semplificato impiegato nelle simulazioni, che può essere ritenuto adeguato a fornire una stima delle prestazioni schermanti ottenibili dalle pareti con accumulo.

### 2.1 Simulazioni elettromagnetiche

Le simulazioni elettromagnetiche sono state condotte su un modello semplificato della parete ad accumulo per ridurre la complessità della simulazione (e di conseguenza tempi di calcolo e requisiti hardware del computer su cui eseguire la simulazione). In particolare, è stato semplificato il modello del supercondensatore, rappresentato dal solo involucro esterno in metallo, avendo osservato che alle frequenze di interesse il contributo principale alla schermatura di un materiale conduttivo è attribuibile alle perdite per riflessione causate dalla differente impedenza d'onda tra i due mezzi (aria e conduttore). Si è così trascurato il contributo dato alla schermatura degli eventuali componenti metallici presenti all'interno dell'involucro. I supercondensatori impilati all'interno del vano nella parete sono stati così rappresentati come un unico parallelepipedo cavo. Le proprietà schermanti di un materiale sono infatti descritte in termini di efficienza di schermatura (SE) che è una quantità adimensionale data dal rapporto tra il campo elettrico (o magnetico) in un punto dello spazio in assenza dello schermo e il campo elettrico (o magnetico) nello stesso punto in presenza dello schermo. Le simulazioni mostrano che i supercondensatori producono una riflessione del campo incidente molto importante (oltre 50 dB) a frequenze inferiori a 1.5 GHz. Le lunghezze d'onda corrispondenti a queste frequenze sono tali da ritenere che il campo non penetri efficacemente nello spazio tra i due blocchi di supercondensatori, occupato da un elemento strutturale in legno. A frequenze oltre 2.5

GHz si nota invece una drastica riduzione della SE a valori medi di 10-15 dB; ciò può essere attribuito alla penetrazione efficace del campo negli spazi sopra menzionati. Il campo sembra penetrare più efficacemente quando il campo è in polarizzazione orizzontale, anche se la differenza è meno evidente che nel caso delle misure, come illustrato nella prossima sezione. Benché i risultati delle simulazioni si possano ritenere indicativi, essi mostrano che per avere un effetto schermante più significativo occorre ridurre gli spazi in cui può penetrare il campo elettromagnetico.

## 2.2 Misure di efficienza di schermatura

Le misure di SE eseguite sulla parete ad accumulo energetico mostrano a partire da 1500 MHz una SE compresa tra 15 e 28 dB per campo in polarizzazione verticale, e tra 10 e 15 dB per campo in polarizzazione orizzontale. Al fine di valutare l'effetto dei supercondensatori sulla SE, sono state ripetute le misure sulla parete prefabbricata priva dei dispositivi di accumulo. Anche in questo caso, a partire da 1500 MHz si può notare come la SE sia compresa tra 6 e 18 dB per campo in polarizzazione verticale, e tra 3 e 16 dB per campo in polarizzazione orizzontale. Mediamente, i valori della SE delle pareti con dispositivi di accumulo per campo in polarizzazione verticale sono maggiori di quelli per campo in polarizzazione orizzontale; questo risultato conferma quanto ottenuto nelle simulazioni elettromagnetiche. Ciò parrebbe dovuto allo sviluppo in senso verticale dell'elemento di sostegno strutturale interno alla parete prefabbricata, che in pratica dal punto di vista elettromagnetico può essere visto come un'apertura con dimensione verticale prevalente. Le correnti indotte sull'involucro dei supercondensatori, che costituiscono il meccanismo di schermatura, risultano meno ostacolate dall'apertura quando il campo è appunto in polarizzazione verticale: pertanto, a parità di frequenza la penetrazione del campo elettromagnetico risulta più efficace (e quindi, minore SE) quando il campo è in polarizzazione orizzontale. Per frequenze minori di 1500 MHz si possono evidenziare alcuni picchi nella SE (30-35 dB), probabilmente dovuti a una non efficace penetrazione del campo elettromagnetico ad alcune frequenze, a fenomeni di risonanza e all'impiego delle antenne al di fuori delle frequenze di funzionamento. Si noti infine che i valori di SE ottenuti nelle misure sono dello stesso ordine di grandezza di quelli ottenuti con le simulazioni, almeno per frequenze maggiori di 1500 MHz. Il modello semplificato usato nelle simulazioni si può perciò ritenere validato e sufficientemente adeguato a fornire una stima della SE delle pareti con accumulo.

Per i valori di efficienza di schermatura ottenuti dalle misure si può ritenere che le pareti ad accumulo energetico così progettate non consentano né di ridurre in modo significativo il rischio per l'uomo legato all'esposizione ai campi elettromagnetici né pregiudichino il corretto funzionamento delle tecnologie IoT.

### 3 Prodotti attesi

Come da capitolato vigente, la linea di attività prevede la produzione di un report tecnico, contenente la descrizione delle attività previste e i risultati ottenuti, in riferimento all'efficienza di schermatura simulata e misurata dei prototipi di tamponature.

## 4 Prodotti sviluppati

Nel corso della Linea di Attività è stato prodotto il presente report tecnico, in aderenza agli obiettivi dichiarati.

