

Ricerca di Sistema elettrico



Attività di testing dei modelli di valutazione per l'adeguatezza, la sicurezza e la resilienza delle reti elettriche e caratterizzazione sperimentale dei componenti

V. Sorrentino, A. Ricca, A. Merola, V. Capaldo, M. Valenti,
G. Ferruzzi, R. Ciavarella

LA1.16 Attività di testing dei modelli di valutazione per l'adeguatezza, la sicurezza e la resilienza delle reti elettriche e caratterizzazione sperimentale dei componenti.

V. Sorrentino (ENEA), A. Ricca (ENEA), A. Merola (ENEA), V. Capaldo (ENEA), M. Valenti (ENEA), G. Ferruzzi (ENEA), R. Ciavarella (ENEA)

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 2: Digitalizzazione ed evoluzione delle reti

Progetto 2.3: Evoluzione, pianificazione, gestione ed esercizio delle reti elettriche

Linea di attività LA 1.16: Attività di testing dei modelli di valutazione per l'adeguatezza, la sicurezza e la resilienza delle reti elettriche e caratterizzazione sperimentale dei componenti

Responsabile del Progetto: Maria Valenti, ENEA

Responsabile Linea di Attività: Vincenzo Sorrentino, ENEA

Mese inizio previsto: luglio 2023

Mese inizio effettivo: luglio 2023

Mese fine previsto: dicembre 2024

Mese fine effettivo: dicembre 2024

Indice

1	Risultati attesi	6
2	Risultati ottenuti.....	6
3	Prodotti attesi	6
4	Prodotti ottenuti.....	6
5	Analisi degli scostamenti su attività e risultati.....	8
6	Sintesi delle attività svolte	8
7	Dettaglio delle attività svolte.....	9
7.1	Testing sperimentale di modelli di valutazione per l'adeguatezza, la sicurezza e la resilienza di reti elettriche	9
7.2	Caratterizzazione sperimentale di componentistica integrata nelle reti elettriche .	12
8	Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte.....	14
9	Pubblicazioni scientifiche	14
10	Eventi di disseminazione	14
11	Descrizione dei risultati ottenuti	15
11.1	Testing sperimentale delle logiche di controllo sviluppate da POLIBA	15
11.2	Testing sperimentale delle logiche di controllo sviluppate da UNICA	28
11.3	Caratterizzazione sperimentale di componentistica integrata nelle reti elettriche .	28
11.3.1	Prova con temperatura crescente ed umidità non controllata.....	28
11.3.2	Prova con temperatura decrescente ed umidità non controllata.....	32
11.3.3	Prova con umidità crescente e temperatura costante	36
11.3.4	Prova con umidità e temperatura di camera costante.....	41
11.3.5	Osservazioni sui risultati ottenuti dai test sperimentali su componentistica elettrica integrata di rete	45
11.3.5.1	Prova con temperatura crescente ed umidità non controllata	45
11.3.5.2	Prova con temperatura decrescente ed umidità non controllata.....	48
11.3.5.3	Prova con umidità crescente e temperatura costante	52
11.3.5.4	Prova con umidità e temperatura di camera costante	55

Indice delle figure

Figura 1: Typhoon HIL.....	10
Figura 2: Simulatore di rete trifase MX30 e carichi elettronici AC ITECH IT8615	11
Figura 3: Carichi elettronici CC ITECH IT6018C-800-75	11
Figura 4: Smart Meter Yokogawa WT333E	12
Figura 5: Data sheet Cavi	12
Figura 6: Camera Climatica	13
Figura 7: Apparecchiature utilizzate	13
Figura 8: Script.....	14
Figura 9: Rete benchmark in DigSilent.....	16
Figura 10: Suddivisione zonale della rete benchmark	17
Figura 11: Rete benchmark ante controllo	19
Figura 12: Rete benchmark post controllo.....	20
Figura 13: Valori di potenza nodale.....	22
Figura 14: Pannello di controllo(a).....	23
Figura 15: Pannello di controllo (b).....	24
Figura 16: Scada configurazione ante (a).....	24
Figura 17: Scada configurazione ante (b).....	25
Figura 18: Itech misure vs set-up	25
Figura 19: Indici di affidabilità zonali configurazione ante	26
Figura 20: Scada configurazione post(a).....	26
Figura 21: Scada configurazione post (b).....	27
Figura 22: Indici di affidabilità zonali configurazione post.....	27
Figura 23: Temperature	29
Figura 24: Cadute di tensione (a)	30
Figura 25: corrente (b).....	30
Figura 26: Resistenze	30
Figura 27: R4 (a).....	31
Figura 28: R6 (b).....	31
Figura 29: R10 (c)	32
Figura 30: Temperature	33
Figura 31: Cadute di tensione	33
Figura 32: Corrente.....	34
Figura 33: Resistenze.....	34

Figura 34: R4	35
Figura 35: R6	35
Figura 36: R10	36
Figura 37: Temperatura di camera.....	37
Figura 38: umidità relativa di camera.....	37
Figura 39: Temperature	38
Figura 40: Cadute di tensione	38
Figura 41: Corrente.....	39
Figura 42: Resistenze	39
Figura 43: R4	40
Figura 44: R6	40
Figura 45: R10.....	41
Figura 46: Temperature e corrente.....	42
Figura 47: Cadute di tensione.....	42
Figura 48: Resistenze	43
Figura 49: R4	43
Figura 50: R6	44
Figura 51: R10.....	44
Figura 52: R4vsR4 teorica	45
Figura 53: DeltaR4	46
Figura 54: R6vsR6 teorica	46
Figura 55: DeltaR6	47
Figura 56: R10vsR10 teorica.....	47
Figura 57: DeltaR10	48
Figura 58: R4vsR4 teorica	49
Figura 59: DeltaR4	49
Figura 60: R6vsR6 teorica	50
Figura 61: DeltaR6	50
Figura 62: R10vsR10 teorica	51
Figura 63: DeltaR10	51
Figura 64: R4vsR4 teorica.....	52
Figura 65: DeltaR4	53
Figura 66: R6vsR6 teorica	53
Figura 67: DeltaR6.....	54
Figura 68: R10vsR10 teorica.....	54

Figura 69: DeltaR10	55
Figura 70: R4vsR4 teorica	56
Figura 71: . DeltaR4	56
Figura 72: R6vsR6 teorica	57
Figura 73: DeltaR6.....	57
Figura 74: R10vsR10 teorica.....	58
Figura 75: DeltaR10	58

Indice delle tabelle

Tabella 1: Componenti per zona	16
Tabella 2: Lista switch	18
Tabella 3; Variabili fz e Uz	21
Tabella 4: indici di affidabilità calcolati dall'università	22
Tabella 5: indici di affidabilità configurazione ante	26
Tabella 6: Indici di affidabilità configurazione post	27

1 Risultati attesi

I risultati attesi previsti da capitolato vigente sono:

- Configurazione topologica di tutti i modelli di rete forniti dalle LA di sviluppo (almeno 2).
- Test su ciascuna configurazione di rete in relazione alle logiche di controllo implementate nelle LA di sviluppo (almeno 3).
- Un dataset sperimentale per ogni componente individuato dalla LA1.3 (almeno 3 tipologie di componente)

2 Risultati ottenuti

Le attività svolte nella presente LA hanno riguardato:

- Configurazione topologica di tutti i modelli di rete forniti dalle LA di sviluppo
In accordo con le università co-beneficiarie del progetto è stata definita una rete test, denominata Extended City Area, da cui sono state ricavate le diverse configurazioni topologiche per il test delle logiche di controllo implementate nelle LA di sviluppo.
- 2 Test su ciascuna configurazione di rete in relazione alle logiche di controllo implementate nelle LA di sviluppo.
- Dataset sperimentali per cavi in bassa tensione di sezione 4, 6 e 10mmq rispettivamente e di lunghezza pari a 10 m cadauno. Tali campioni sono stati sottoposti a profili di temperatura e umidità di esercizio variabili.

3 Prodotti attesi

I prodotti attesi, come da capitolato, per la LA1.16 sono:

- Rapporto tecnico
- Dataset sperimentale per ogni componente individuato dalla LA1.3

4 Prodotti ottenuti

I prodotti ottenuti nell'ambito della LA1.5 sono:

- Rapporto tecnico di sintesi delle attività condotte, in cui sono illustrati
 - Descrizione dei test in ambiente HIL condotti sulle logiche di controllo implementate nelle LA1.8 e LA1.10 e relativi risultati
 - Descrizione della caratterizzazione sperimentale e relativi risultati (es. Profili delle grandezze elettriche dei cavi in bt al variare delle condizioni operative di temperatura e di umidità)

- Comparazione tra il comportamento teorico del componente (legge matematica) e il comportamento sperimentale.
- 12 dataset sperimentali
 1. Prova con temperatura crescente ed umidità non controllata su cavo per bassa tensione di sezione 4mmq e lunghezza pari a 10 m
 2. Prova con temperatura crescente ed umidità non controllata su cavo per bassa tensione di sezione 6mmq e lunghezza pari a 10 m
 3. Prova con temperatura crescente ed umidità non controllata su cavo per bassa tensione di sezione 10mmq e lunghezza pari a 10 m
 4. Prova con temperatura decrescente ed umidità non controllata su cavo per bassa tensione di sezione 4mmq e lunghezza pari a 10 m
 5. Prova con temperatura decrescente ed umidità non controllata su cavo per bassa tensione di sezione 6mmq e lunghezza pari a 10 m
 6. Prova con temperatura decrescente ed umidità non controllata su cavo per bassa tensione di sezione 10mmq e lunghezza pari a 10 m
 7. Prova con umidità crescente e temperatura costante su cavo per bassa tensione di sezione 4mmq e lunghezza pari a 10 m
 8. Prova con umidità crescente e temperatura costante su cavo per bassa tensione di sezione 6mmq e lunghezza pari a 10 m
 9. Prova con umidità crescente e temperatura costante su cavo per bassa tensione di sezione 10mmq e lunghezza pari a 10 m
 10. Prova con umidità e temperatura di camera costante su cavo per bassa tensione di sezione 4mmq e lunghezza pari a 10 m
 11. Prova con umidità e temperatura di camera costante su cavo per bassa tensione di sezione 6mmq e lunghezza pari a 10 m
 12. Prova con umidità e temperatura di camera costante su cavo per bassa tensione di sezione 10mmq e lunghezza pari a 10 m

I dataset verranno resi disponibili sul sito della Ricerca di Sistema ENEA al termine del processo di valutazione e sono allegati al report. In particolare, i dataset saranno organizzati "per tipologia di prova" (4 file ciascuno contenente i risultati relativi alle tre tipologie di cavo).

La fornitura dei dataset sperimentali colma il gap dovuto alla mancanza di dati sperimentali sui cavi in bassa tensione, liberamente accessibili dalla letteratura tecnico-scientifica, contribuendo così all'avanzamento rispetto allo stato dell'arte del progetto 2.3.

Il testing HiL delle logiche di controllo ne valuta sperimentalmente l'efficacia, potenziando ulteriormente gli avanzamenti strettamente connessi allo sviluppo delle logiche già riportati nei rapporti tecnici delle LA1.8 e LA1.10.

5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

TEST IN EMULAZIONE SPERIMENTALE

Il progetto 2.3 prevedeva, da capitolato, l'esecuzione di test in emulazione sulle LA1.5, LA1.6, LA1.8 e LA1.10.

Nell'ambito della LA1.6 (UNIPA) è stato sviluppato un modello per l'analisi in simulazione dell'impatto delle influenze esterne sulla sicurezza, adeguatezza e resilienza di porzioni di reti pubbliche o di utenti privati e una matrice di correlazione. Pertanto, non essendo state sviluppate logiche di controllo non è stato necessario eseguire test in emulazione di riconfigurazione con la rete ENEA di laboratorio ma sono stati condotti test in simulazione nella LA1.6, i cui risultati sono riportati nel report della linea (RdS_PTR22-24_PR 2.3_LA1.6_158).

Nell'ambito della LA1.5 (ENEA) sono stati sviluppati modelli per la valutazione dell'adeguatezza di reti elettriche in funzione dell'affidabilità del sistema e dei suoi componenti. Pertanto, non essendo state sviluppate logiche di controllo non è stato necessario eseguire test in emulazione di riconfigurazione con la rete ENEA di laboratorio ma sono stati condotti test in simulazione nella LA1.5, i cui risultati sono riportati nel report della linea (RdS_PTR22-24_PR 2.3_LA1.5_157).

In linea con il capitolato, congiuntamente con l'Università di Cagliari e il Politecnico di Bari sono stati condotti i test HiL sulle logiche di controllo sviluppate nelle LA1.8 e LA1.10.

DATASET SPERIMENTALI

Nella tabella 4 (Elementi di verifica del progetto) è erroneamente indicato che i dataset sperimentali andavano prodotti per i componenti evidenziati nella LA1.3. L'identificazione dei componenti da caratterizzare sperimentalmente, in realtà, è stata condotta nella LA1.1 (I SAL - RdS_PTR22-24_PR 2.3_LA1.1_063), come da descrizione della LA1.16 riportata nel capitolato di progetto *"Gli apparati oggetto di valutazione specifica saranno quelli per i quali non sarà stato possibile reperire dataset dalla letteratura di settore nell'ambito della LA1.1"*. La LA1.1 ha identificato i componenti per i quali non risultavano disponibili dataset sperimentali del tipo richiesto da progetto; per gli altri, è stata costruita una tabella con i riferimenti bibliografici da cui prelevare i dataset richiesti. Pertanto, a partire da tali informazioni, la presente LA, in linea con quanto previsto da progetto, ha caratterizzato sperimentalmente 3 tipologie di cavi in BT e fornito i relativi dataset sperimentali e le curve caratteristiche sperimentali al variare delle condizioni operative di temperatura e umidità.

6 Sintesi delle attività svolte

Le attività svolte possono essere suddivise in due macrocategorie distinte di attività.

- La prima categoria ha riguardato il test delle logiche di controllo della LA1.8 e LA1.10 mediante piattaforma Hardware-In-the-Loop (HIL) della Typhoon e nanogrid sperimentale ENEA.

In particolare, a valle della modellazione (model-based design) delle configurazioni di rete su piattaforma Typhoon HIL e dell'interconnessione con le apparecchiature di

laboratorio, sono stati eseguiti i test e calcolati i parametri di performance (test prima e dopo l'applicazione della logica di controllo) con il fine di comparare le prestazioni e valutare l'efficacia della logica sviluppata.

- La seconda fase ha riguardato la caratterizzazione sperimentale di componentistica integrata nelle reti elettriche.

Per l'attività di caratterizzazione sperimentale di componentistica integrata nelle reti elettriche, sono state eseguite prove sperimentali su campioni di cavi in bassa tensione di sezione 4, 6 e 10mmq rispettivamente e di lunghezza pari a 10 m cadauno.

Tali campioni sono stati sottoposti a profili di temperatura e umidità di esercizio generati in camera climatica, al fine di emulare gli effetti degli stress termici sulle prestazioni elettriche dei campioni stessi.

Dalle letture delle grandezze elettriche quali tensione e corrente di funzionamento sono state ricavate le impedenze elettriche dei campioni al variare delle condizioni di temperatura e umidità di esercizio.

Le prove sono state eseguite in corrente continua, in quanto stante le piccole lunghezze si ritengono non influenti le possibili variazioni di impedenza che si avrebbero in corrente alternata, intese in termini di reattanza induttiva e/o capacitiva.

Nel seguito si descrivono le prove sperimentali eseguite ed i risultati ottenuti. Inoltre, i dataset sperimentali ottenuti vengono infine paragonati con i valori calcolabili teoricamente applicando le leggi elettrotecniche di base al variare dei parametri termici.

7 Dettaglio delle attività svolte

L'attività di ricerca svolta nella seguente linea di attività può essere suddivisa in due macroaree tematiche:

- Testing sperimentale di modelli di valutazione per l'adeguatezza, la sicurezza e la resilienza di reti elettriche
- Caratterizzazione sperimentale di componentistica integrata nelle reti elettriche

7.1 Testing sperimentale di modelli di valutazione per l'adeguatezza, la sicurezza e la resilienza di reti elettriche

L'attività di testing sperimentale dei modelli di valutazione per l'adeguatezza, la sicurezza e la resilienza delle reti elettriche è stata effettuata mediante la componentistica elettronica ed elettrica presente nel laboratorio SGRE del centro ricerche ENEA di Portici.

In particolare, per mezzo di tale componentistica di laboratorio è possibile emulare sperimentalmente reti sia in CC con tensioni fino a 100V che reti in AC con tensioni fino a 400V. I diversi device utilizzati per l'emulazione della generazione distribuita, accumulo e carichi

elettrici sono stati collegati ai bus in corrente alterna ed in corrente continua del laboratorio al fine di emulare sperimentalmente la configurazione di rete analizzata.

Al fine di validare i controlli forniti dalle università partner di progetto, è stata utilizzata una piattaforma Hardware-In-the-Loop (HIL) della Typhoon per la riconfigurazione della rete sperimentale di laboratorio.



Figura 1: Typhoon HIL

A partire dalla configurazione topologica della rete benchmark definita dai partner di progetto, il digramma della rete sperimentale è stato modellato in model based design mediante librerie di modelli di componenti in ambiente HIL e sviluppando il controllo degli stessi per la validazione delle configurazioni di rete modellate e/o emulate.

Sono stati realizzati i collegamenti dei device di laboratorio agli ingressi/uscite analogico/digitali della piattaforma HIL al fine di emulare parte della rete sperimentale in bassa tensione, mentre la parte di rete in alta tensione è stata modellata per mezzo del software Schematic Editor della Typhoon. Il risultato è stato quello di ottenere una rete sperimentale, in parte simulata ed in parte emulata, in versione scalata della rete benchmark scelta.

Ad esempio, la parte di rete sperimentale a 400V in AC è stata emulata collegando il simulatore di rete trifase MX30 a carichi elettronici AC del tipo ITECH IT8615:



Figura 2: Simulatore di rete trifase MX30 e carichi elettronici AC ITECH IT8615

mentre la generazione distribuita in CC, come gli impianti fotovoltaici, ed i sistemi di accumulo sono stati emulati per mezzo di carichi elettronici bidirezionali costituiti da ITECH IT6018C-800-75 come mostra la seguente figura:



Figura 3: Carichi elettronici CC ITECH IT6018C-800-75

Si è proceduto alla modellazione di un pannello di controllo della rete sperimentale in ambiente SCADA, in cui sono stati utilizzati diversi widgets (come gauge, busbar, box) per la lettura delle grandezze elettriche istantanee e per il settaggio dei diversi device utili ad emulare la sezione di interesse della rete sperimentale.

La lettura delle grandezze elettriche è stata realizzata mediante l'utilizzo di smart meter Yokogawa come mostra la seguente figura:

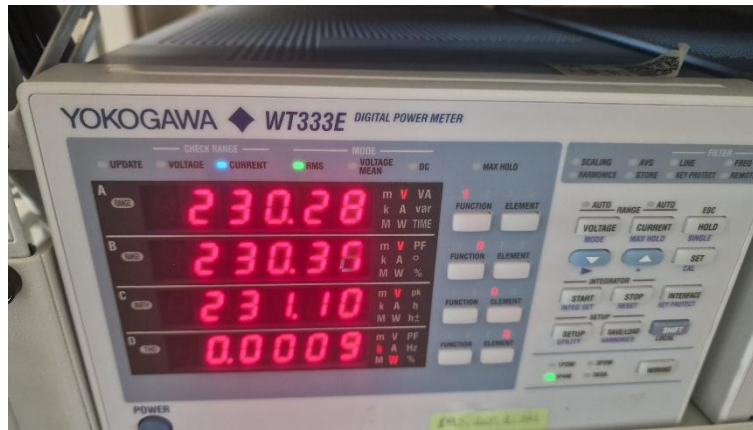


Figura 4: Smart Meter Yokogawa WT333E

Successivamente, sono stati testati i collegamenti filati ed anche Ethernet con protocollo Modbus TCP/IP in termini di latenza dei segnali inviati/ricevuti dalla piattaforma HIL alle diverse apparecchiature presenti in laboratorio.

7.2 Caratterizzazione sperimentale di componentistica integrata nelle reti elettriche

L'attività sperimentale consiste in test di caratterizzazione di componenti elettrici in cui le performance elettriche del campione vengono esaminate in funzione di diversi andamenti di temperatura ed umidità di esercizio.

In particolare, si sono analizzati cavi elettrici in bt isolati in PVC con sezioni da 4mmq, 6mmq e 10mmq, rispettivamente. La seguente figura mostra il datasheet dei cavi fornito dal costruttore:

Bassa Tensione
Low Voltage

FS17 450/750 V

Formazione	Ø indicativo conduttore	Spessore medio isolante	Ø indicativo produzione	Peso indicativo cavo	Resistenza elettrica max a 20°C	Portata di corrente a 30°C in tubo in aria
Formation	Approx. conductor Ø	Average insulation thickness	Approx. production Ø	Approx. cable weight	Max. electrical resistance at 20°C	Current rating at 30°C In pipe in air
n° x mm²	mm	mm	mm	kg/km	ohm/ km	A
1 x 1	1,3	0,7	2,7	15	19,5	12
1 x 1,5	1,6	0,7	2,9	20	13,3	16
1 x 2,5	1,9	0,8	3,6	31	7,98	21
1 x 4	2,5	0,8	4,2	45	4,95	28
1 x 6	3,0	0,8	4,6	63	3,30	36
1 x 10	4,0	1,0	6,0	109	1,91	50
1 x 16	5,0	1,0	7,0	160	1,21	68

Figura 5: Data sheet Cavi

Per la caratterizzazione sono stati analizzati campioni di cavi della lunghezza di 10m cadauno. I suddetti campioni sono stati inseriti nella camera climatica BLINDE MKF 1020 e sottoposti a gradienti di temperatura ed umidità.



Figura 6: Camera Climatica

È stato realizzato un setup sperimentale costituito da un generatore di corrente costituito da generatore bidirezionale Itech IT6015B-80-360, multimetri del tipo FLUKE 8846A per la lettura a quattro morsetti delle temperature delle guaine dei cavi e della temperatura interna alla camera climatica, prelevate tramite sonde PT100, e delle cadute di tensioni ai capi dei campioni.



Figura 7: Apparecchiature utilizzate

Le misure di temperatura e tensione dei multimetri sono state acquisite da un PC collegato agli stessi multimetri per mezzo di collegamento Ethernet; infatti, è stato modellato un apposito script in Python tramite il quale è stato possibile acquisire le misure di temperature, tensioni e corrente da cui ricavare le impedenze dei campioni di cavi analizzati, per mezzo di comandi SCPI inviati agli strumenti.

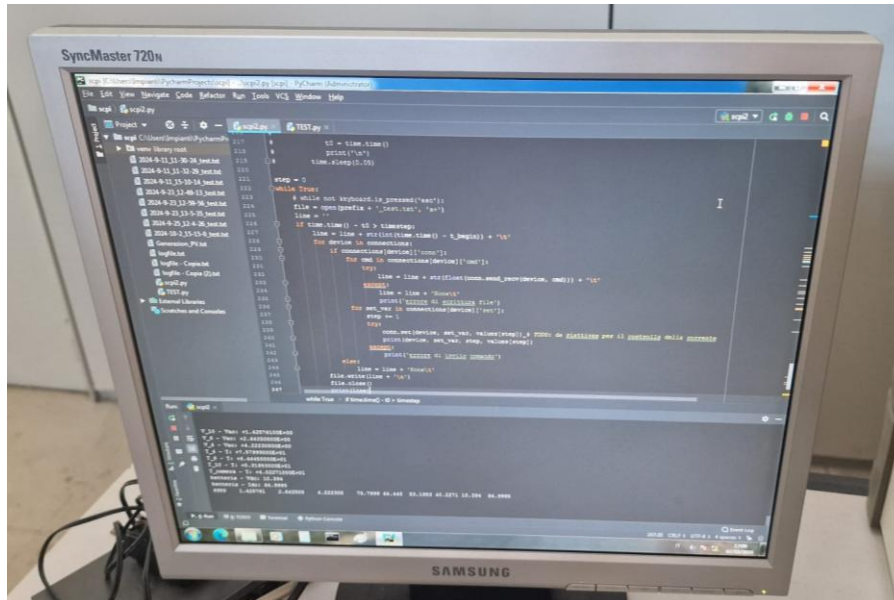


Figura 8: Script

Prima di finalizzare l'attività di caratterizzazione sperimentale, sono state eseguite delle prove preliminari per la taratura dell'ambiente sperimentale. In particolare, tali prove hanno evidenziato un tempo caratteristico di circa 12 minuti per il raggiungimento del regime termico tra la temperatura dei campioni e la temperatura ambiente impressa in camera climatica.

8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

Nella LA1.16 non sono state attivate consulenze.

9 Pubblicazioni scientifiche

Non sono state prodotte pubblicazioni scientifiche.

10 Eventi di disseminazione

Le attività svolte in questa LA sono state presentate all'evento finale "Evoluzione, pianificazione, gestione ed esercizio delle reti elettriche" che si è tenuto martedì 3 Dicembre 2024 presso il Centro di Ricerche ENEA di Portici - P. le Enrico Fermi 1, Portici 80055 (NA).

Figura 9: Rete benchmark in DigSilent

La rete sperimentale è stata suddivisa in diverse zone a cui afferiscono i diversi componenti come nodi, linee e carichi in accordo con quanto riportato nella seguente tabella TAB1:

ZONE	Nodi in zone	Branch in zone	Carichi in zone
z0	n_001, n_002, n_029s	Transformer.trf1, Line.l_002-029_tr2	
z1	ug_bb2_2kv, ug_serv_bbs	Transformer.ug_serv_tr	Load.ugs_load_eq
z2	n_029, n_033s, n_031, n_030s	Line.l_029-033, Line.l_029-031, Line.l_031-030	Load.load_031
z3	n_033, n_032s	Line.l_033-032	Load.load_033_1, Load.load_033_2
z4	n_030, n_027s	Line.l_030-027	Load.load_030
z5	n_027, city_bb, ug_bb_20kv, ug_bb1_2kvs, ug_bb2_2kvs, rs_bb_20kv, rs_bb_04kvs	Transformer.ug_tr1, Transformer.ug_tr2, Transformer.rs_tr, Line.l_027-city_bb, Line.ug_line, Line.rs_line	Load.load_027_1, Load.load_027_2, Load.load_027_3
z6	rs_bb_04kv, ev-charge_bbs	Line.ev-charge_line	Load.rs_ac-load1, Load.rs_ac-load2, Load.rs_ev-charge
z7	n_032		Load.load_032_1, Load.load_032_2, Load.load_032_3
z8	ug_serv_bb		Load.ug_serv_ac-load1, Load.ug_serv_ac-load2
z9	ug_bb1_2kv		Load.ug_load_eq
z10	ev-charge_bb		Load.ev-charge_load
Z11	res_bb		

Tabella 1: Componenti per zona

Nella seguente figura vengono riportate visivamente le suddette zone in cui è stata suddivisa la rete sperimentale:

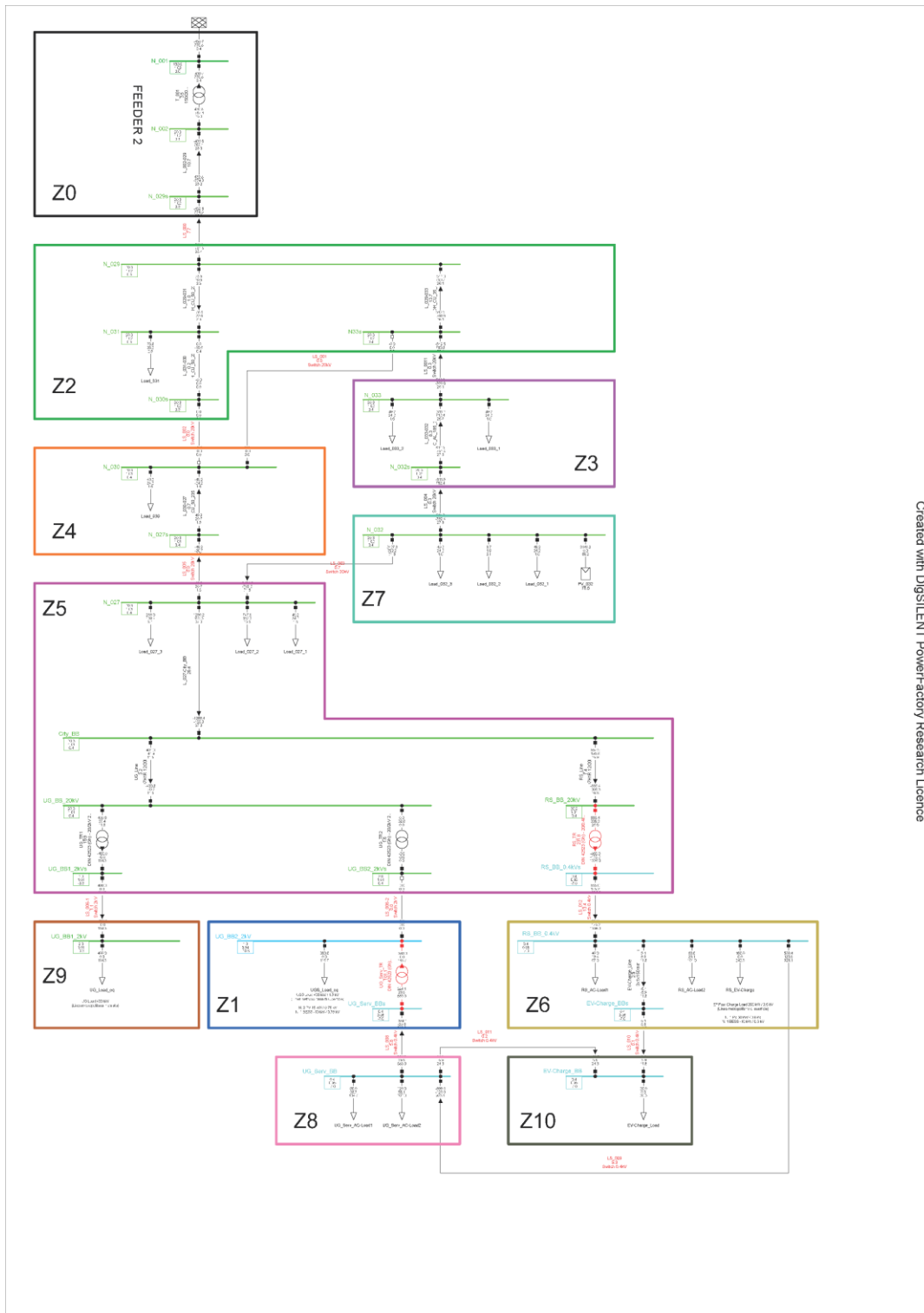


Figura 10: Suddivisione zonale della rete benchmark

Come si può notare la rete benchmark risulta molto magliata per mezzo della presenza di diversi switch di connessione tra le diverse zone, la cui apertura/chiusura garantiscono una riconfigurazione ottimale della rete stessa. La seguente tabella riporta lo stato di tali switch per l'individuazione della configurazione di rete ante e post intervento del controllo sviluppato dall'università:

Nome switch	Zone from_to	Pre-ONR	Post-ONR
Line,ls_000-000_m	z0, z2	ON	ON
Line,ls_001-001_m	z3, z4	OFF	OFF
Line,ls_002-002_m	z2, z4	OFF	ON
Line,ls_003-003_m	z7, z5	ON	ON
Line,ls_004-004_m	z3, z7	ON	ON
Line,ls_005-005_m	z4, z5	ON	OFF
Line,ls_008-008_m	z1, z8	ON	ON
Line,ls_009-009_m	z8, z6	ON	OFF
Line,ls_010-010_m	z6, z10	ON	ON
Line,ls_0011-0011_m	z2, z3	ON	ON
Line,ls_011-011_m	z8, z10	OFF	OFF
Line,ls_012-012_m	z5, z6	ON	ON
Line,ls_014-014_m	z11, z6	ON	ON
Line,ls_0061-0061_m	z5, z9	ON	ON
Line,ls_0062-0062_m	z5, z1	OFF	ON
Line,ls_000-000_m	z0, z2	ON	ON

Tabella 2: Lista switch

Pertanto, ciò ha permesso di individuare le seguenti configurazioni di rete da analizzare, ante e post intervento dell'azione di controllo:

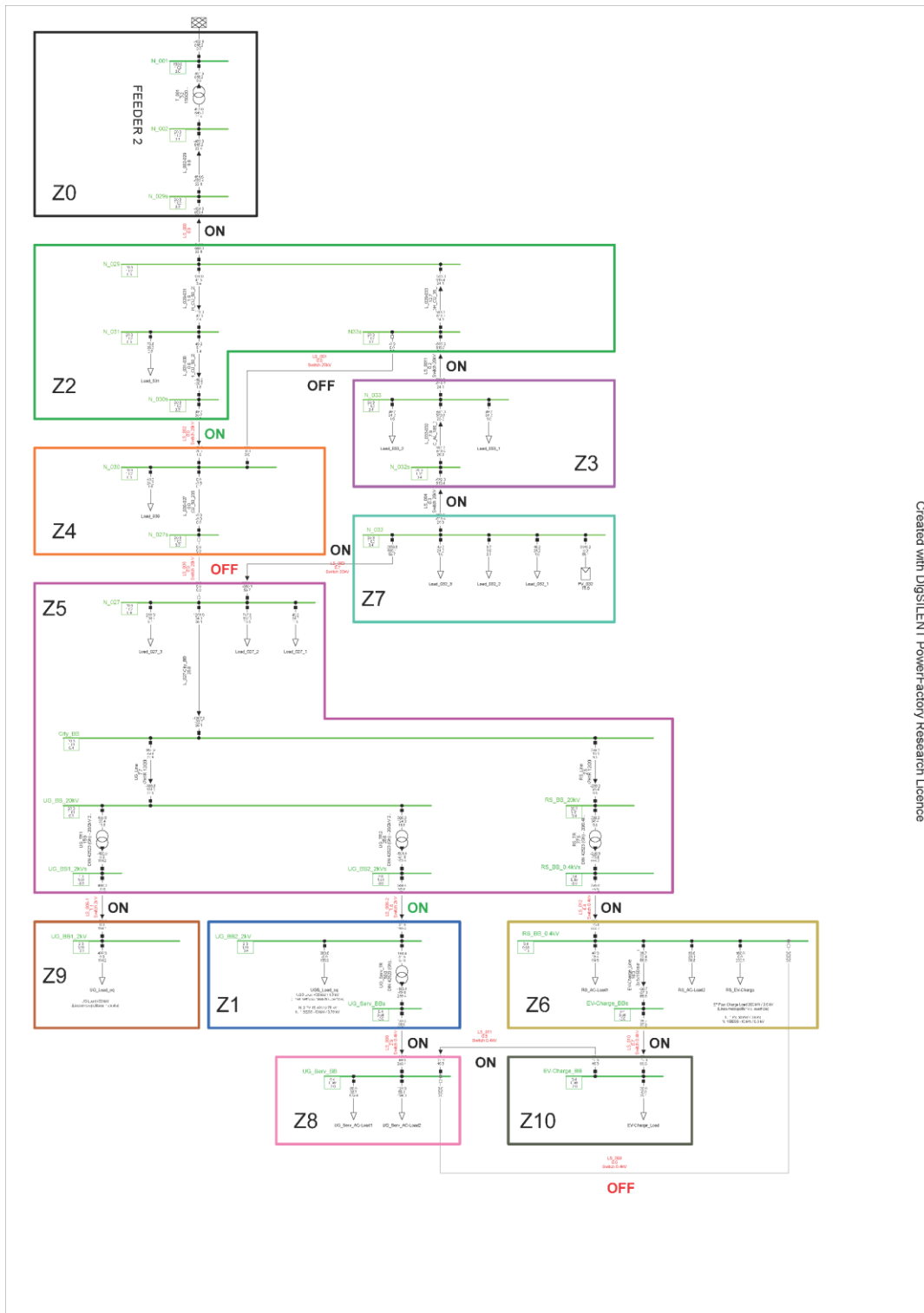


Figura 12: Rete benchmark post controllo

Per ogni zona è stata calcolata la frequenza di guasti f_z e l'indisponibilità di zona U_z definite mediante le seguenti formule:

$$f_z^{FRG} = \sum_{k \in \Omega_z} y_{k,z} \cdot \lambda_k \quad \forall z \in \Omega_z \quad [h/anno]$$

$$U_z^{FRG} = \sum_{k \in \Omega_z} [z_{k,z}^{up} \cdot \lambda_k \cdot \mu_k + (y_{k,m} - z_{k,z}^{up}) \cdot \lambda_k \cdot \bar{\mu}] \quad \forall z \in \Omega_z \quad [h/anno]$$

dove:

Ω_z	Zone
$\bar{\mu}$	Tempo di completamento della richiusura automatica [h]=0,05
$z_{k,m}^{up}$	Condizione di connessione “a monte”: è uguale a 1 se la zona k si trova a monte della zona m , (altrimenti 0),
$y_{k,m}$	Condizione di parentela tra zone: è uguale a 1 se le zone k ed m appartengono allo stesso feeder (altrimenti 0),

Pertanto, sono stati calcolati i suddetti parametri per le configurazioni di rete ante e post intervento dell'azione di controllo, ipotizzando un numero di clienti per ogni zona, come riportato nella seguente tabella:

ZONE	Numero clienti	PRE		POST	
		Fz	Uz	fz	Uz
z0	0	0	0	0,0	0,0
z1	2303	2,6766	7,7157	2,676596	7,6062
z2	1831	2,6766	4,9667	2,676596	4,9666
z3	2604	2,6766	5,2888	2,676596	5,2888
z4	2251	2,6766	8,4952	2,676596	5,9187
z5	5412	2,6766	7,5431	2,676596	7,5431
z6	6133	2,6766	7,6211	2,676596	7,6211
z7	3600	2,6766	5,3211	2,676596	5,3211
z8	3081	2,6766	7,6526	2,676596	7,6377
z9	2303	2,6766	7,5746	2,676596	7,5746
z10	474	2,6766	7,6526	2,676596	7,6526
z11	0	2,6766	7,6526	2,676596	7,6526

Tabella 3; Variabili **fz** e **Uz**

Settando i profili di potenza di generazione e di carico per ogni nodo della rete sperimentale analizzata come mostrato nella seguente figura:

Name	Grid	Terminal StaCubic	Terminal Busbar	u, Magnitude p.u.	Active Power kW	Reactive Power kvar	Apparent Power kVA	Power Factor
EV-Charge_Load	Grid		EV-Charge_BB	0.953	20.0	0.0	20.0	1.000
Load_027_1	Grid		N_027	1.015	49.2	24.2	54.8	0.897
Load_027_2	Grid		N_027	1.015	747.9	362.3	831.0	0.900
Load_027_3	Grid		N_027	1.015	288.0	139.7	320.0	0.900
Load_030	Grid		N_030	1.015	49.2	24.2	54.8	0.897
Load_031	Grid		N_031	1.015	78.8	38.2	87.6	0.900
Load_032_1	Grid		N_032	1.016	49.2	24.2	54.8	0.897
Load_032_2	Grid		N_032	1.016	3.7	1.9	4.1	0.894
Load_032_3	Grid		N_032	1.016	49.2	24.2	54.8	0.897
Load_033_1	Grid		N_033	1.016	49.2	24.2	54.8	0.897
Load_033_2	Grid		N_033	1.016	49.2	24.2	54.8	0.897
RS_AC-Load1	Grid		RS_BB_0.4kV	0.953	40.0	19.4	44.4	0.900
RS_AC-Load2	Grid		RS_BB_0.4kV	0.953	60.0	29.1	66.7	0.900
RS_EV-Charge	Grid		RS_BB_0.4kV	0.953	160.0	0.0	160.0	1.000
UGS_Load_eq	Grid		UG_BB2_2kV	0.940	380.0	0.0	380.0	1.000
UG_Load_eq	Grid		UG_BB1_2kV	1.010	400.0	0.0	400.0	1.000
UG_Serv_AC-Load1	Grid		UG_Serv_BB	0.953	80.0	38.7	88.9	0.900
UG_Serv_AC-Load2	Grid		UG_Serv_BB	0.953	120.0	58.1	133.3	0.900

Figura 13: Valori di potenza nodale

sono stati calcolati i seguenti indici di affidabilità dati dalle seguenti espressioni:

$$EENS = \sum_{z \in \Omega_z} P_z^D \cdot U_z \quad [kWh/anno]$$

$$SAIDI = \frac{\sum_{z \in \Omega_z} U_z \cdot N_z}{\sum_{z \in \Omega_z} N_z} \quad [h/anno]$$

$$SAIFI = \frac{\sum_{z \in \Omega_z} f_z \cdot N_z}{\sum_{z \in \Omega_z} N_z} \quad [guasti/anno]$$

dove $EENS$ è Expected Energy Not Served, $SAIDI$ è System Average Interruption Duration Index, $SAIFI$ è System Average Interruption Frequency Index.

Nella seguente tabella vengono riportati i valori calcolati dai ricercatori dell'università di Bari dei suddetti indici per entrambe le configurazioni di rete, ante e post intervento dell'azione di controllo:

	EENS	SAIDI	SAIFI
ANTE	19690,27	7,0393	2,67659
POST	19519,01	6,8360	2,67659

Tabella 4: indici di affidabilità calcolati dall'università

Nell'attività di testing sperimentale per la validazione dei modelli sviluppati dalle università partner, sono state modellate le configurazioni di rete ante e post intervento dell'azione di controllo in ambiente HIL, in una versione scalata in potenza del 1/100 al fine di poter permettere l'emulazione di parte della rete sperimentale con la componentistica di laboratorio.

A tal proposito la parte della rete benchmark in AC e DC è stata emulata mediante l'utilizzo di carichi elettronici bidirezionali DC marca ITECH, per l'emulazione di generazione fotovoltaica ed accumulo in DC, e mediante simulatore di rete trifase in bt AC MX30 collegato a carichi elettronici AC marca ITECH. I set up sperimentali, in termini di potenza di generazione o di carico e tensione, vengono imposti dalla piattaforma HiL ai suddetti componenti di laboratorio per mezzo di segnali analogici $\pm 10V$ su collegamenti filati.