## 5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Per la LA3.14 non vi sono stati scostamenti tecnici/economici rispetto al capitolato vigente.

## 6 Sintesi delle attività svolte

L'attività di ricerca ha riguardato la definizione e la messa a punto di un setup sperimentale per la misura dell'efficienza di schermatura (SE) delle pareti prefabbricate con accumulo energetico integrato. Preliminarmente sono state svolte simulazioni elettromagnetiche su un modello semplificato della parete con accumulo. Le simulazioni e le misure mostrano che per frequenze maggiori di 1500 MHz si ottengono valori maggiori di SE per il campo in polarizzazione verticale. Per frequenze inferiori a 1500 MHz la SE è fortemente legata alla frequenza con alcuni picchi la cui motivazione si può ricondurre a una non efficace penetrazione del campo elettromagnetico ad alcune frequenze, a fenomeni di risonanza e nelle misure sperimentali all'impiego delle antenne al di fuori delle frequenze di funzionamento. In definitiva, le pareti con accumulo energetico non attenuano in modo significativo i campi elettromagnetici nell'intervallo di frequenza in esame.

## 7 Dettaglio delle attività svolte

### 7.1 Introduzione

Gli edifici ad alta efficienza energetica presentano reti di sensori e dispositivi che insieme al loro software di gestione rappresentano l'essenza delle tecnologie Internet of Things (IoT), alla base delle moderne città intelligenti attente all'impatto ambientale. L'impiego di pareti ad accumulo energetico integrato comporta un'interazione inevitabile con i campi elettromagnetici presenti nell'ambiente, rappresentando una barriera e quindi uno schermo alla propagazione dei campi elettromagnetici. L'effetto schermante può quindi ridurre il rischio per l'uomo legato all'esposizione ai campi elettromagnetici, ma allo stesso tempo avere un impatto negativo sul funzionamento delle tecnologie IoT. Si rende quindi necessaria la valutazione dell'impatto delle pareti ad accumulo energetico sulla propagazione dei campi elettromagnetici.

L'attività di ricerca ha riguardato la messa a punto di un setup sperimentale per la caratterizzazione elettromagnetica delle tamponature prefabbricate con accumulo energetico integrato consistente nella misura delle prestazioni schermanti, ovvero dell'efficienza di schermatura (SE), delle stesse.

Preliminarmente alla caratterizzazione elettromagnetica sperimentale, al fine di ricavare indicazioni utili sul comportamento delle pareti prefabbricate con accumulo energetico e all'interpretazione dei risultati sperimentali, è stata inoltre eseguita una valutazione delle capacità schermanti mediante simulazioni elettromagnetiche. Il modello usato nelle simulazioni è stato validato con le misure e si può ritenere sufficientemente adeguato a fornire una stima della SE delle pareti con accumulo.

### 7.2 Efficienza di schermatura

Le prestazioni di uno schermo, ovvero di una generica barriera alla trasmissione dei campi elettromagnetici avente lo scopo di limitare il disturbo elettromagnetico che interessa una determinata regione di spazio [1], [2], sono espresse dall'efficienza di schermatura (SE), quantità adimensionale funzione della frequenza normalmente espressa in decibel. Quando l'ipotesi di quasi stazionarietà non è più soddisfatta (ovvero, a frequenza elevata) il campo magnetico e il campo elettrico sono correlati e pertanto si può definire la SE in termini di flusso di potenza:

$$SE_{dB} = 20 \log_{10} \frac{P_0}{P_1} \quad (1)$$

ove  $P_0$  e  $P_1$  sono le potenze in un punto dello spazio rispettivamente in assenza e in presenza di schermo.

Le potenze  $P_0$  e  $P_1$  possono essere ottenute dai parametri di scattering (o parametri S), che possono essere misurati in un setup sperimentale o calcolati con un simulatore elettromagnetico. Sostanzialmente, lo schermo è rappresentato da un doppio bipolo che nel setup sperimentale è collegato tra le due porte (una di ingresso e una di uscita) di un analizzatore di rete

vettoriale (VNA), mentre nel simulatore elettromagnetico esso è per esempio collegato tra le due porte di eccitazione di una guida d'onda. In particolare, è di interesse il parametro  $\hat{S}_{21}$ , che rappresenta il coefficiente di trasmissione dalla porta 1 alla porta 2:

$$\hat{S}_{21} = \frac{\hat{b}_2}{\hat{a}_1} \Big|_{\hat{a}_2=0} \quad (2)$$

ove  $\hat{a}_1$  è la potenza entrante nella porta 1 e  $\hat{b}_2$  la potenza uscente dalla porta 2 del doppio bipolo;  $\hat{a}_2$  è la potenza entrante nella porta 2 e pertanto  $\hat{a}_2 = 0$  significa che la porta 2 è in condizioni di adattamento (potenza riflessa quindi nulla). Le potenze  $P_0$  e  $P_1$  della (1) sono le ampiezze della potenza  $\hat{b}_2$  rispettivamente in assenza e in presenza dello schermo, rispettivamente  $\hat{b}_2^0$  e  $\hat{b}_2^1$ . La differenza tra i coefficienti di trasmissione  $S_{21,\text{dB}}^0$  in assenza e  $S_{21,\text{dB}}^1$  in presenza dello schermo costituisce la SE dello schermo:

$$S_{21,\text{dB}}^0 = 20 \log_{10} \left| \frac{\hat{b}_2^0}{\hat{a}_1} \right| \quad (3)$$

$$S_{21,\text{dB}}^1 = 20 \log_{10} \left| \frac{\hat{b}_2^1}{\hat{a}_1} \right| \quad (4)$$

$$SE_{\text{dB}} = 20 \log_{10} \left| \frac{\hat{b}_2^0}{\hat{b}_2^1} \right| = S_{21,\text{dB}}^0 - S_{21,\text{dB}}^1 \quad (5)$$

### 7.3 Simulazioni elettromagnetiche

Con riferimento alle Figura 5, Figura 8 e Figura 11, che mostrano le pareti ad accumulo energetico, è stato sviluppato un modello FEM semplificato della parete con accumulo. Poiché alle frequenze considerate il contributo principale alla schermatura di un materiale conduttivo è attribuibile alle perdite per riflessione [20], dei supercondensatori (SC) si è rappresentato il solo involucro esterno in metallo, supposto di spessore 2 mm. I tre SC impilati sono stati così rappresentati come un unico parallelepipedo cavo; i due blocchi di tre SC all'interno della parete sono pertanto modellati come due parallelepipedi di dimensioni 23.5 cm x 45 cm x 12 cm, collocati all'interno di un dominio di sezione rettangolare con dimensioni 55 cm x 45 cm, in cui è stato ricreato il modo TEM di eccitazione con le opportune condizioni al contorno. Il modello così realizzato è mostrato in Figura 1. L'efficienza di schermatura è stata calcolata dal parametro  $S_{21}$ .

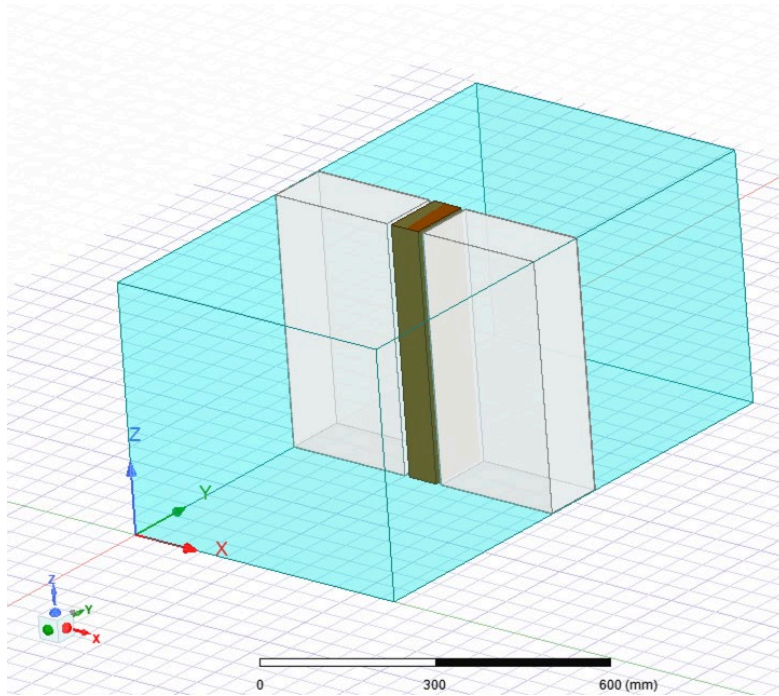


Figura 1 Modello FEM semplificato della parete con accumulo e dominio di simulazione.

L'efficienza di schermatura per il campo in polarizzazione verticale è mostrata in Figura 2. Si notano valori di SE oltre 50 dB per frequenze inferiori a 1.5 GHz (a queste frequenze le lunghezze d'onda sono confrontabili con le dimensioni della guida d'onda e quindi si può ritenere che il campo non penetri efficacemente nello spazio tra i due blocchi di SC), mentre valori medi di circa 10 dB a partire da 2.5 GHz.

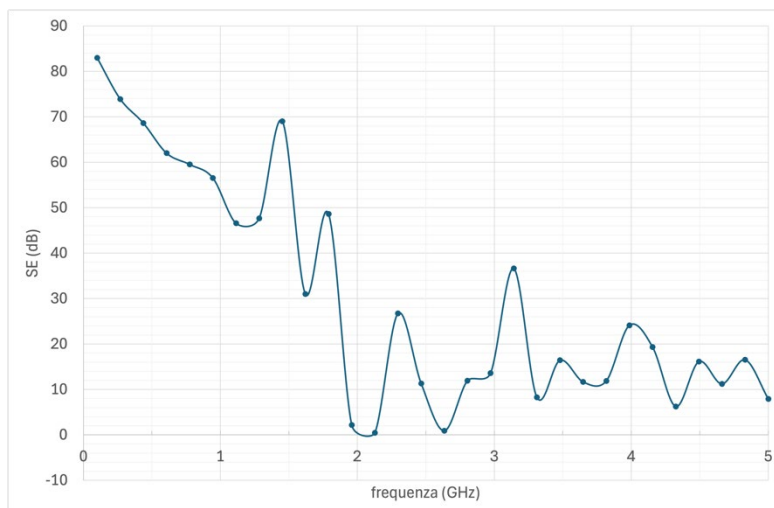


Figura 2 SE calcolata con simulatore elettromagnetico FEM per polarizzazione verticale del campo.