Le misure delle grandezze elettriche in tempo reale sono state acquisite mediante SmartMeter Yokogawa WT333 collegati a loro volta mediante collegamento Ethernet alla piattaforma HIL e la lettura delle stesse è stata possibile interrogando i registri del protocollo Modbus TCP/IP.

Sono stati modellati in ambiente software gli switch di interconnessione zonale, la cui attivazione ha permesso di testare in ambiente emulato le configurazioni ante e post intervento dell'azione di controllo della Extended City Area. In particolare, al fine di attivare e/o disattivare i suddetti switch per la configurazione della rete sperimentale è stato realizzato in apposito pannello di controllo in ambiente SCADA, come riportato nella seguente figura:

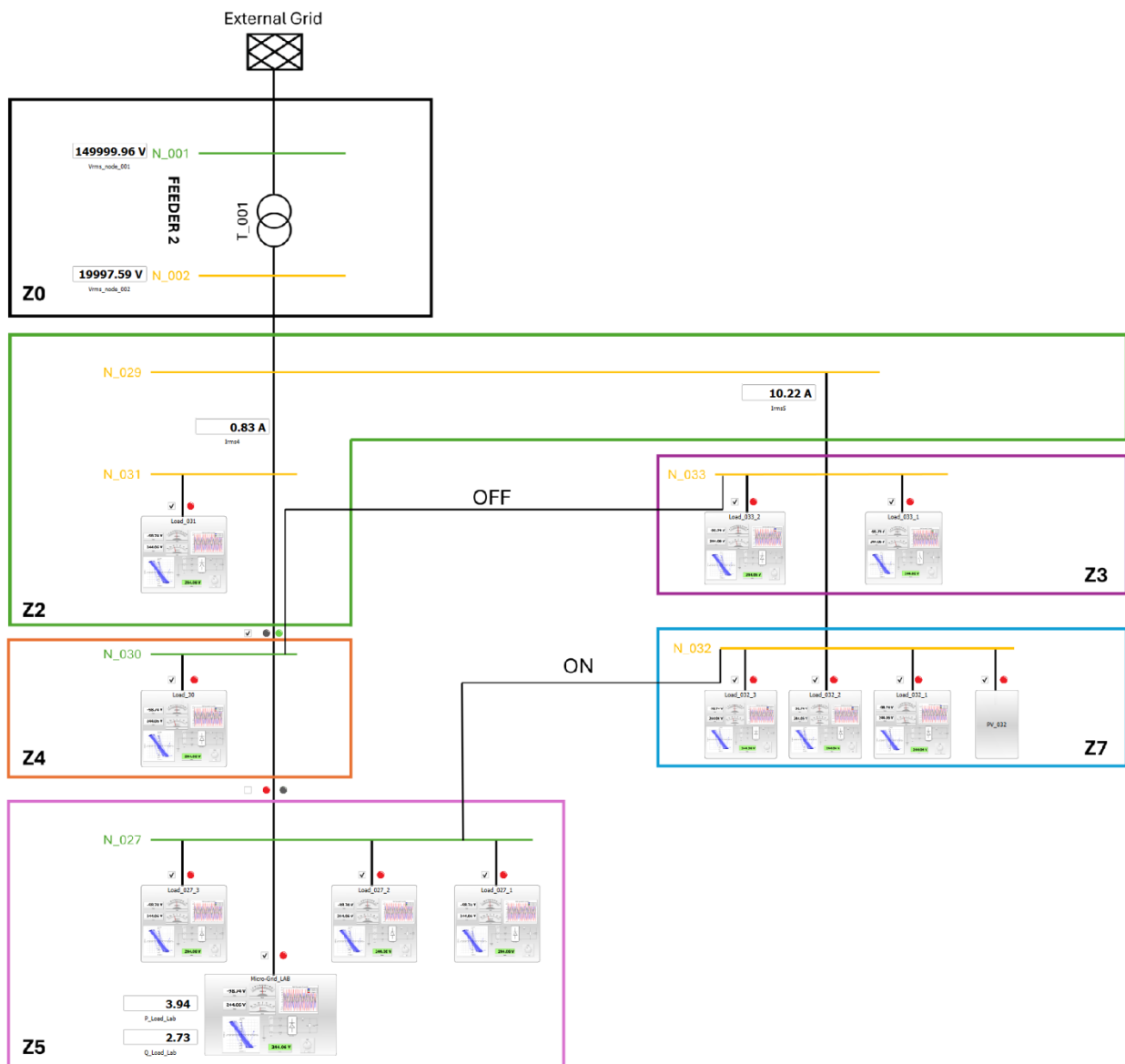


Figura 14: Pannello di controllo(a)

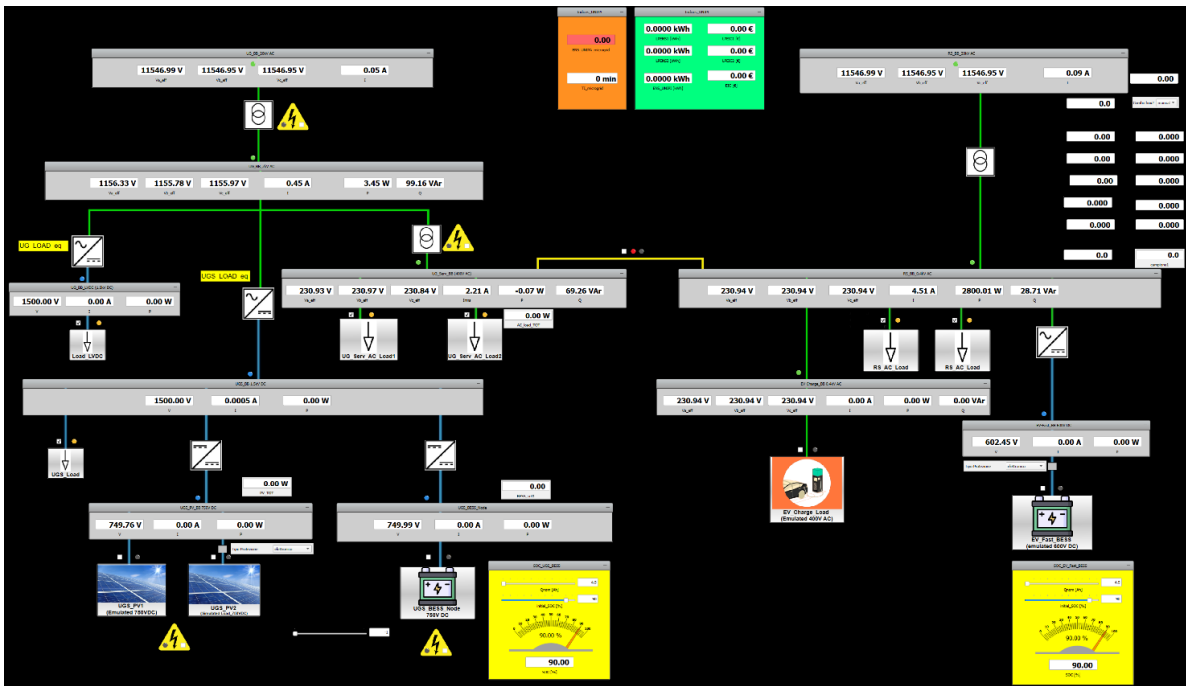


Figura 15: Pannello di controllo (b)

È stata analizzata la configurazione di rete ante intervento dell'azione di controllo scalando opportunamente i livelli di potenza di carico e di generazione distribuita ed azionando gli switch concordemente ai test condotti dall'università di Bari, come evincibile dalla seguente figura:

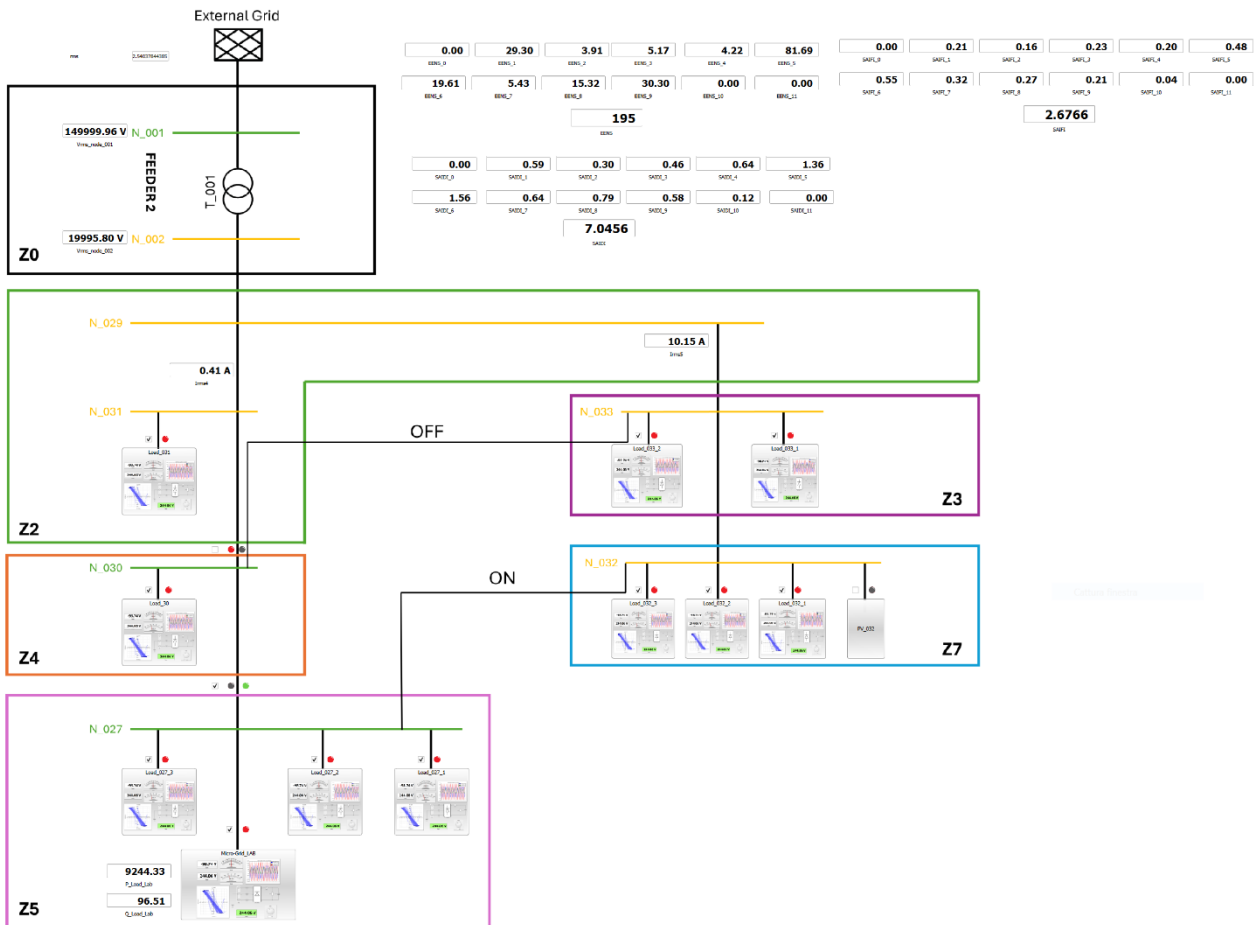


Figura 16: Scada configurazione ante (a)

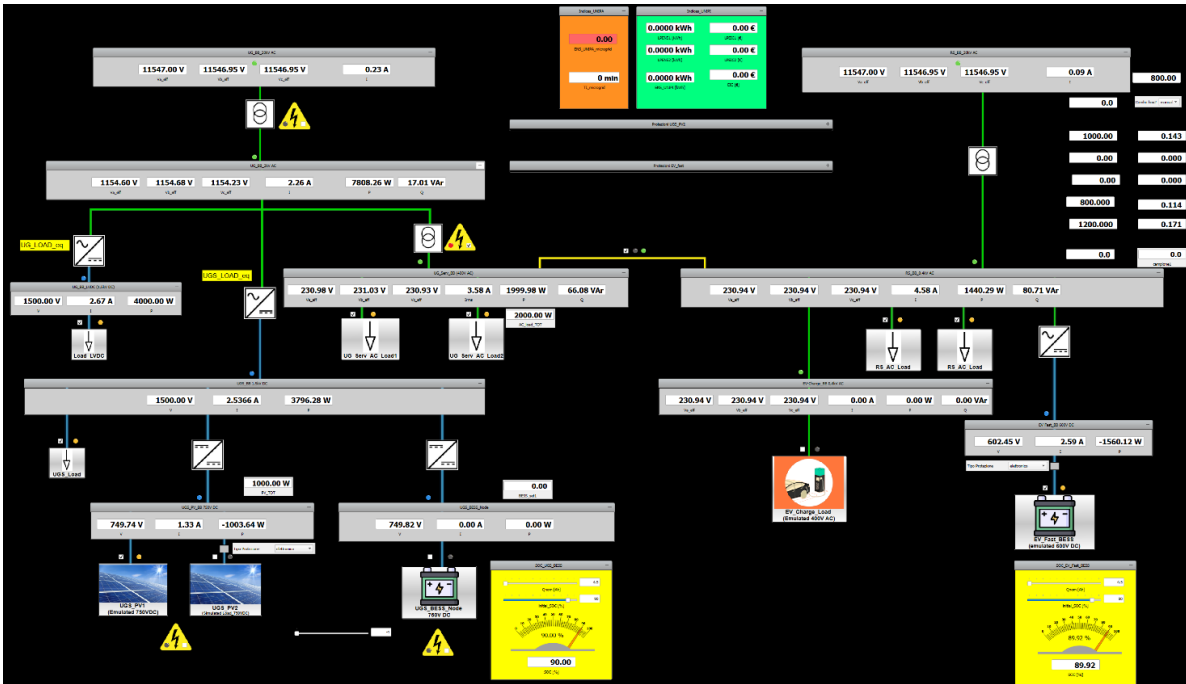


Figura 17: Scada configurazione ante (b)

Gli strumenti di laboratorio necessari all'emulazione di una sezione in bassa tensione della rete sperimentale sono stati settati in termini di potenza e di tensione mediante segnali analogici inviati dalla piattaforma HIL per mezzo del pannello di controllo in ambiente SCADA; allo stesso modo le grandezze elettriche acquisite sono state monitorate on-line per mezzo di appositi widgets (gauge e display) sullo stesso pannello di controllo SCADA. La seguente figura mostra a titolo d'esempio il settaggio dello strumento di laboratorio ed il monitoraggio delle sue grandezze elettriche in ambiente SCADA:



Figura 18: Itech misure vs set-up

Per ogni zona della rete sperimentale sono stati ricavati gli indici di affidabilità EENS, SAIDI e SAIFI come riportato nella seguente figura:



Figura 19: Indici di affidabilità zionali configurazione ante

la cui somma ha permesso di calcolare gli indici di affidabilità totali della configurazione di rete ante intervento dell'azione di controllo:

	EENS	SAIDI	SAIFI
ANTE	195	7,0456	2,6766

Tabella 5: indici di affidabilità configurazione ante

Il passo successivo è stato quello di agire sugli switch di interconnessione zionali per ottenere la configurazione ottimale della rete sperimentale calcolata dall'azione di controllo sviluppata dall'università:

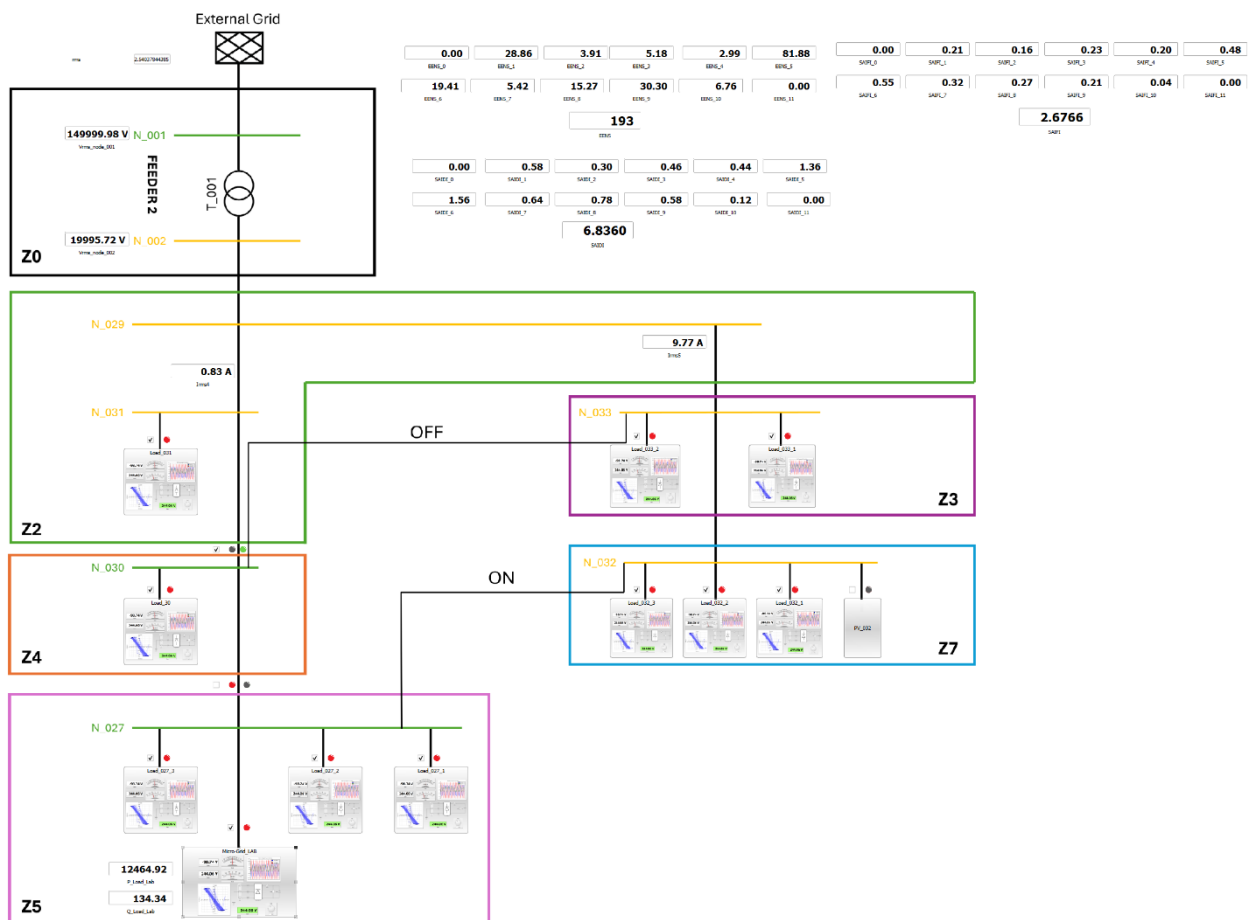


Figura 20: Scada configurazione post(a)

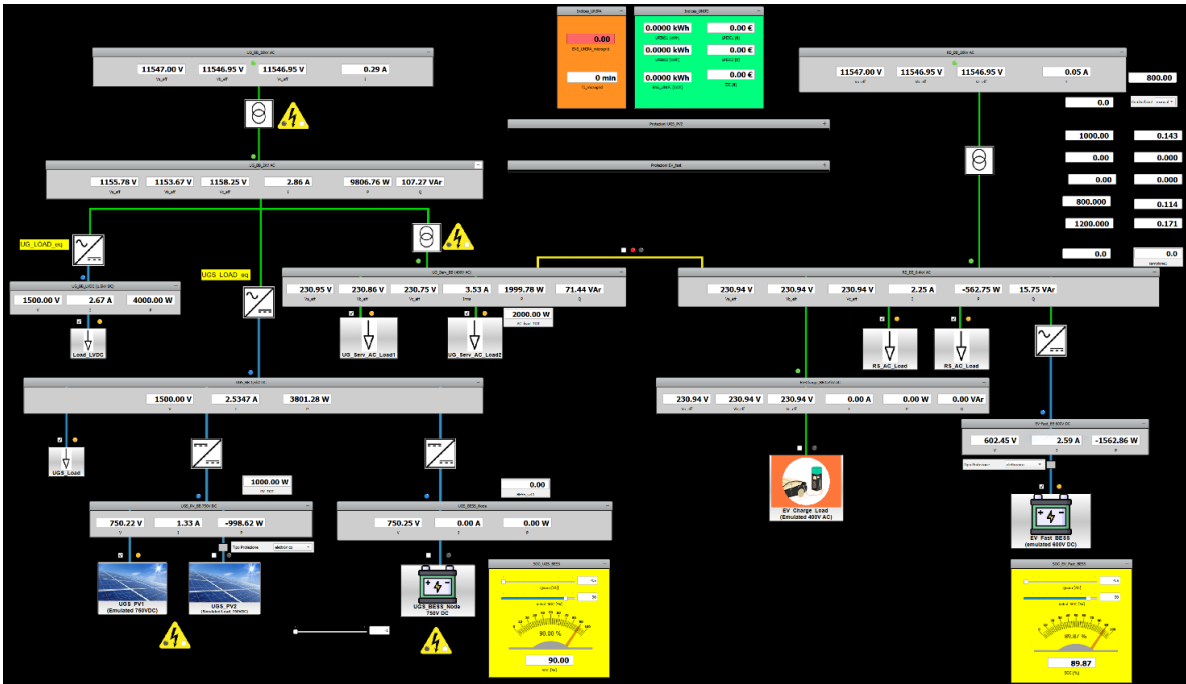


Figura 21: Scada configurazione post (b)

Sono stati calcolati gli indici di affidabilità zionali:

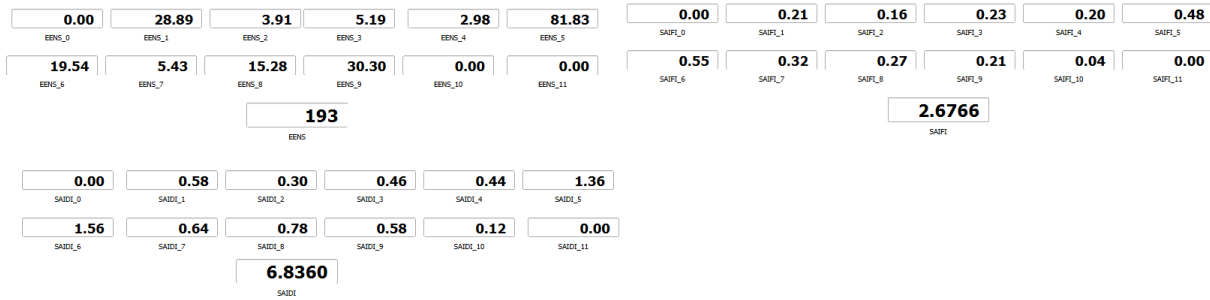


Figura 22: Indici di affidabilità zionali configurazione post

Ottenendo i seguenti valori totali degli indici di affidabilità della configurazione di rete sperimentale post azione di controllo:

	EENS	SAIDI	SAIFI
ANTE	193	6,8360	2,6766

Tabella 6: Indici di affidabilità configurazione post

Paragonando i risultati ottenuti dai test sperimentali sulle configurazioni di rete ante e post intervento dell'azione di controllo si nota che gli stessi sono in linea con i risultati simulativi ottenuti dai ricercatori dell'università ed inoltre viene confermata la diminuzione degli indici EENS, SAIDI e SAIFI anche in ambiente emulativo sperimentale. Pertanto, il modello di controllo sviluppato dall'università risulta valido a migliorare in termini di affidabilità, resilienza e sicurezza la configurazione della rete benchmark.