L'efficienza di schermatura per il campo in polarizzazione orizzontale è mostrata in Figura 3. L'andamento è simile a quello di Figura 2. Si notano valori di SE oltre 50 dB per frequenze inferiori a 1.5 GHz, mentre valori medi di circa 15 dB a partire da 2.5 GHz.

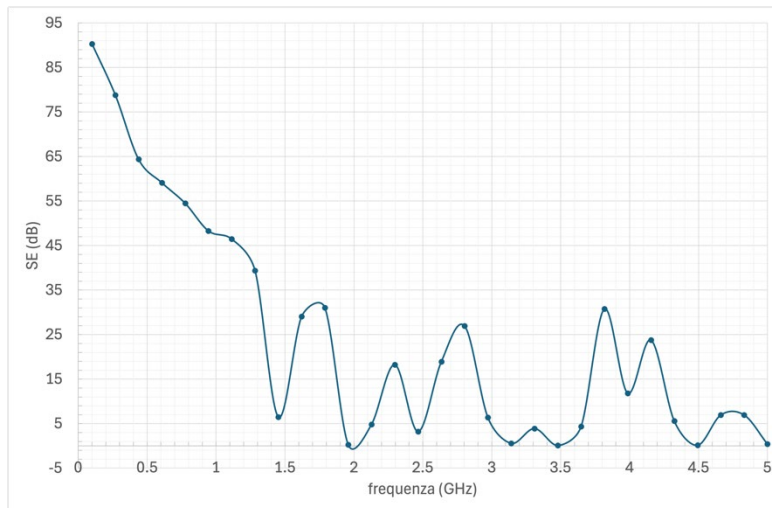


Figura 3 SE calcolata con simulatore elettromagnetico FEM per polarizzazione orizzontale del campo.

## 7.4 Definizione del setup sperimentale e del prototipo di parete prefabbricata

La ricerca bibliografica svolta nel precedente PTR2019–21 della Ricerca di Sistema Elettrico, descritta nel Report RdS/PTR2021/136 [1], ha consentito di individuare nella combinazione delle tecniche di misura tipicamente impiegate per involucri e contenitori [4–9] e in quelle per materiali da costruzione [10], l’allestimento di misura più adatto per la parete prefabbricata.

La tecnica di misura richiede due antenne, una trasmittente (TX) e una ricevente (RX). La misura di SE consiste nel confrontare il campo elettromagnetico generato dall’antenna TX e ricevuto dall’antenna RX in presenza e in assenza dello schermo, in questo caso della parete prefabbricata. Uno schema di principio per la misura di SE è mostrato in Figura 4 . Lo schermo viene così caratterizzato in termini della “perdita di inserzione” che provoca sul campo ricevuto dall’antenna RX.

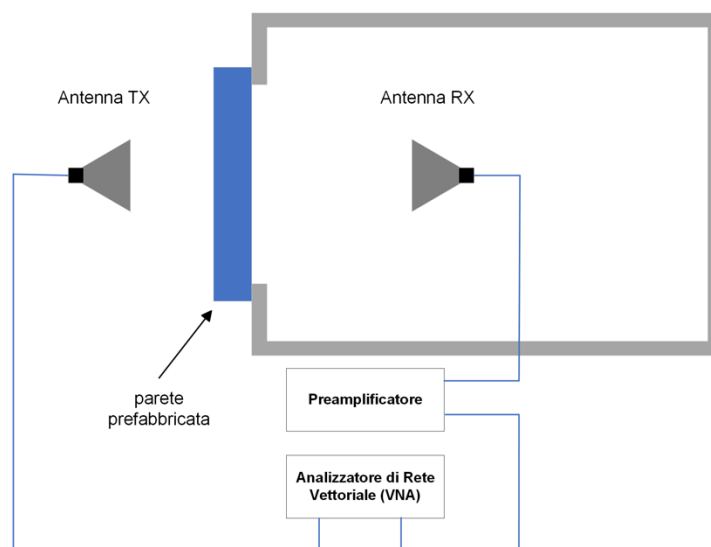


Figura 4 Setup di misura secondo la normativa STD IEEE 299:2006 [4].

Si è utilizzata la cella schermata in dotazione al laboratorio LACEM di UniBO, realizzata in acciaio AISI 304 e avente dimensioni 1 m x 1 m x 1.1 m con apertura (dimensioni 55 cm x 45 cm) sulla parete frontale.

L'interazione con ENEA e con i fornitori dei sistemi di accumulo energetico e delle pareti prefabbricate ha consentito di definire un prototipo di parete prefabbricata idonea alle misure di SE con la cella in dotazione al laboratorio LACEM. La parete, realizzata in legno massello, ha dimensioni massime 125 cm x 100 cm x 16 cm con due vani atti a contenere l'isolamento termico oppure i SC aventi dimensioni massime 48 cm x 23 cm x 12 cm e peso di circa 11 kg, come mostrato in Figura 5. I SC sono predisposti per essere impilati e possono essere alloggiati in gruppi di 3 per vano. I vani sono chiusi ciascuno da un pannello di legno truciolare di dimensioni 65.5 cm x 100 cm e spessore 1 cm. La parete è completata da uno strato di materiale isolante dello spessore di 10 cm intonacato sulla parte esterna. Questa parete posta a contatto con la parte frontale della cella schermata ne ostruisce completamente l'apertura ed è pertanto così possibile misurare la perdita di inserzione prodotta dalla parete alla propagazione del campo elettromagnetico tra le antenne TX e RX. La distanza tra le antenne, tra le antenne e l'apertura e l'intervallo di frequenze in cui viene eseguita la misura sono scelti per ricreare le condizioni il più possibile prossime a quelle di un'onda piana uniforme per il campo elettromagnetico incidente sull'apertura (ovvero distanza tra antenne e apertura di alcune lunghezze d'onda). Il peso complessivo della parete contenente i SC è di oltre 1 quintale; ciò ha richiesto l'uso di opportune attrezzature per lo spostamento della parete e il suo posizionamento sull'apertura della cella schermata.



(a)



(b)

Figura 5 Parete prefabbricata con i due vani riempiti da isolante termico (a) e da 6 supercondensatori (b).

## 7.5 Misure sperimentali

La strumentazione impiegata per le misure è elencata in Tabella 1.

Tabella 1 Strumentazione impiegata per le misure.

Marca	Modello	Descrizione
Advantest	R3763B	Analizzatore di rete vettoriale (300 kHz – 3.6 GHz)
EMCTEST	EMC-PRE-26	Preamplificatore 30 kHz – 6 GHz
Q-PAR Angus	WBH2-18S	Antenna Horn 2-18 GHz, guadagno 7-13 dBi
EMCTEST	EMC-SHC-100	Shield box per test di SE
Huber-Suhner	Sucoflex 104A	Cavi coassiali N(m)-N(m) – 1.5 metri
Berlebach	Mulda	Treppiede con supporto dielettrico
Stanley	SLL360	Livella laser per allineamento antenne
Apple	MacBook Pro	Computer portatile
National Instruments	LabView 15	Software acquisizione dati
National Instruments	GPIB-USB-HS	Interfaccia GPIB-USB per acquisizione dati

Si è utilizzata una coppia di antenne horn Q-PAR Angus, mostrata in Figura 6. Come da schema di Figura 4, per generare la tensione sinusoidale da applicare all'antenna TX e per misurare la tensione ricevuta dall'antenna RX è stato utilizzato il VNA Advantest R3763B. Il segnale ricevuto dall'antenna RX è stato preamplificato per migliorare la dinamica del sistema e per impiegare le antenne anche al di fuori dell'intervallo di frequenza nominale, per cui le misure sono state condotte tra 800 MHz e 3.6 GHz. Questo intervallo di frequenza è significativo perché allocato per i più diffusi sistemi di telecomunicazione (2G, 3G, 4G e 5G) e impiegato per tecnologie IoT. Per l'acquisizione dei dati è stato impiegato il software LabView [11].

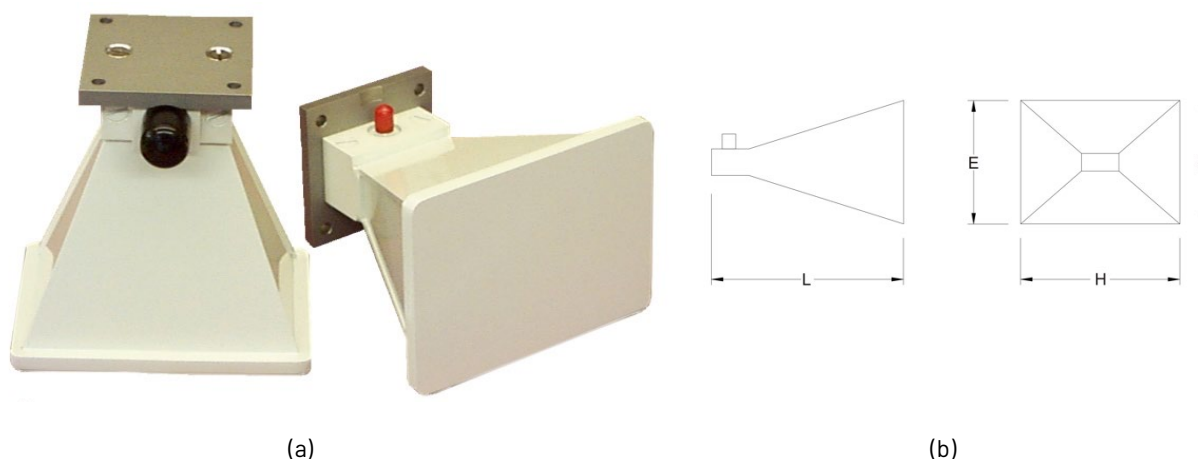


Figura 6 – Foto dell'antenna horn utilizzata nelle misure di SE (a) con relative dimensioni: L=119 mm, E=86 mm, H=119 mm (b).