11.2 Testing sperimentale delle logiche di controllo sviluppate da UNICA

A valle dei test sopra descritti relativi alla LA1.10, sono stati condotti congiuntamente all'Università di Cagliari i test HIL pre e post intervento (ovvero applicazione delle logiche di controllo sviluppate dall'Università nell'ambito della LA1.8). Emulando la medesima rete adoperata dall'Università (vedi descrizione nelle LA1.8 e LA1.9), sono stati ottenuti i risultati riportati nei file Excel allegati al Report. Più nello specifico:

- il **file Rete_N1** contiene le tensioni in tutti i nodi della rete test nelle 24 ore per le condizioni di funzionamento ordinarie e alla N-1, prima e dopo l'intervento delle risorse di flessibilità.
- il **file Risultati_Analisi_N1** riassume i risultati per le valutazioni N-1 con anche la valutazione delle isole che eventualmente si possono formare (nodi coinvolti e possibilità di sostenere l'isola).
- il file **Flessibilità_N1_dettaglio** riporta nel dettaglio gli interventi di flessibilità messi in campo dal tool di Operational Planning per risolvere le contingenze (sovratensioni). Ad esempio, la colonna dPres_22_13 indica la potenza tagliata dal generatore presente nel nodo 22 alle ore 13:00. La sigla "Pes_5_13" invece indica lo scambio di potenza del BESS nel nodo 5 alle ore 13:00. È anche presente una scheda che riassume gli interventi massimi richiesti dal tool di Operational Planning ad ogni risorsa disponibile, tenendo conto di tutte le condizioni operative che potrebbero determinarsi, e che contribuiscono alla definizione complessiva del costo per la flessibilità.

11.3 Caratterizzazione sperimentale di componentistica integrata nelle reti elettriche

Per l'attività di caratterizzazione sperimentale di componentistica integrata nelle reti elettriche, sono state eseguite prove sperimentali su campioni di cavi in bassa tensione di sezione 4, 6 e 10mmq rispettivamente e di lunghezza pari a 10 m cadauno.

Tali campioni sono stati sottoposti a profili di temperatura e umidità di esercizio generati in camera climatica, al fine di emulare gli effetti degli stress termici sulle prestazioni elettriche dei campioni stessi.

Dalle letture delle grandezze elettriche quali tensione e corrente di funzionamento sono state ricavate le impedenze elettriche dei campioni al variare delle condizioni di temperatura ed umidità di esercizio.

Le prove sono state eseguite in corrente continua, in quanto stante le piccole lunghezze si ritengono non influenti le possibili variazioni di impedenza che si avrebbero in corrente alternata, intese in termini di reattanza induttiva e/o capacitiva.

Nel seguito si descrivono le prove sperimentali eseguite ed i risultati ottenuti. Inoltre, i dataset sperimentali ottenuti vengono infine paragonati con i valori calcolabili teoricamente applicando le leggi elettrotecniche di base al variare dei parametri termici.

11.3.1 Prova con temperatura crescente ed umidità non controllata

La prova sperimentale è stata eseguita imponendo una rampa crescente di temperatura interna alla camera climatica da -20°C a +75°C, con umidità non controllata. I campioni sono

stati sollecitati con una corrente costante di 20A. La seguente figura mostra gli andamenti della temperatura di camera Tamb e delle temperature dei singoli campioni di cavo di sezione 4mmq, 6mmq e 10mmq (T4, T6 e T10 rispettivamente)

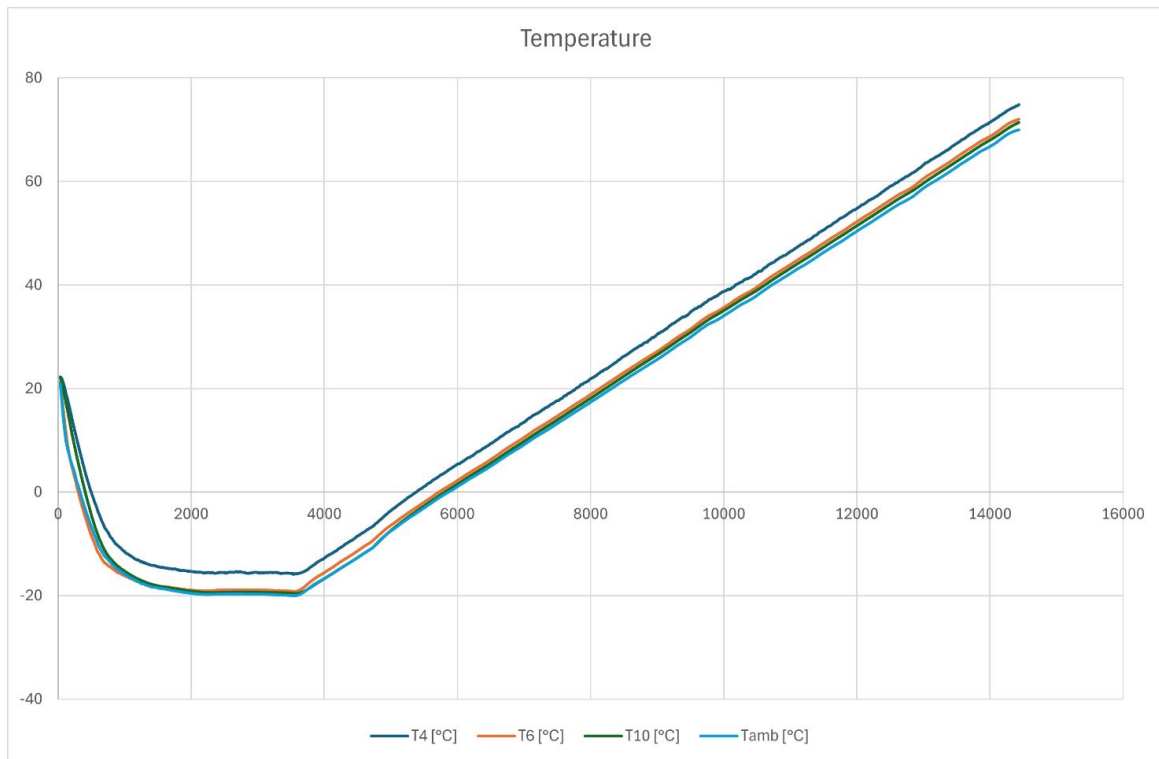


Figura 23: Temperature

Sono state prelevate le seguenti cadute di tensione ai campi dei singoli campioni:

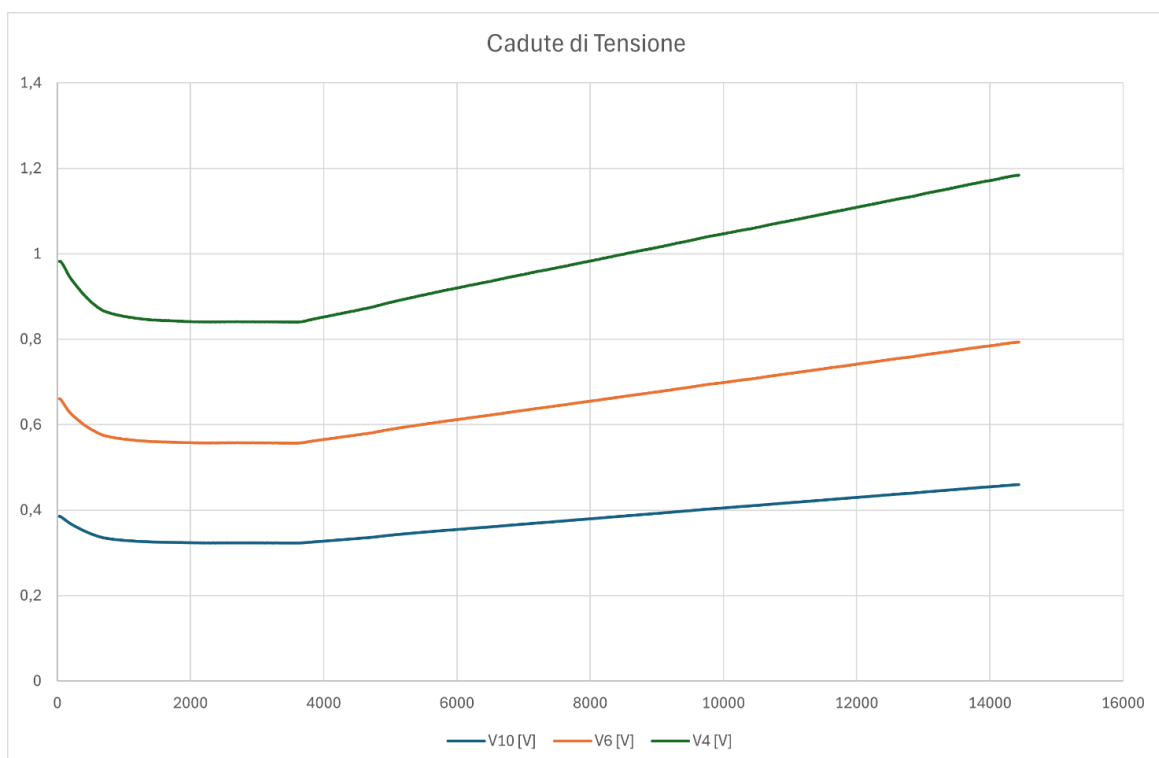


Figura 24: Cadute di tensione (a)

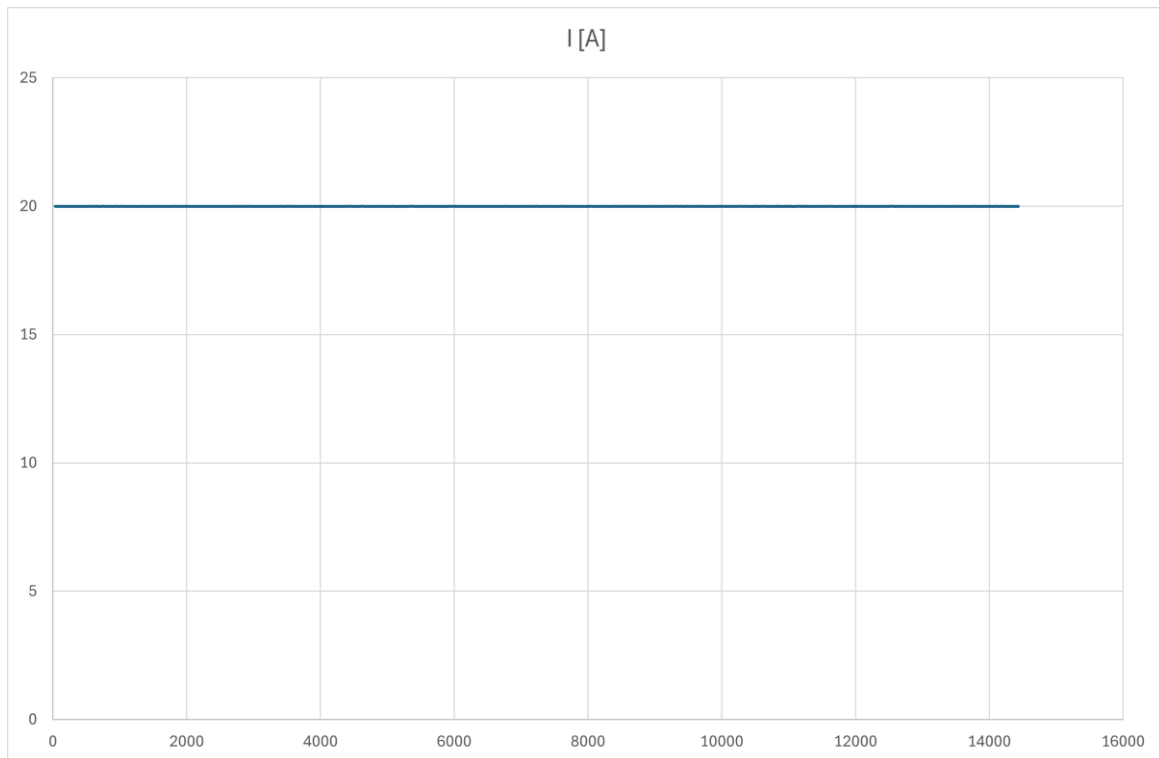


Figura 25: corrente (b)

Nella successiva figura vengono mostrate le resistenze elettriche dei campioni:

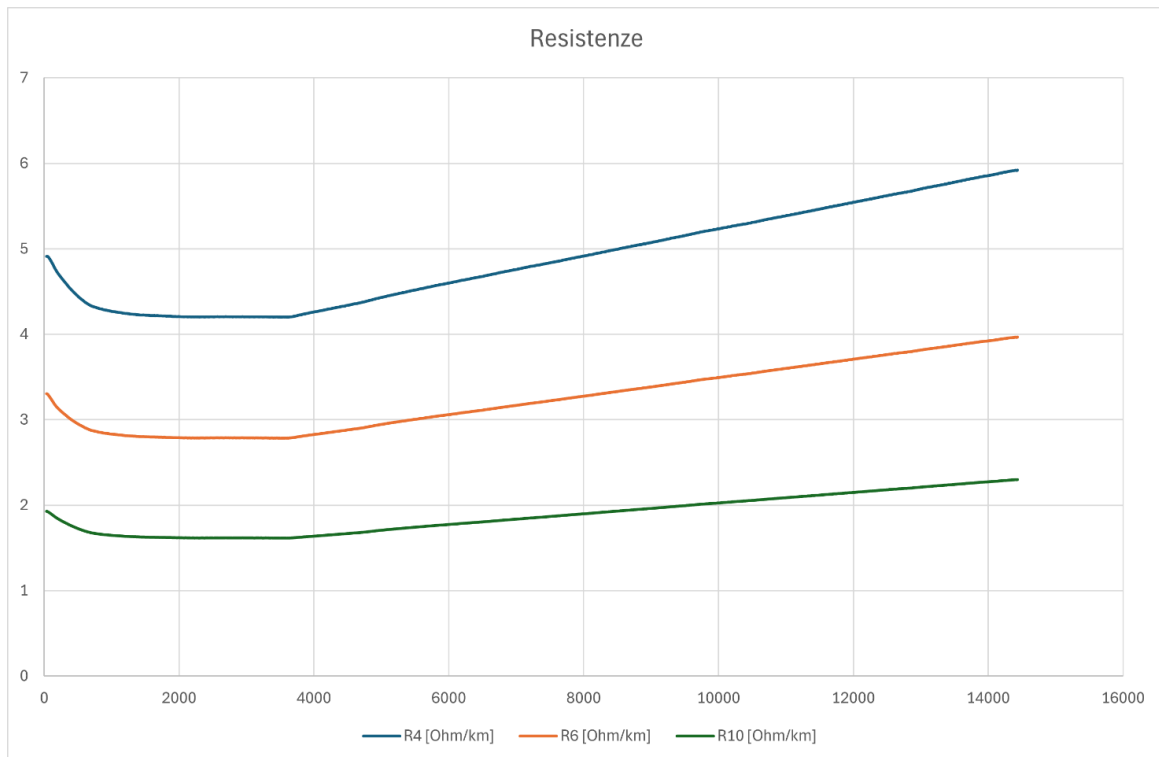


Figura 26: Resistenze

Come si può notare in accordo con le leggi elettrotecniche le resistenze dei singoli campioni sono crescenti all'aumentare della temperatura come mostrano le successive figure:

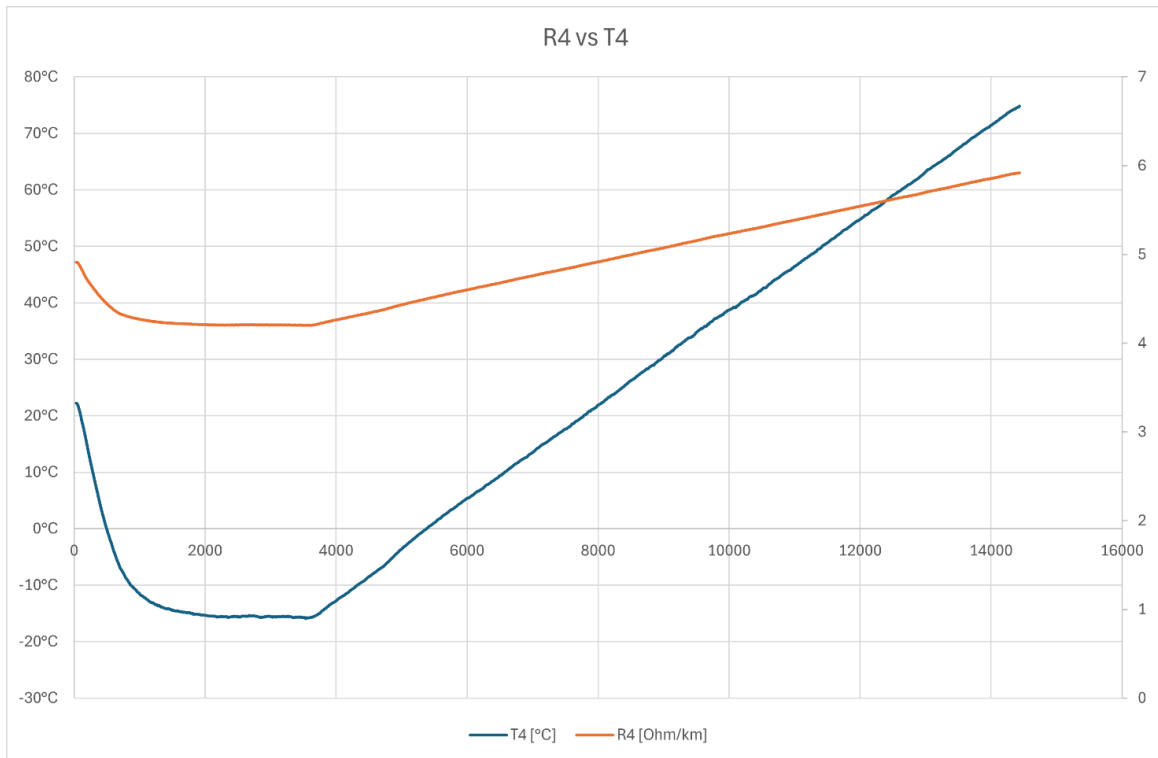


Figura 27: R4 (a)

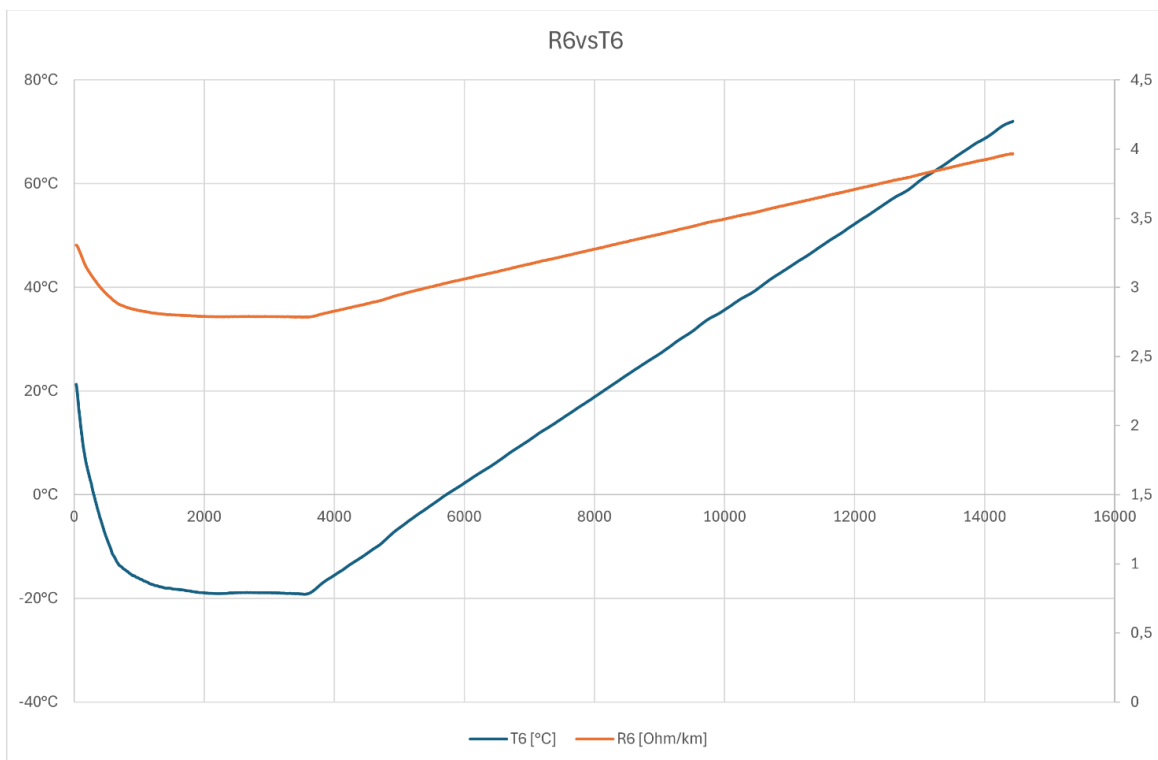


Figura 28: R6 (b)



Figura 29: R10 (c)

Il **dataset** ottenuto è riportato nel file allegato: 1_2024-11-4_12-51-27_test_rampa_temp_-20+70.txt

11.3.2 Prova con temperatura decrescente ed umidità non controllata

Al fine di ottenere una maggiore validità dei dati sperimentali, è stata eseguita una prova sperimentale sottoponendo i campioni in oggetto anche da una rampa di temperatura decrescente da 60°C a -10°C, con umidità non controllata. I campioni sono stati sollecitati con uno step di corrente costante pari a 20°, a partire dalla temperatura massima di 60°C, in seguito al raggiungimento del regime termico tra le temperature delle guaine e la temperatura interna della camera.