Mediante il VNA si è misurato il parametro  $S_{21, dB}^0$  (3) relativo alla propagazione del campo in assenza di schermo tra le antenne TX e RX, rispettivamente fuori e dentro la cella schermata. Le antenne sono entrambe in polarizzazione verticale. L'allestimento di prova è mostrato in Figura 7, in cui sono visibili anche il VNA e il preamplificatore utilizzati per le misure.

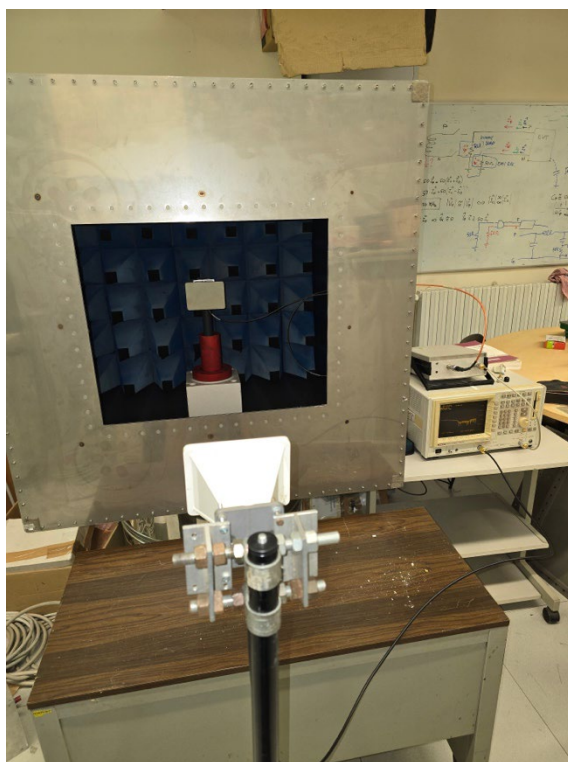


Figura 7 Misura della SE con antenne TX e RX in polarizzazione verticale in assenza di schermo.

Si è quindi collocata la parete contenente i SC contro il lato frontale della cella schermata a ostruire l'apertura e si è misurato il parametro  $S_{21, dB}^1$  (4) relativo alla propagazione in presenza dello schermo del campo tra le antenne horn TX e RX (Figura 8).



Figura 8 Misura della SE con antenne TX e RX in polarizzazione verticale in presenza di schermo.

Al fine di stabilire l'effetto della presenza dei SC all'interno della parete, si è inoltre ripetuta la misura con la parete priva dei SC al suo interno. La configurazione di prova è la stessa di Figura 8.

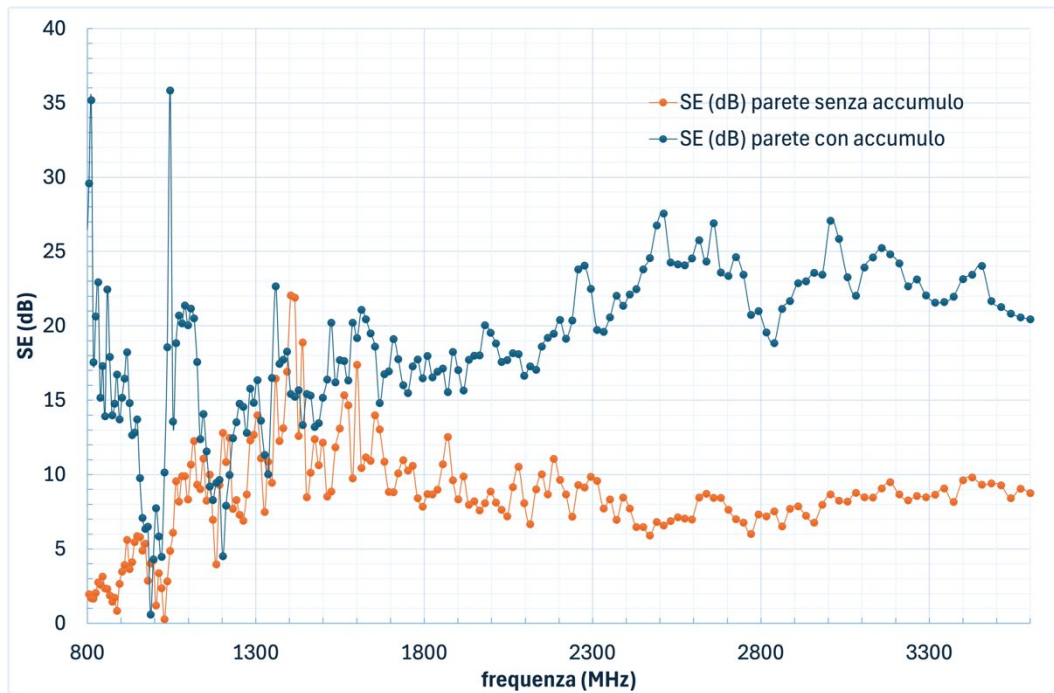


Figura 9 SE misurata con antenne TX e RX in polarizzazione verticale: confronto tra parete ad accumulato e parete senza accumulato.

Il confronto della SE misurata con antenne horn in polarizzazione verticale per la parete con accumulato e per quella senza accumulato è mostrato in Figura 9. Si osserva che la SE della parete con accumulato è maggiore di quella della parete priva di accumulato in tutto l'intervallo di frequenza considerato, ad eccezione di alcune frequenze tra 1000 e 1500 MHz. A partire da 1500 MHz la SE della parete con accumulato risulta compresa tra 15 e 28 dB e almeno 10-15 dB maggiore di quella della parete priva di accumulato. Tra 800 e 1050 MHz circa si notano alcuni picchi per la SE della parete con accumulato, probabilmente dovuti a una non efficace penetrazione del campo ad alcune frequenze. In generale, il confronto appare più significativo per frequenze maggiori di 1500 MHz, frequenza prossima a quella minima di lavoro delle antenne horn impiegate nelle misure. In conclusione, la parete ad accumulato presenta una maggiore SE della parete priva di accumulato energetico.

Si sono quindi ripetute le misure per le antenne entrambe in polarizzazione orizzontale. L'allestimento di prova è mostrato in Figura 10.

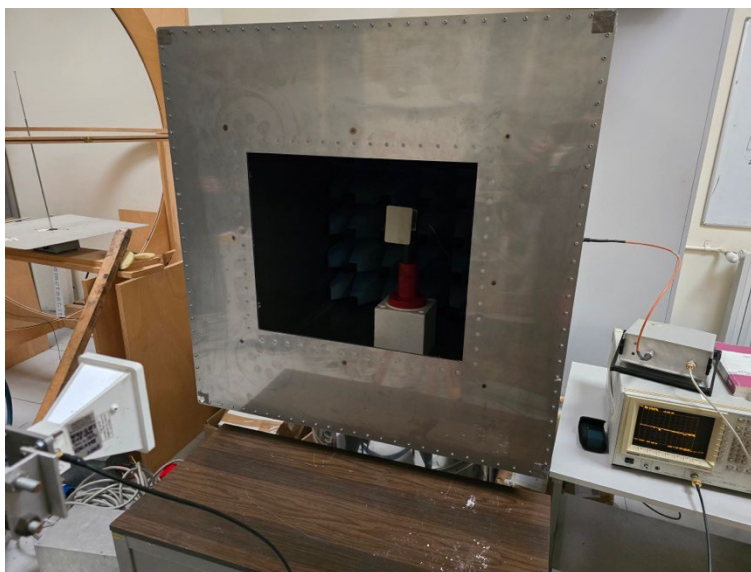


Figura 10 Misura della SE con antenne TX e RX in polarizzazione orizzontale in assenza di schermo.

Si è poi collocata la parete contenente i SC contro il lato frontale della cella schermata a ostruire l'apertura e si è misurato il parametro  $S_{21, dB}^1(4)$  relativo alla propagazione in presenza dello schermo del campo tra le antenne TX e RX. La configurazione di prova è mostrata in Figura 11.



Figura 11 Misura della SE con antenne TX e RX in polarizzazione orizzontale in presenza di schermo.

Al fine di stabilire l'effetto della presenza dei SC all'interno della parete, si è inoltre ripetuta la misura con la parete priva dei SC al suo interno. La configurazione di prova è la stessa di Figura 11.

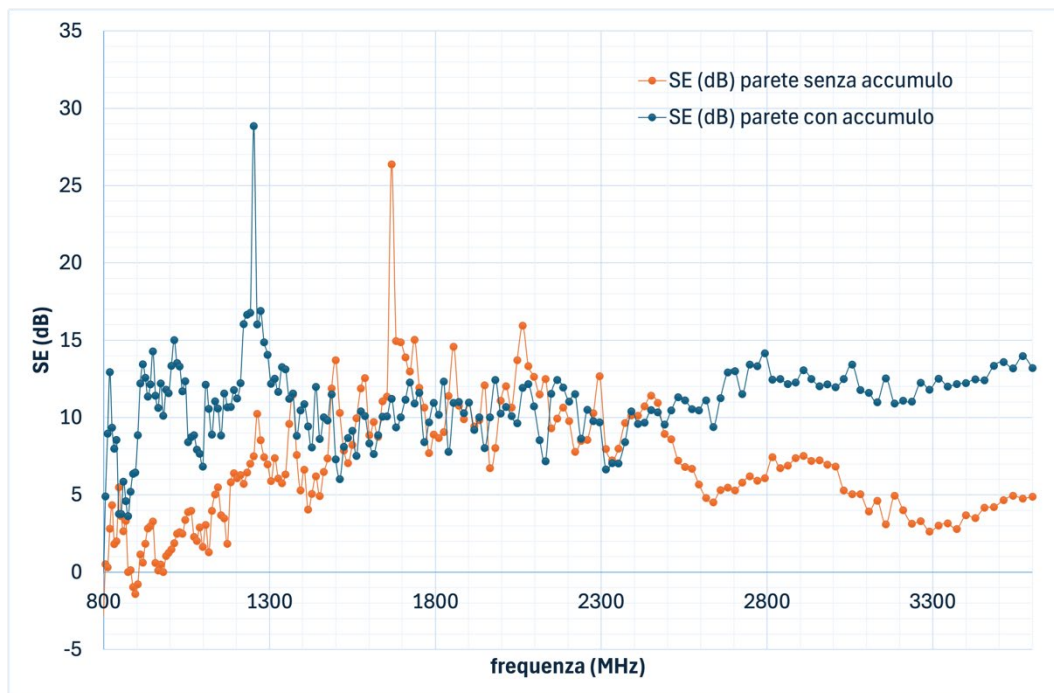


Figura 12 SE misurata con antenne TX e RX in polarizzazione orizzontale: confronto tra parete ad accumulato e parete senza accumulato.