La seguente figura mostra gli andamenti della temperatura di camera T_{amb} e delle temperature dei singoli campioni di cavo di sezione 4mmq, 6mmq e 10mmq (T4, T6 e T10 rispettivamente):

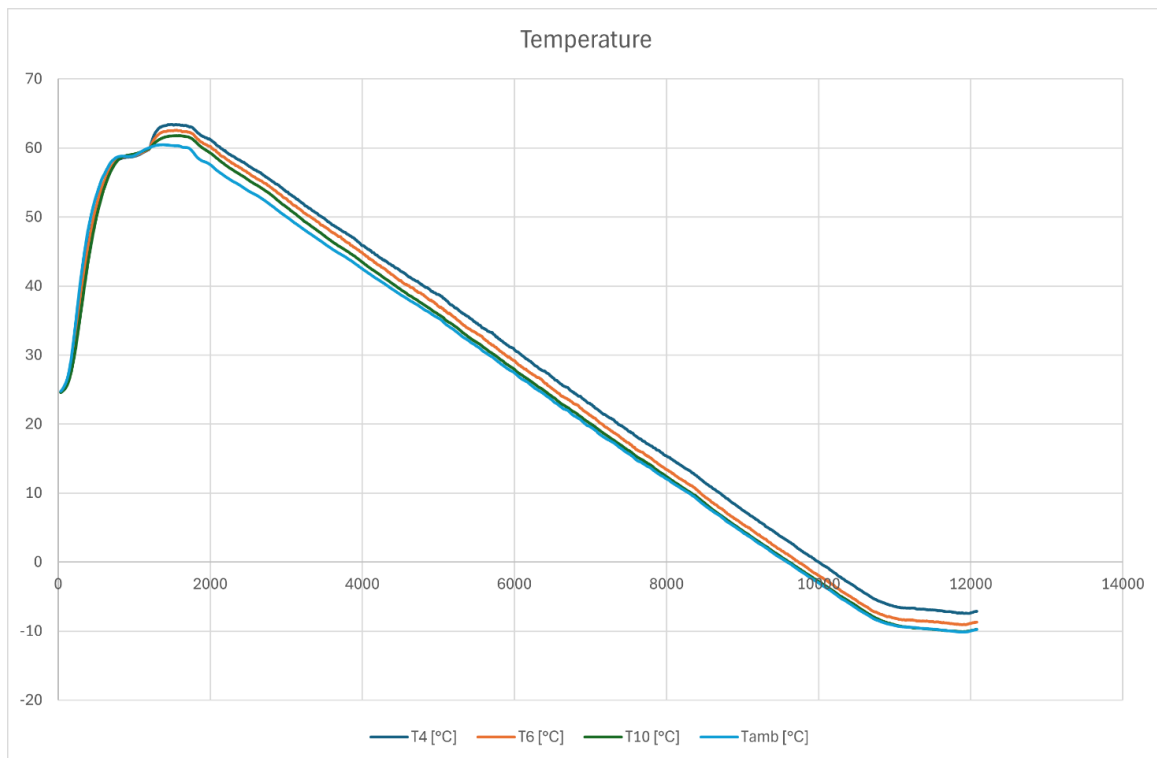


Figura 30: Temperature

La corrente e le relative cadute di tensione misurate ai campi dei singoli campioni hanno il seguente andamento:

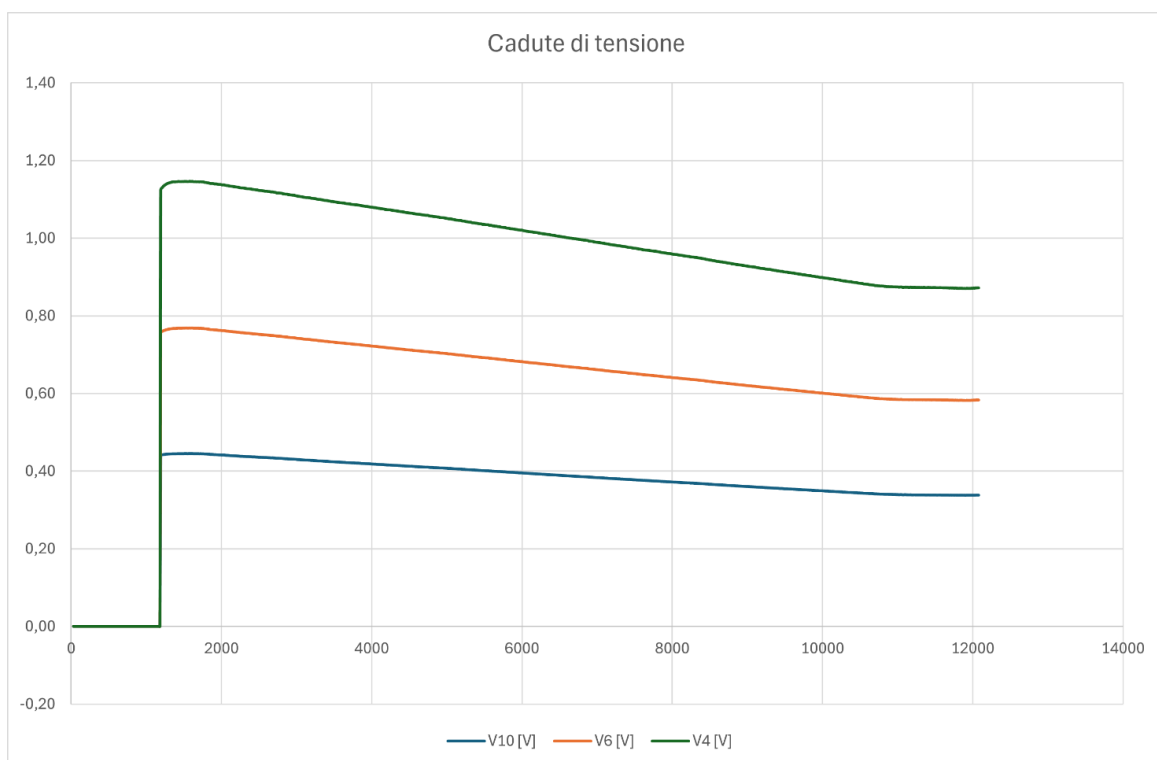


Figura 31: Cadute di tensione

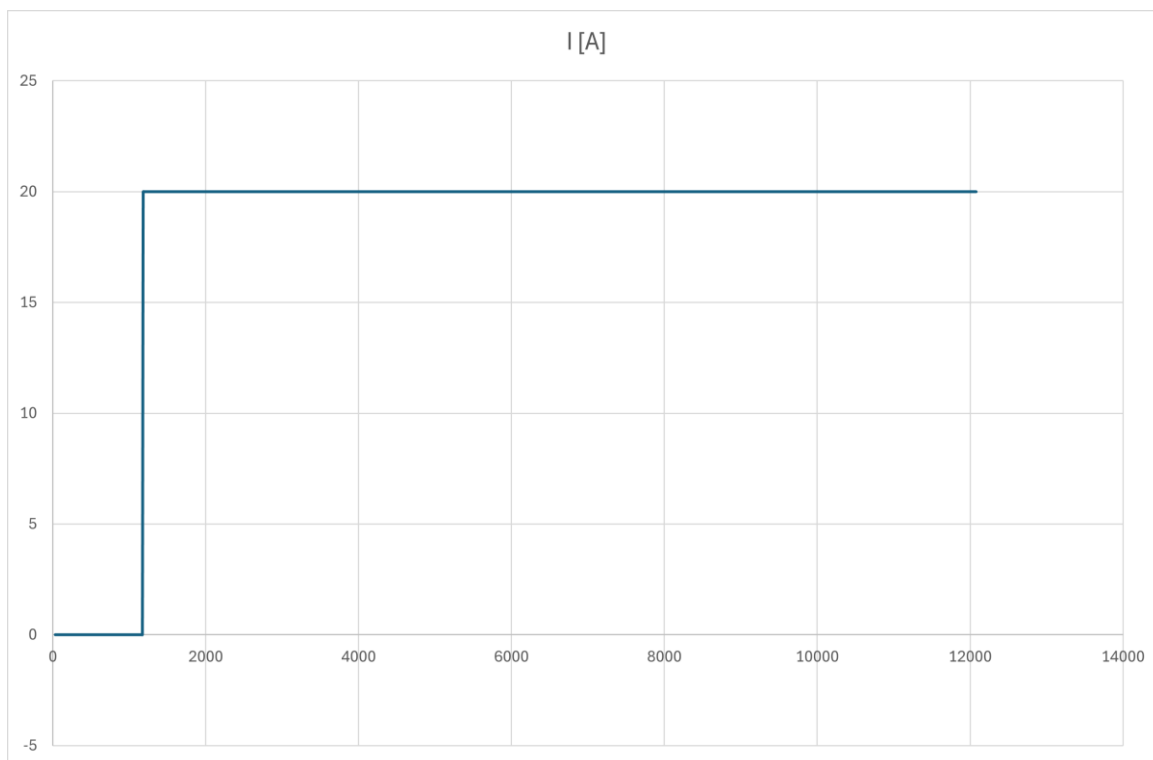


Figura 32: Corrente

Pertanto, le resistenze elettriche chilometriche calcolate avranno i seguenti andamenti:

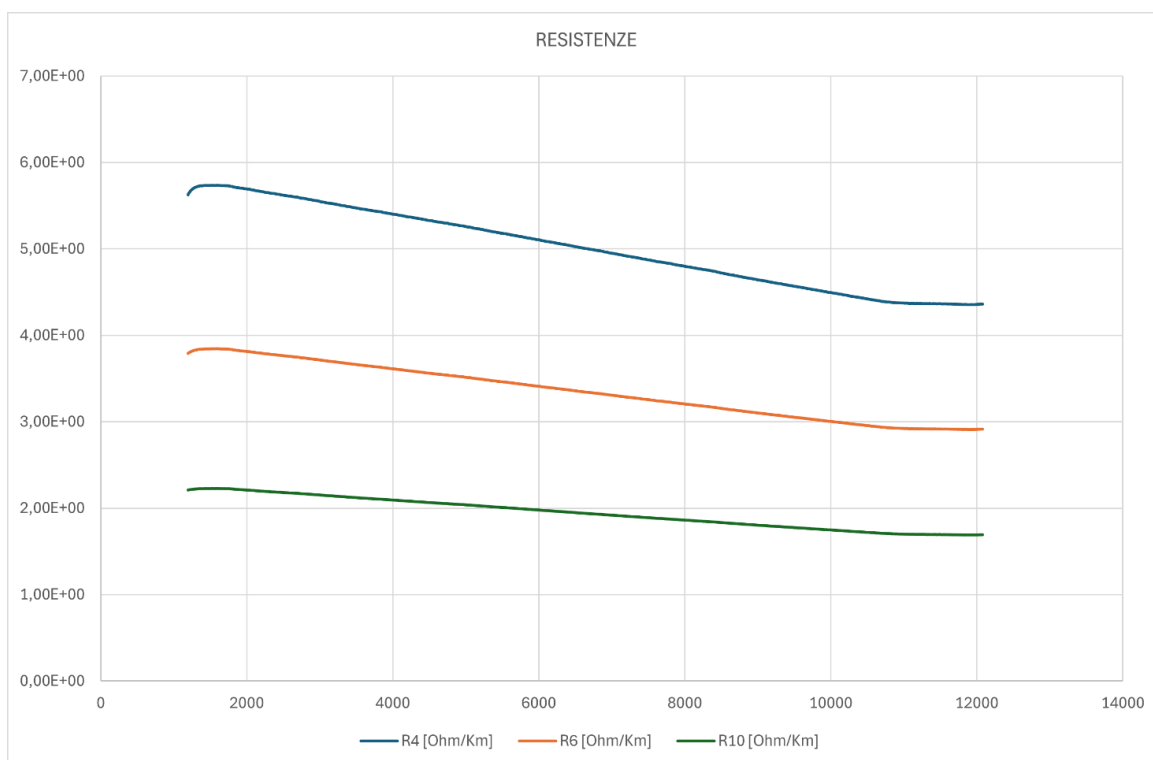


Figura 33: Resistenze

La congruenza delle misure rilevate risiede nel fatto che le resistenze dei singoli campioni sono decrescenti al diminuire delle rispettive temperature dei singoli cavi, come mostrano le seguenti figure:

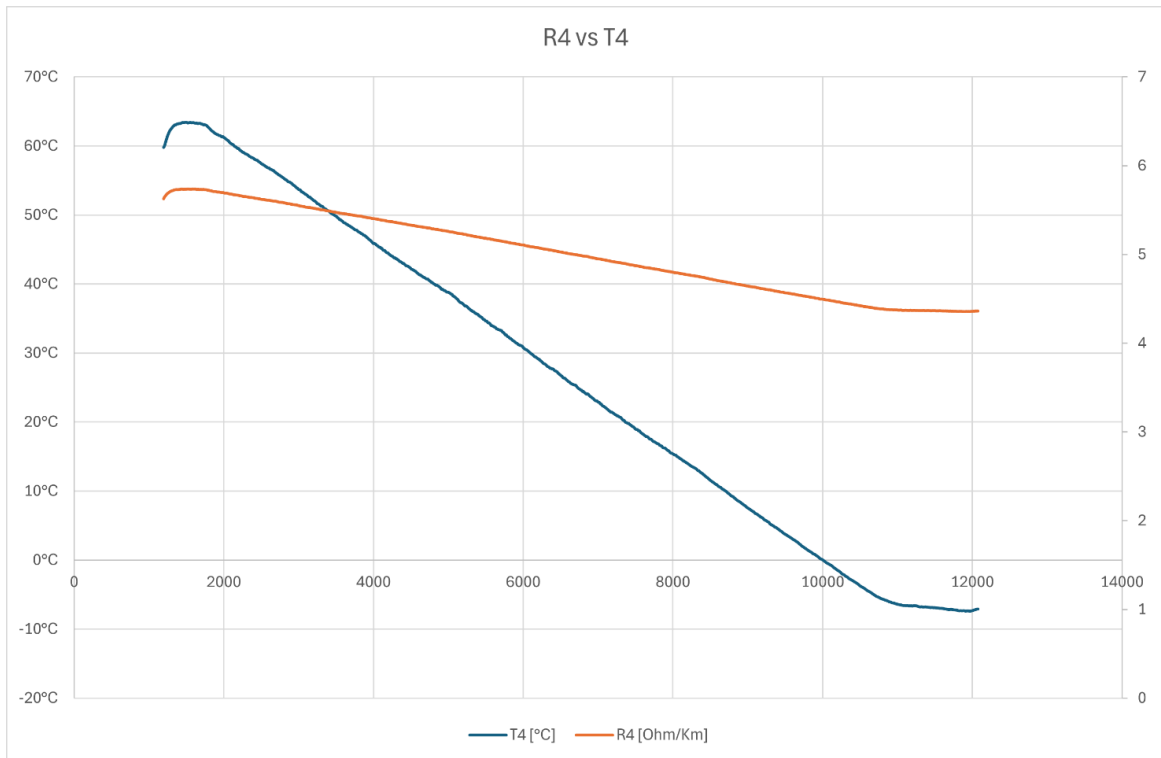


Figura 34: R4

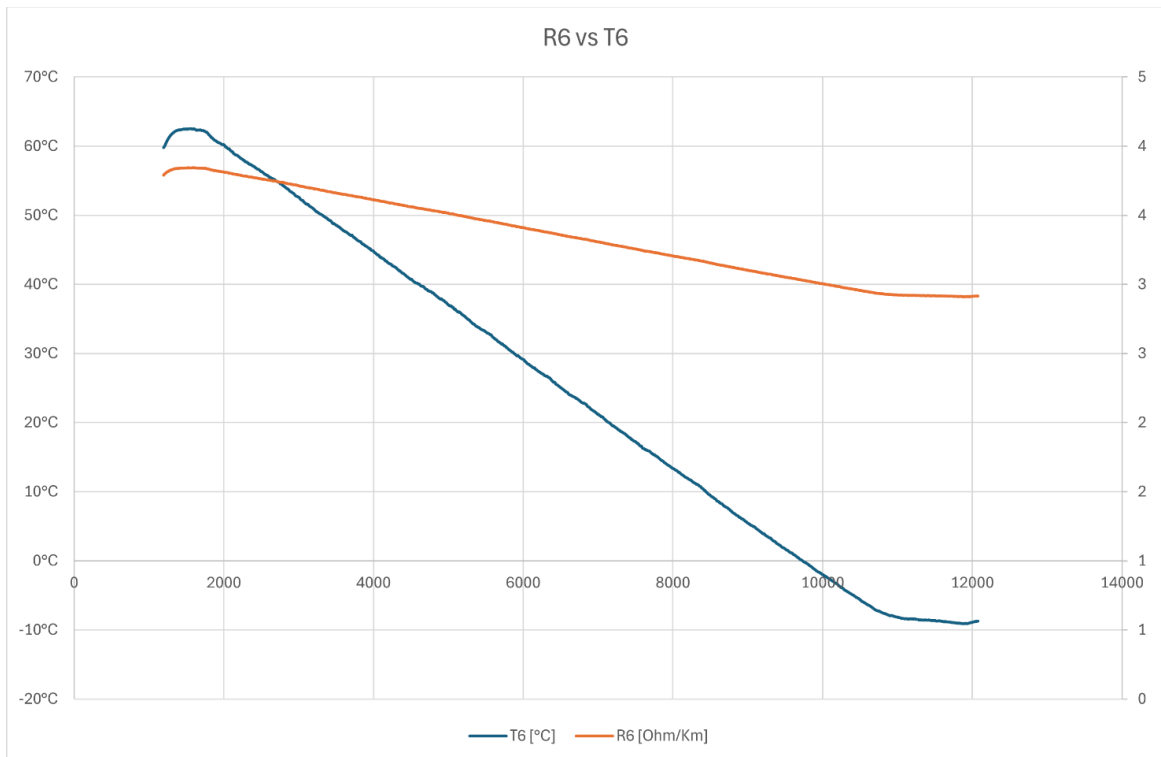


Figura 35: R6

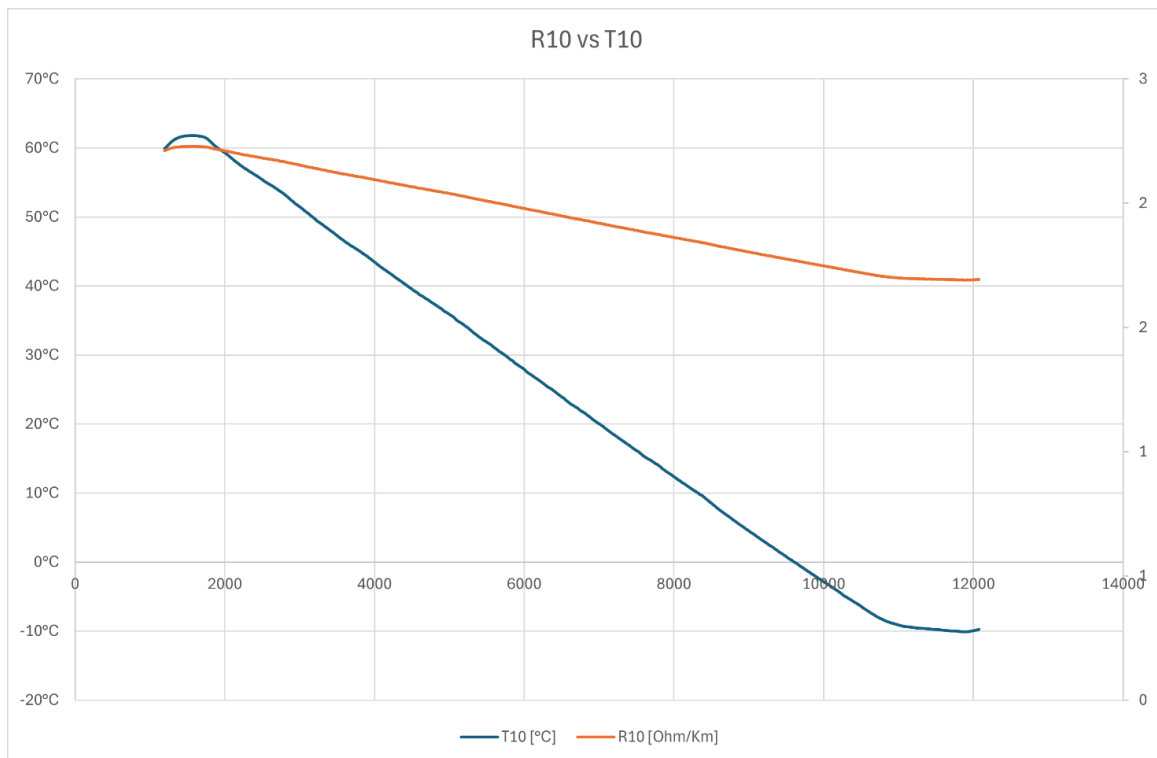


Figura 36: R10

Il **dataset** ottenuto è riportato nel file allegato: 2_2024-9-25_12-4-26_test ramp 60_-10_20A.txt