Il confronto della SE misurata con antenne horn in polarizzazione orizzontale per la parete con accumulato e per quella senza accumulato è mostrato in Figura 12. Si osserva che la SE della parete con accumulato è maggiore di quella della parete priva di accumulato per frequenze tra 800 e 1400 MHz e maggiori di 2500 MHz, e inferiore tra 1500 e 1700 MHz. Tra 1700 e 2500 MHz la SE è confrontabile. Come per la polarizzazione verticale, il confronto appare più significativo per frequenze maggiori di 1500 MHz. Con le antenne in polarizzazione orizzontale, la parete con accumulato sembra ancora presentare una maggiore SE rispetto alla parete priva di accumulato, ad eccezione dell'intervallo tra 1500 e 2500 MHz, in cui la SE è comparabile. Per frequenze maggiori di 2500 MHz la SE della parete con accumulato risulta compresa tra 10 e 15 dB e almeno 5 dB maggiore di quella della parete priva di accumulato.

Come già menzionato, nell'intervallo di frequenze considerato si trovano alcune delle frequenze caratteristiche impiegate dai sistemi di telecomunicazione 2G, 3G, 4G e 5G e da alcune delle tecnologie IoT più diffuse. Lo studio condotto ha evidenziato che le pareti ad accumulato energetico hanno un effetto sulla propagazione dei campi elettromagnetici. Tuttavia, i ridotti valori di SE ottenuti dalle simulazioni e misurati sperimentalmente portano a ritenere che l'effetto schermante non riduca in modo sostanziale il rischio per l'uomo legato all'esposizione ai campi elettromagnetici, e allo stesso tempo non abbia un impatto negativo sulle comunicazioni e sul funzionamento delle tecnologie IoT.

## 7.6 Riferimenti bibliografici

1. C. R. Paul, *Introduction to Electromagnetic Compatibility*, John Wiley & Sons, 1992.
2. M. D'Amore, *Compatibilità Elettromagnetica*, Edizioni Scientifiche Siderea, 2003.
3. Validazione elettromagnetica di tamponature con accumulato elettrico integrato, Report RdS/PTR2021/136, L. Sandrolini e M. Simonazzi, 32 pp., dicembre 2021.

4. *IEEE Std 299-2006* "IEEE Standard Method for Measuring the Effectiveness of Electromagnetic Shielding Enclosures," (*Revision of IEEE Std 299-1997*), vol., no., pp.1-52, 28 Feb. 2007, doi: 10.1109/IEEESTD.2007.323387.
5. *ASTM E1851-21*, "Standard Test Method for Electromagnetic Shielding Effectiveness of Durable Rigid Wall Relocatable Structures,"
6. *IEC 61000-5-7:2001*, "Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 5-7: Installation and mitigation guidelines - Degrees of protection by enclosures against electromagnetic disturbances (EM code)".
7. *IEC 61000-4-21:2011*, "Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-21: Testing and measurement techniques - Reverberation chamber test methods".
8. C. L. Holloway, D. Hill, J. Ladbury, G. Koepke, and R. Garzia, "Shielding effectiveness measurements of materials in nested reverberation chambers" *IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility*, vol. 45, no. 2, 2003.
9. B. Foulonneau, F. Gaudaire, and Y. Gabillet, "Measurement method of electromagnetic transmission loss of building components using two reverberation chambers," *Electron. Lett.*, vol. 32, no. 23, pp. 2130-2131, 1996.
10. NIST Construction Automation Program, Report No.3, "*Electromagnetic Signal Attenuation in Construction Materials*", Oct. 1997.
11. National Instruments Corporation, LabView v. 15. National Instruments Corporation, 2015.

## 8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

All'interno della LA3.14 il capitolato vigente non prevede consulenze, né sono state utilizzate nel corso dello svolgimento della LA.

## 9 Pubblicazioni scientifiche

Al momento della stesura della presente relazione non sono state completate pubblicazioni sull'attività svolta. Il cronoprogramma delle attività non ha permesso di completare il processo di pubblicazione; tuttavia, i risultati sono oggetto di elaborazione orientata alla sottomissione di un contributo per la conferenza IEEE EMC+SIP1 2026.

## 10 Eventi di disseminazione

27 novembre 2024: “Caratterizzazione elettromagnetica di tamponature prefabbricate in legno con accumulo energetico integrato”, contributo presentato al convegno *Piano Triennale di Realizzazione della Ricerca di Sistema elettrico nazionale*, Roma: Edifici ad alta efficienza per la transizione energetica - *Risultanze dei WP3 e WP4 del Progetto 1.5 del Piano Triennale di realizzazione 2022-2024 della Ricerca di Sistema elettrico nazionale (RdS)*