11.3.3 Prova con umidità crescente e temperatura costante

Durante la prova sperimentale la temperatura di camera è stata mantenuta costante a 20°C mentre è stata imposta una rampa crescente di umidità interna alla camera climatica dal 10% al 95%, come mostrano i seguenti andamenti:

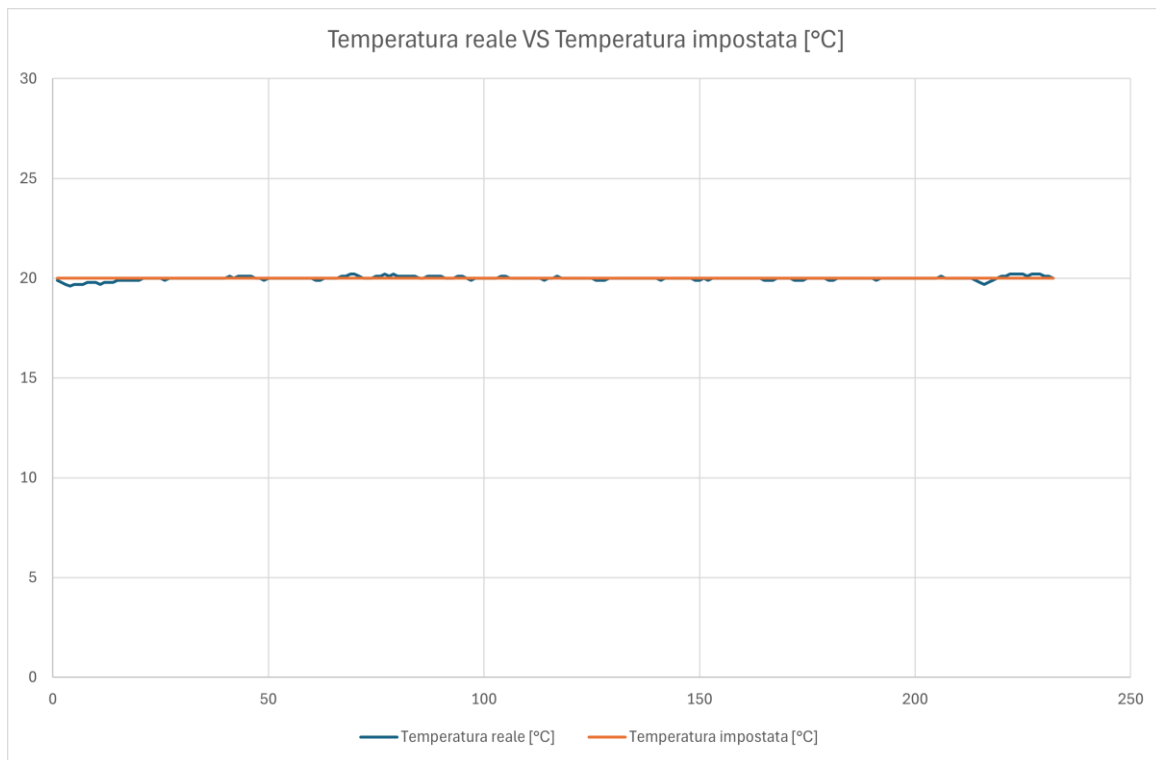


Figura 37: Temperatura di camera

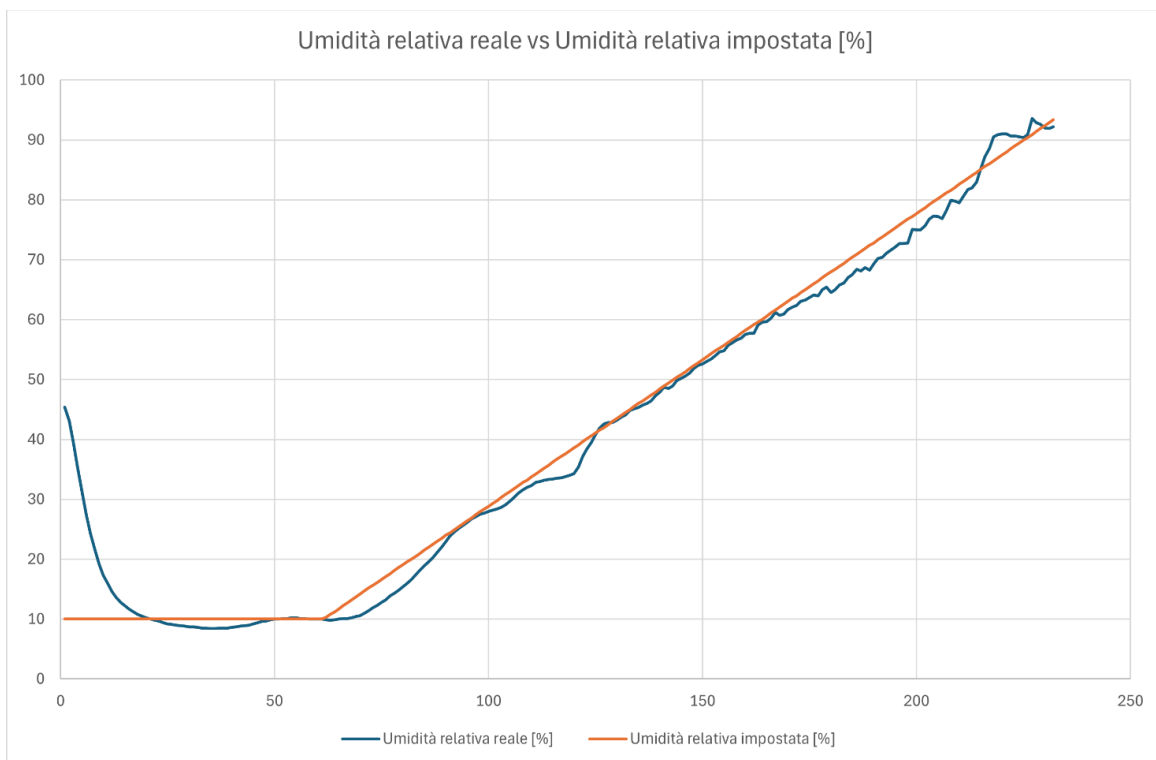


Figura 38: umidità relativa di camera

La corrente di esercizio è stata mantenuta costante al valore di 20A.

La seguente figura mostra gli andamenti delle temperature dei singoli campioni di cavo di sezione 4mmq, 6mmq e 10mmq (T4, T6 e T10 rispettivamente) rispetto alla temperatura di camera T_{amb} :

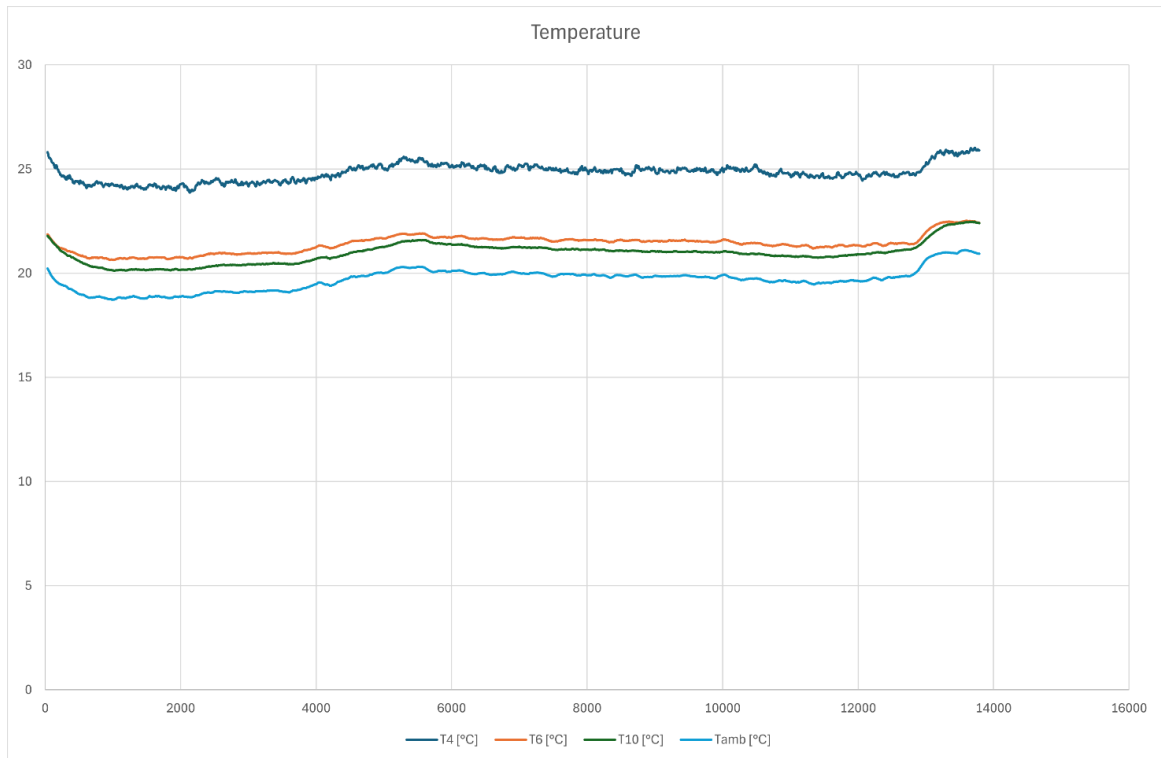


Figura 39: Temperature

Sono state prelevate le seguenti cadute di tensione ai campi dei singoli campioni:

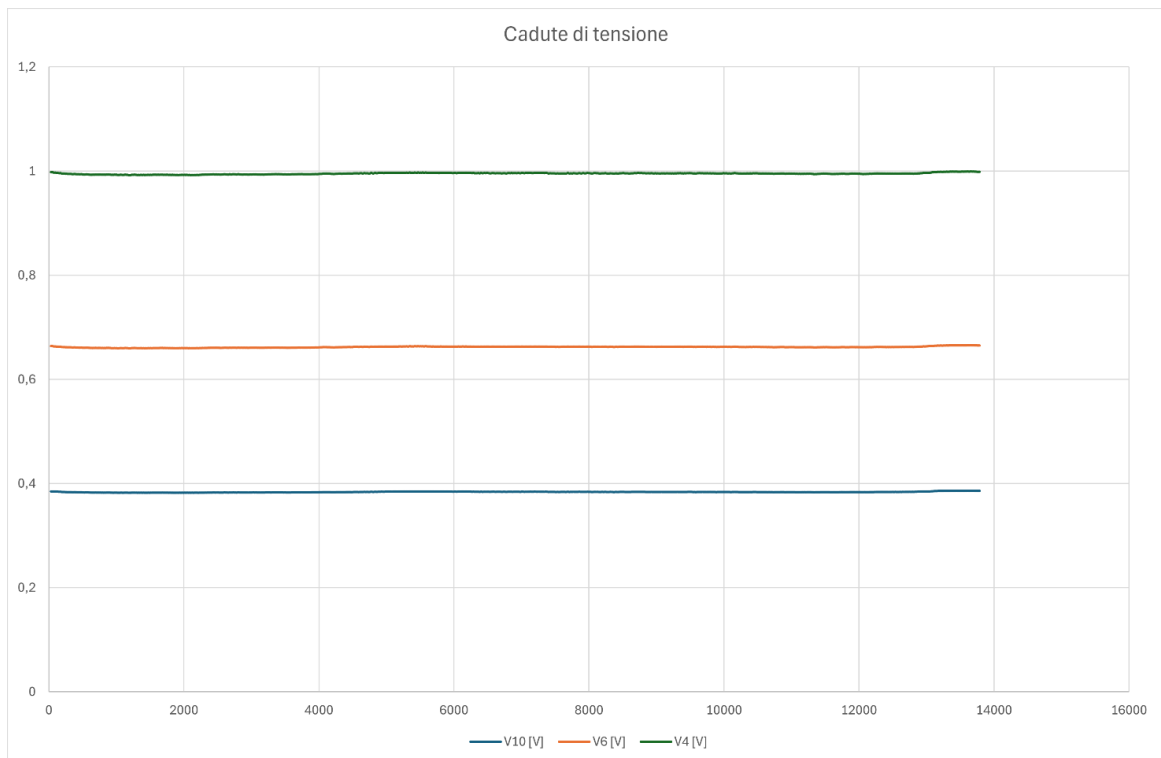


Figura 40: Cadute di tensione

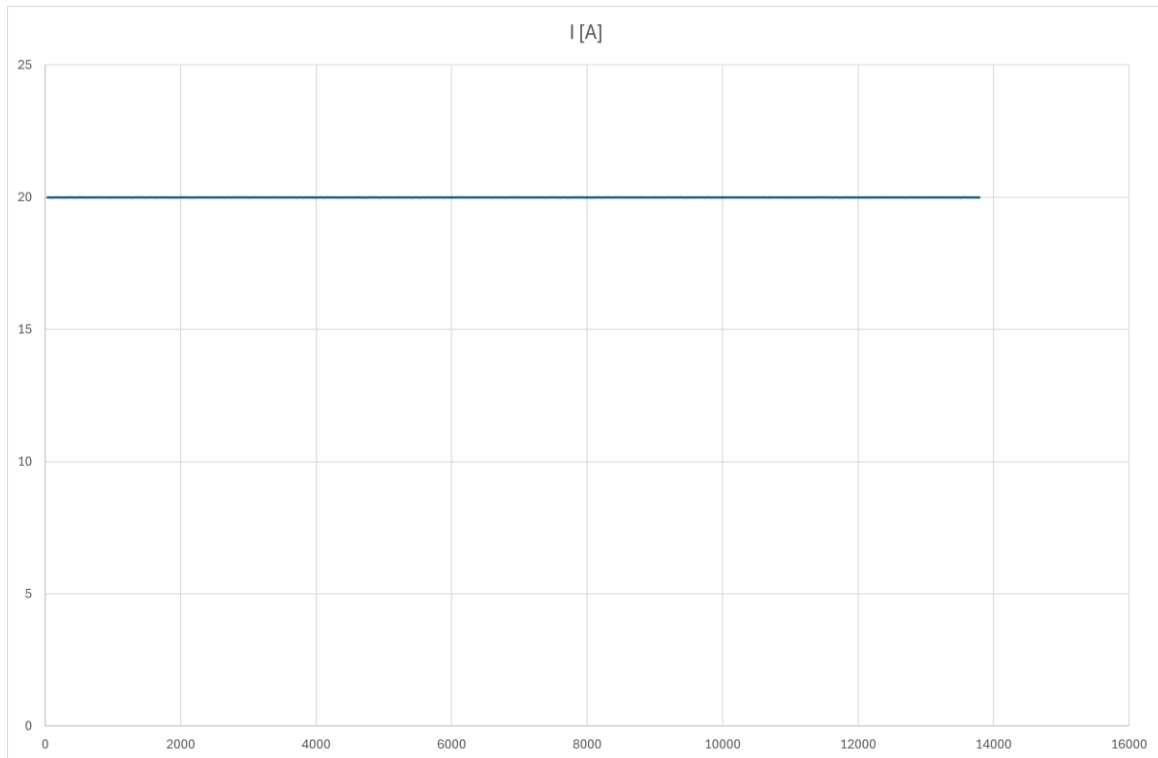


Figura 41: Corrente

Le resistenze elettriche dei singoli campioni hanno i seguenti andamenti:

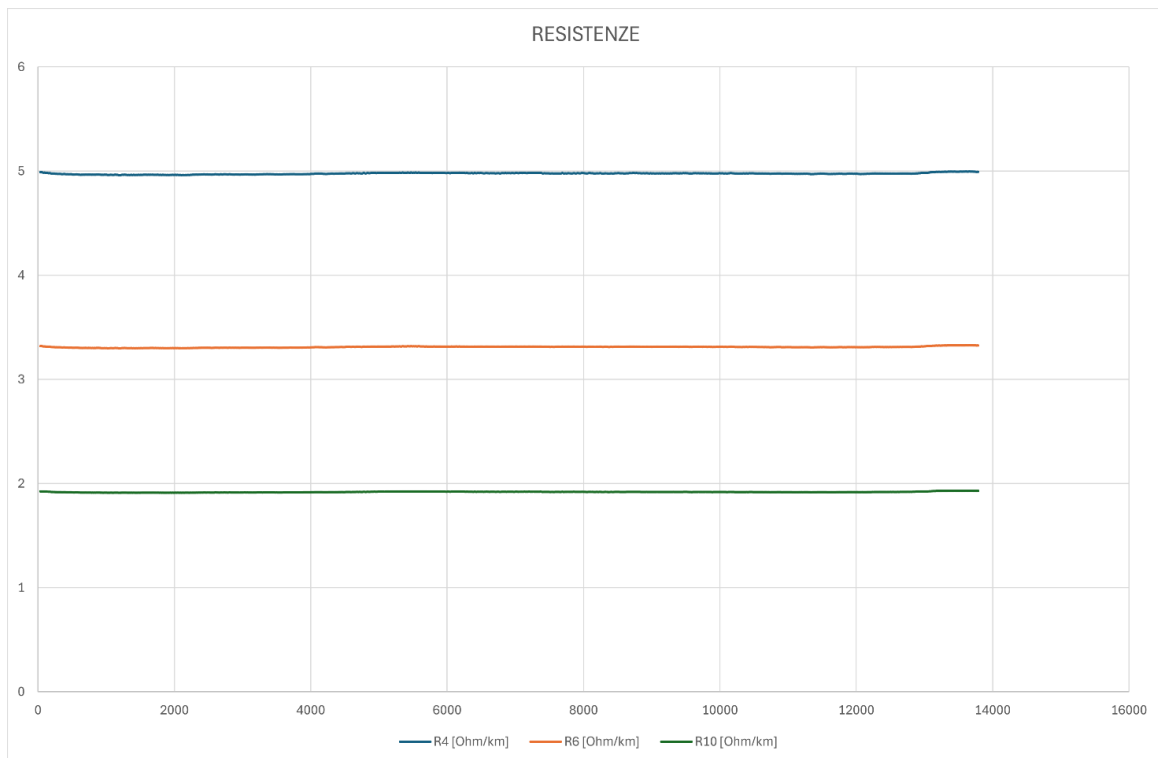


Figura 42: Resistenze

Si evince che le resistenze elettriche restano pressoché costanti al variare dell'umidità, facendo registrare degli scostamenti dell'ordine del millesimo di Ohm/km, come mostrano le seguenti figure:

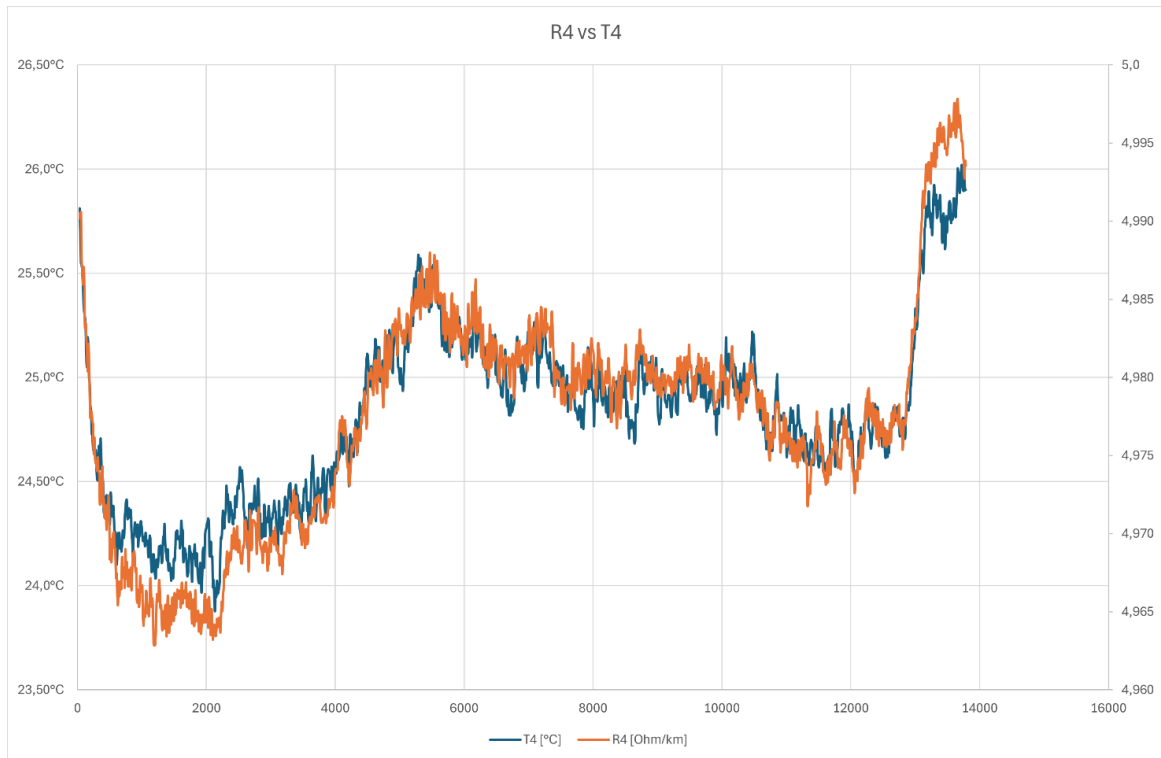


Figura 43: R4

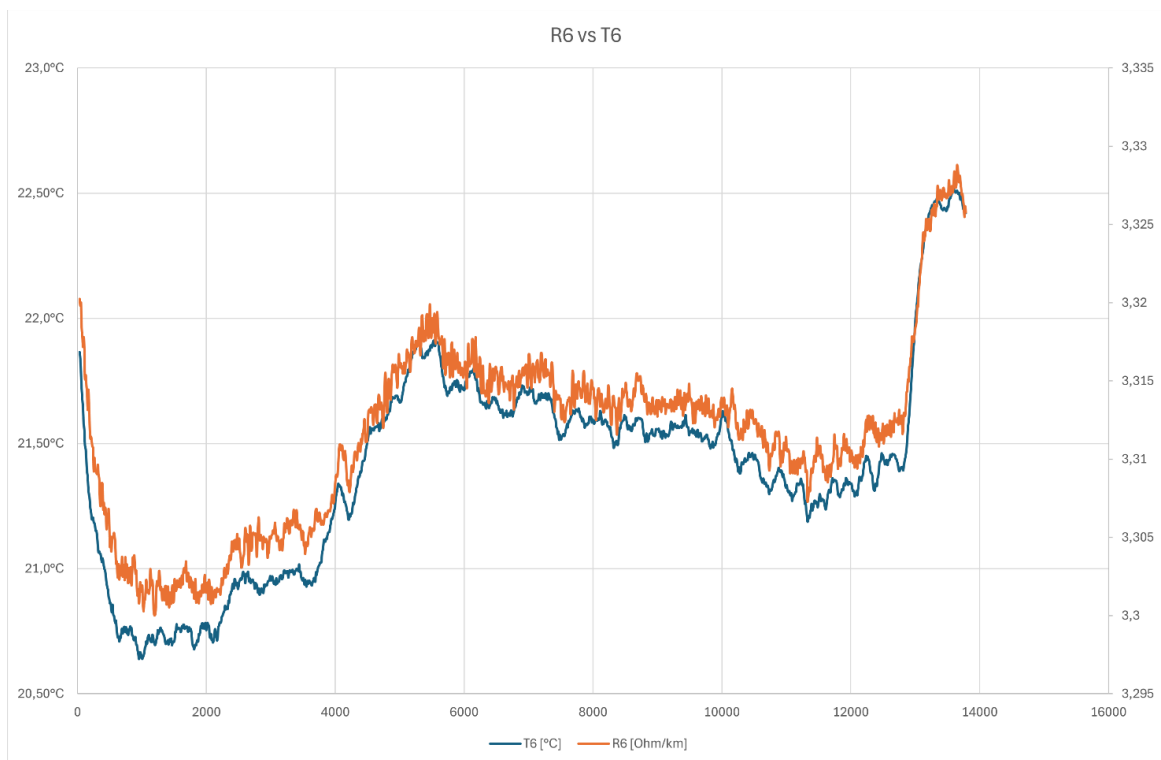


Figura 44: R6

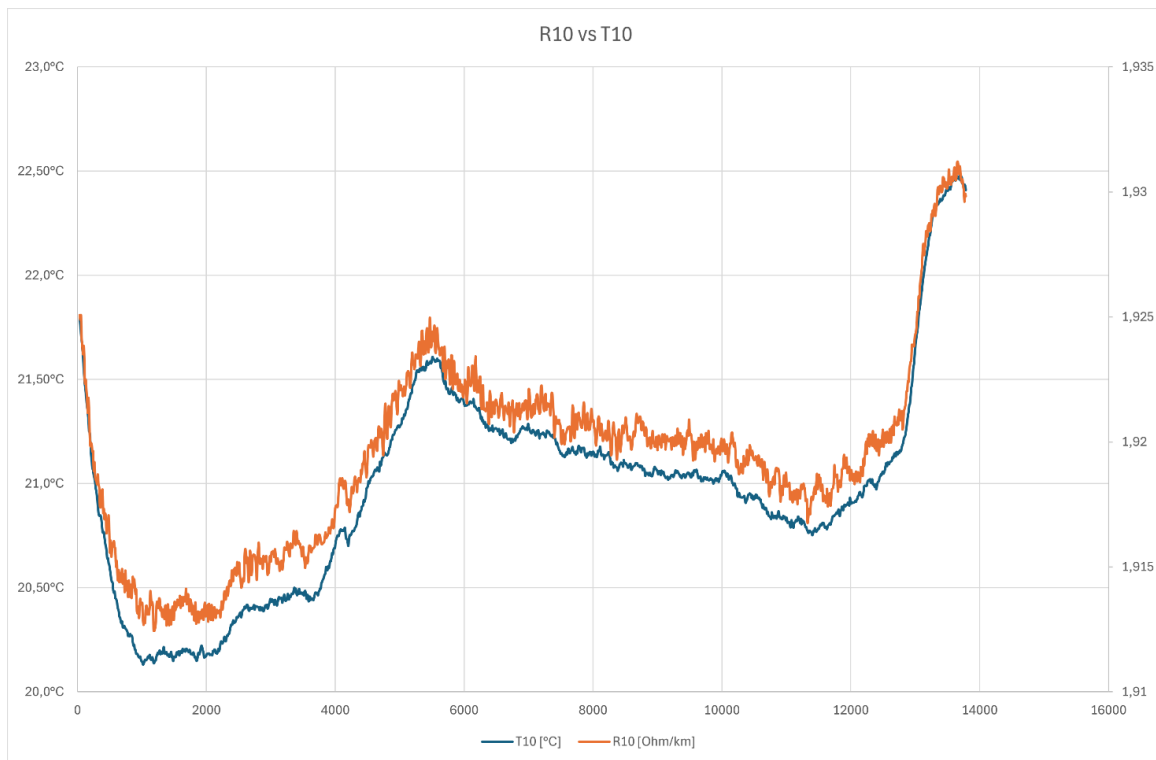


Figura 45: R10

In pratica, analizzando le precedenti figure si nota che gli andamenti delle resistenze seguono fedelmente gli scostamenti millesimali della temperatura di camera, dovuti all'inerzia termica della stessa.

Il **dataset** ottenuto è riportato nel file allegato: 3_2024-11-8_12-36-17_test.txt

11.3.4 Prova con umidità e temperatura di camera costante

Durante la prova sperimentale la temperatura di camera e l'umidità interna sono state fissate a 40°C e 5%, rispettivamente. Successivamente al raggiungimento del regime termico i campioni di cavi sono stati sollecitati con valori di corrente crescente per aumentare la temperatura di esercizio delle rispettive guaine, in modo da simulare un surriscaldamento dovuto ad un sovraccarico, come mostra la seguente figura:

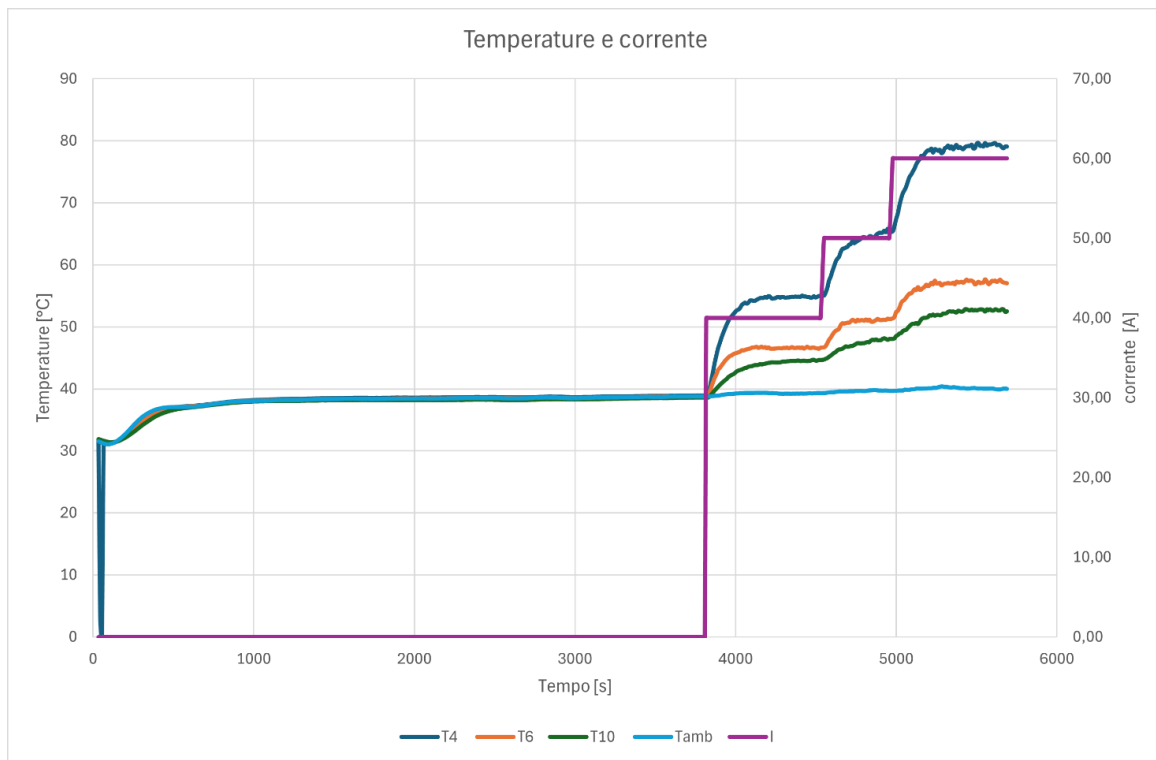


Figura 46: Temperature e corrente

In seguito, all'iniezione di corrente sono state rilevate le seguenti cadute di tensione ai capi dei singoli campioni:

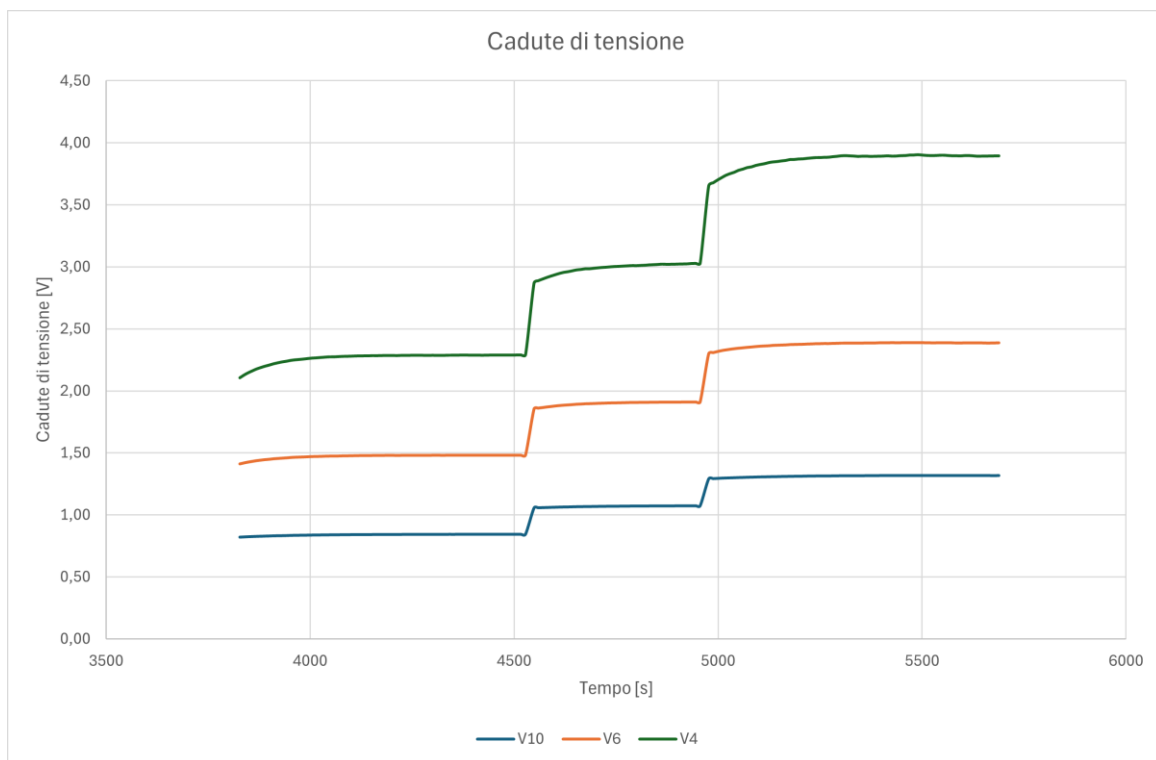


Figura 47: Cadute di tensione

dai quali si sono ricavati i seguenti valori di resistenza:

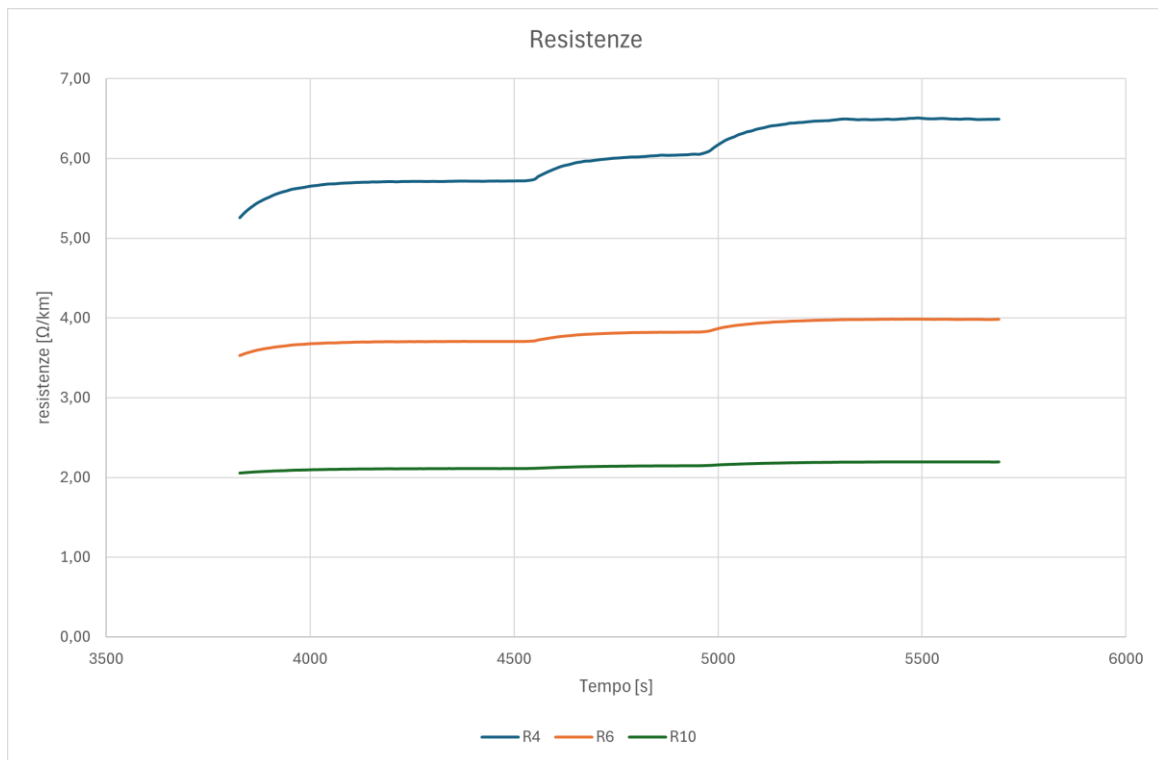


Figura 48: Resistenze

Gli andamenti delle singole resistenze in funzione delle temperature evidenziano un aumento anche superiore al 30% del valore nominale di specifica:

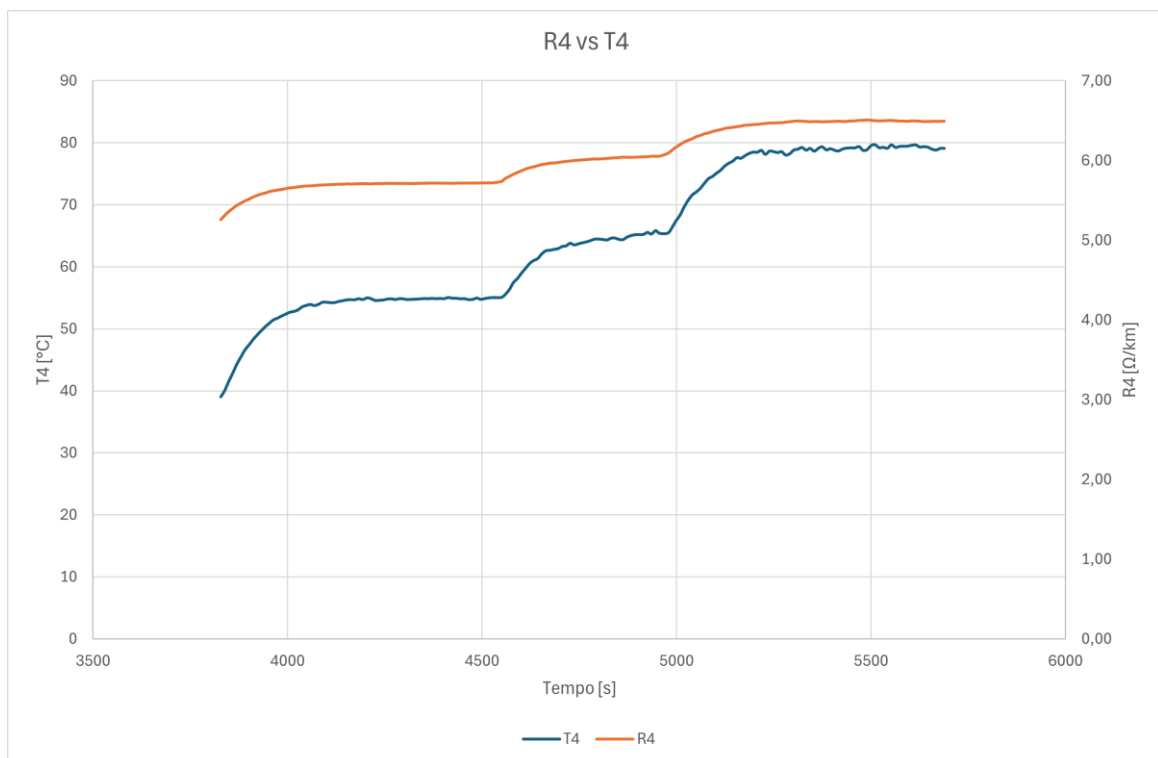


Figura 49: R4

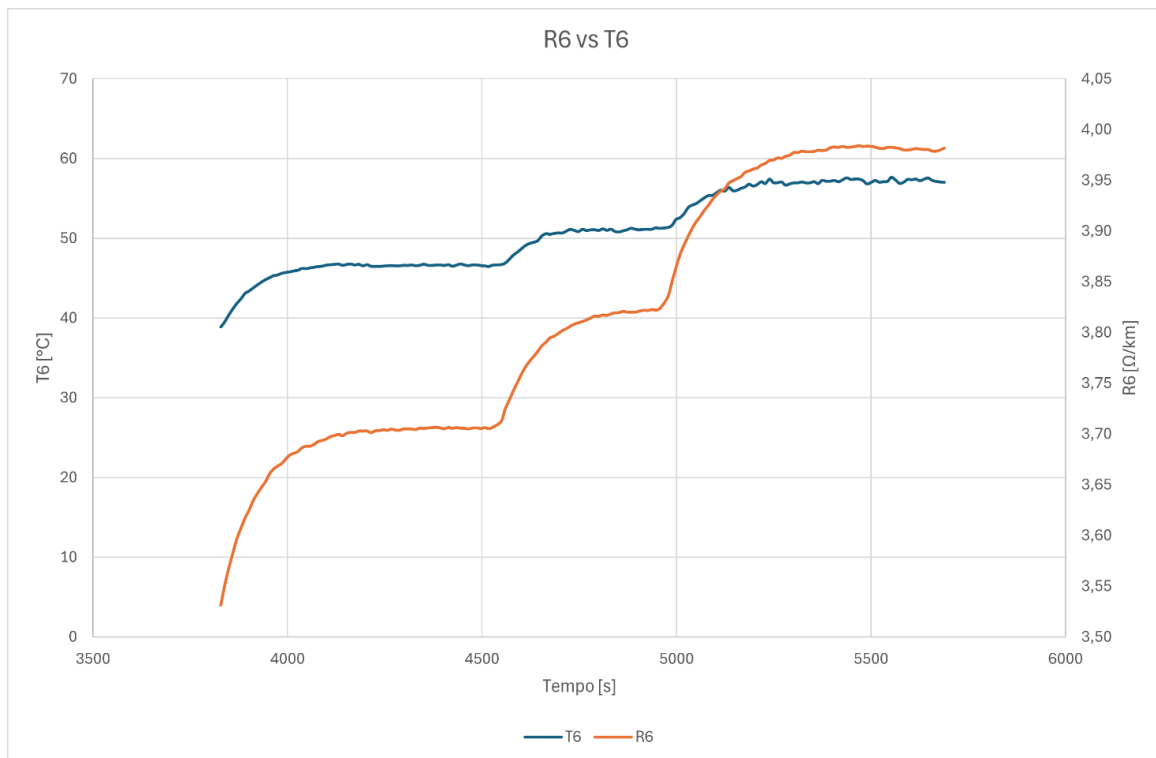


Figura 50: R6

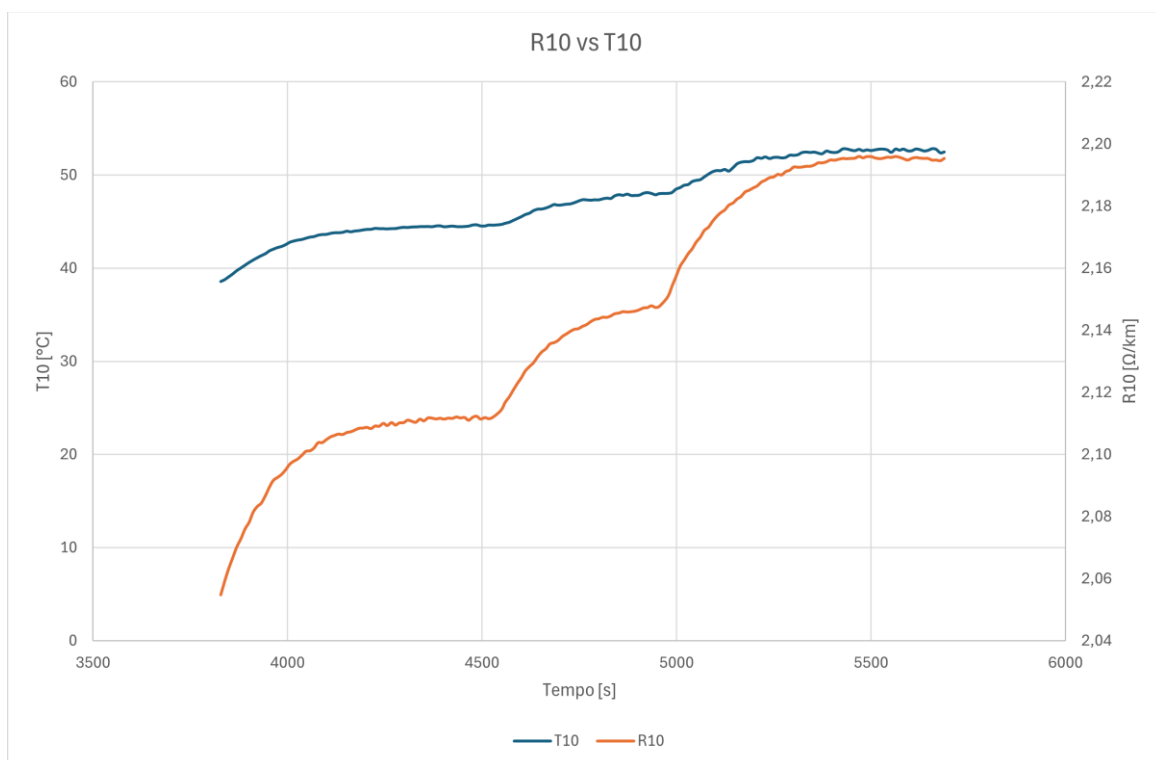


Figura 51: R10

Come atteso, il cavo maggiormente sollecitato dal sovraccarico è stato il cavo di sezione minore (4mmq).

Il **dataset** ottenuto è riportato nel file allegato: 4_2024-10-16_14-14-58_test 5% umidità.txt

11.3.5 Osservazioni sui risultati ottenuti dai test sperimentali su componentistica elettrica integrata di rete

I risultati dei test sperimentali descritti nei paragrafi precedenti possono essere confrontati con i valori numerici ottenibili dalla formula elettrotecnica per il calcolo della resistenza al variare della temperatura di esercizio:

$$R_T = R_0[1 + \alpha(T - T_0)]$$

dove:

T_0 è la temperatura di riferimento (20°C);

R_0 è la resistenza alla temperatura T_0 (evincibile dal datasheet del cavo);

T è la temperatura di esercizio;

α è il coefficiente di temperatura del conduttore a 20°C (per il rame è $4,3 \cdot 10^{-3} [^{\circ}\text{C}^{-1}]$)

In particolare, nel seguito vengono riportate delle osservazioni per ogni test sperimentale.

11.3.5.1 Prova con temperatura crescente ed umidità non controllata

La prova sperimentale è stata eseguita imponendo una rampa crescente di temperatura interna alla camera climatica da -20°C a +75°C, con umidità non controllata. I risultati sono stati riportati nel paragrafo 11.1.1.

Le seguenti figure mostrano gli andamenti delle resistenze misurate rispetto ai valori teorici attesi per i singoli cavi analizzati di sezione pari a 4, 6 e 10mmq rispettivamente:

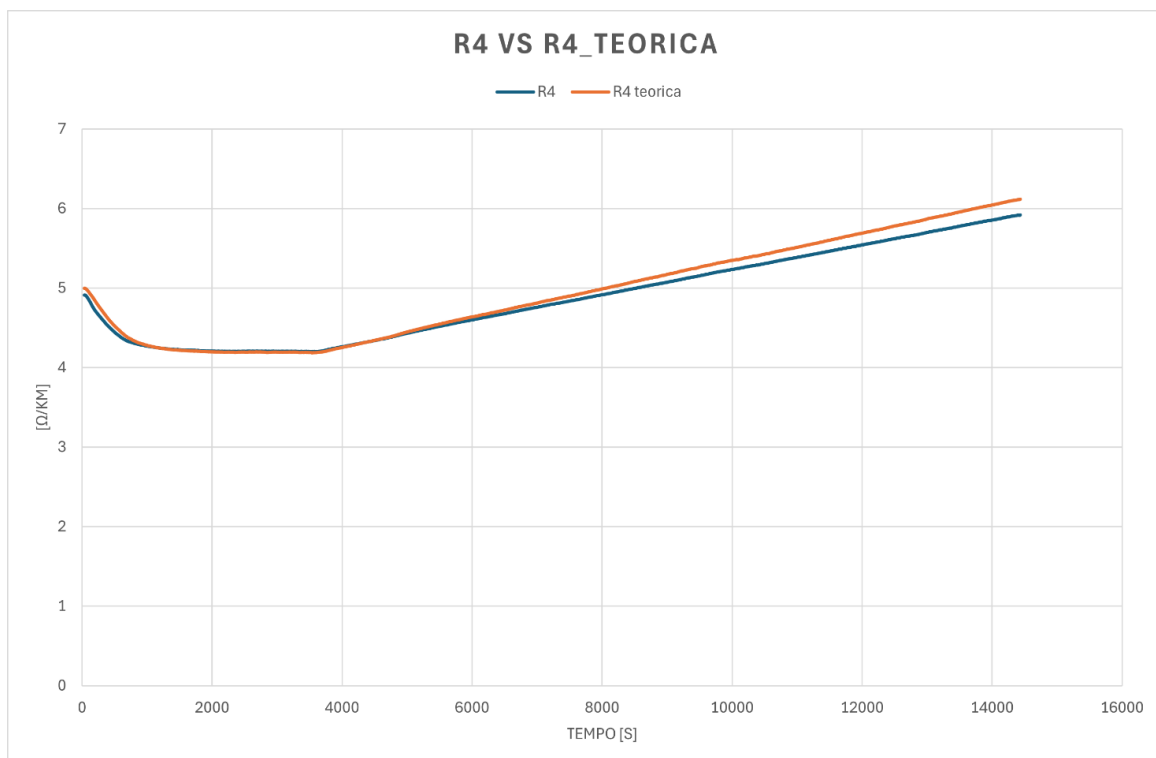


Figura 52: R4vsR4 teorica

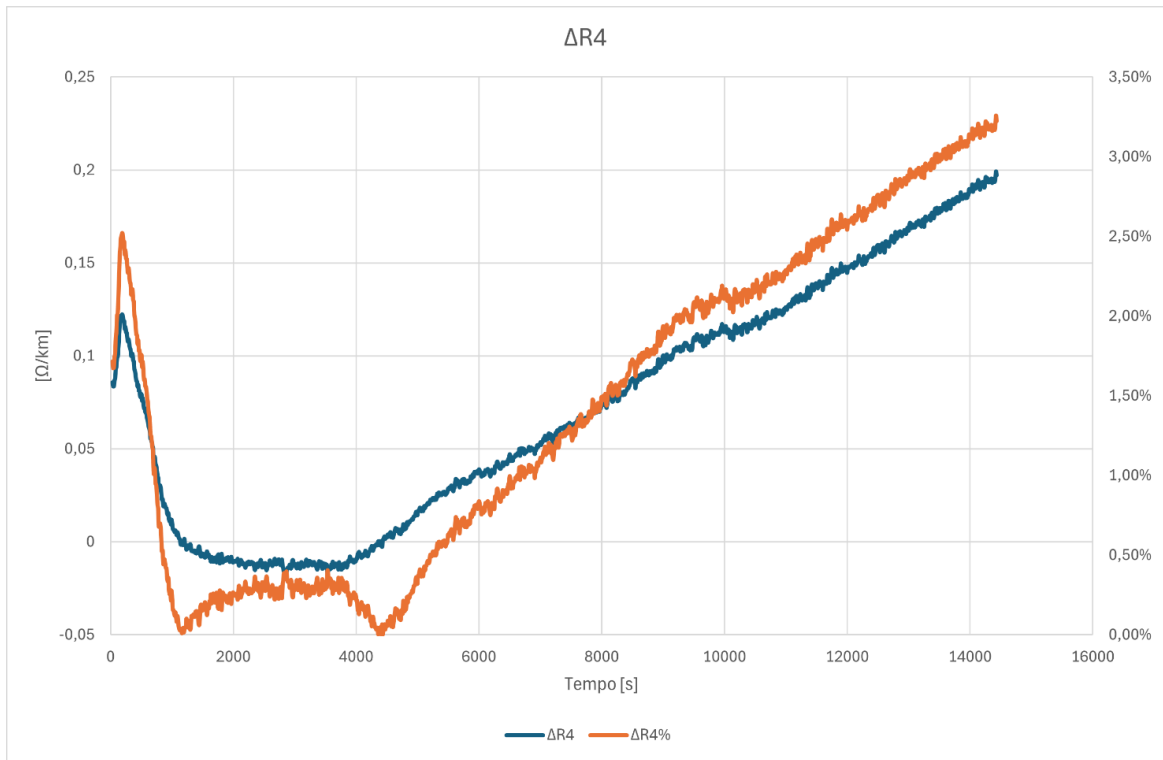


Figura 53: DeltaR4

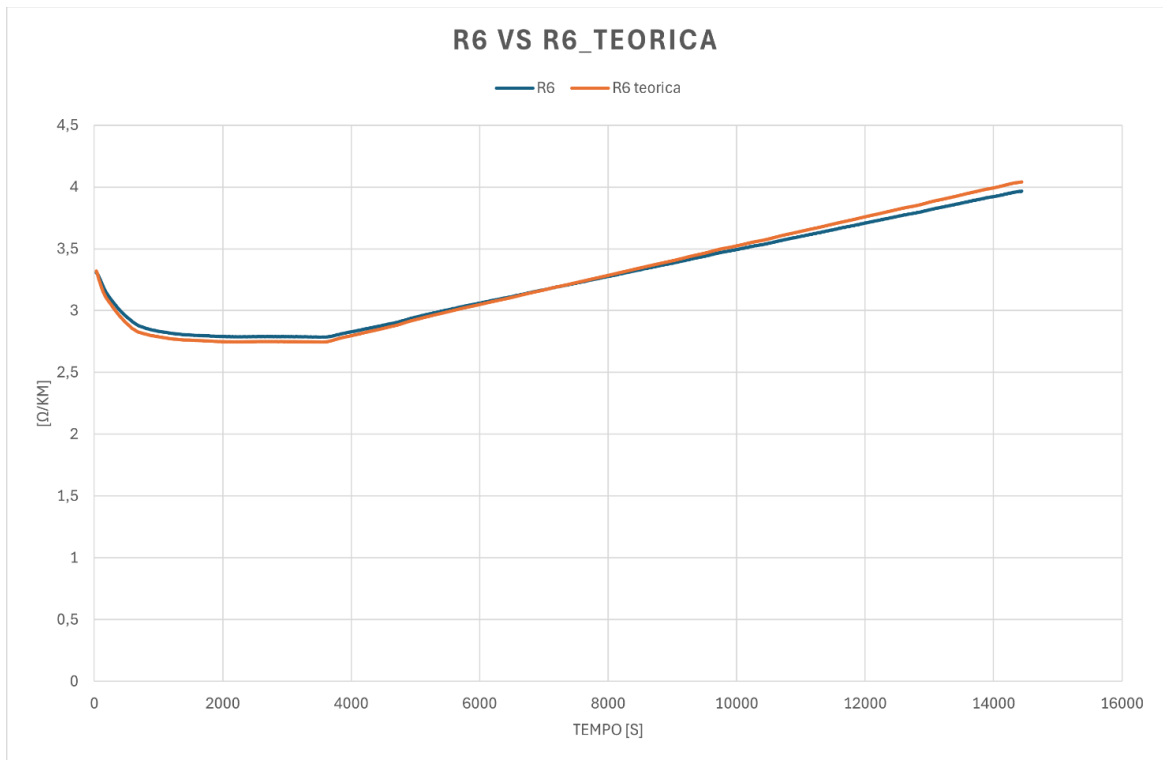


Figura 54: R6vsR6 teorica

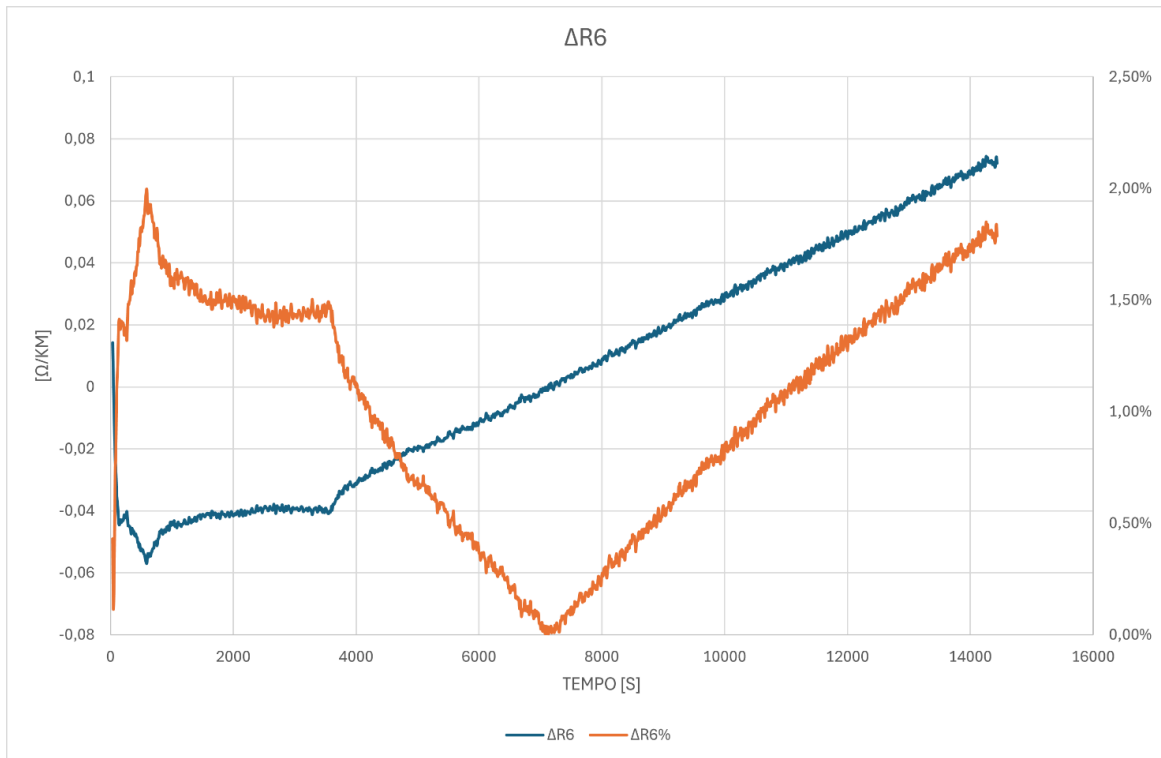


Figura 55: DeltaR6

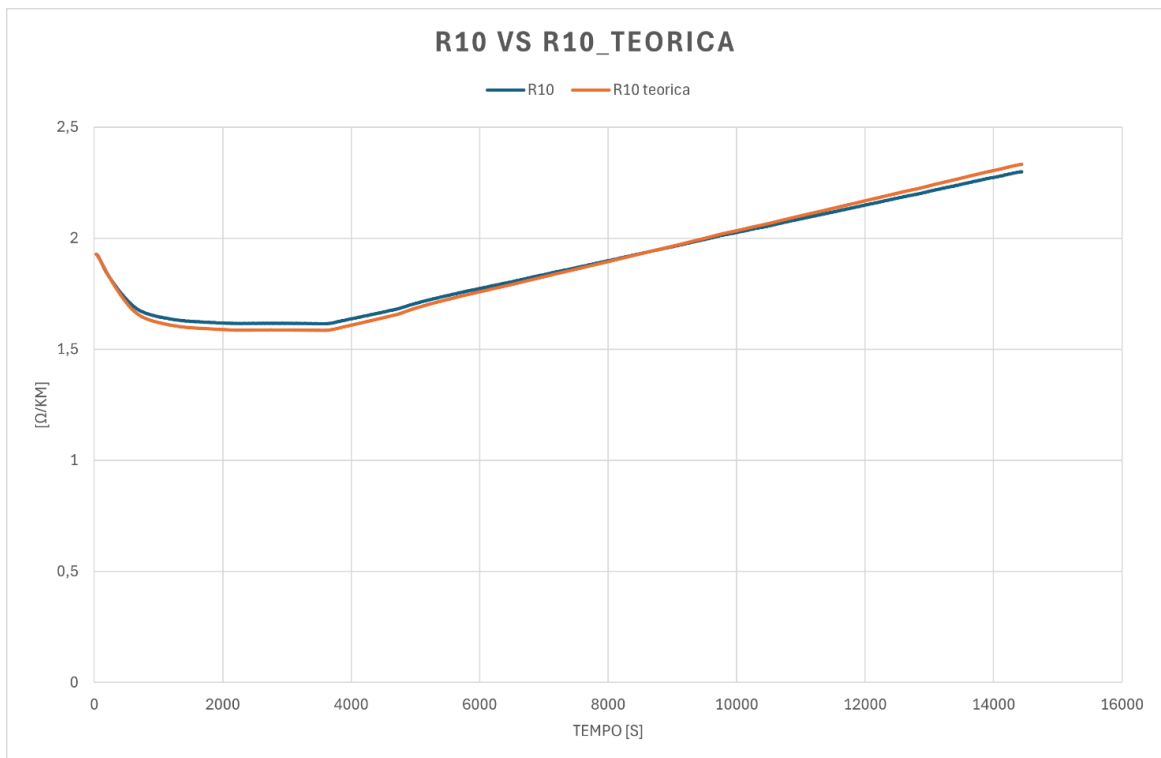


Figura 56: R10vsR10 teorica

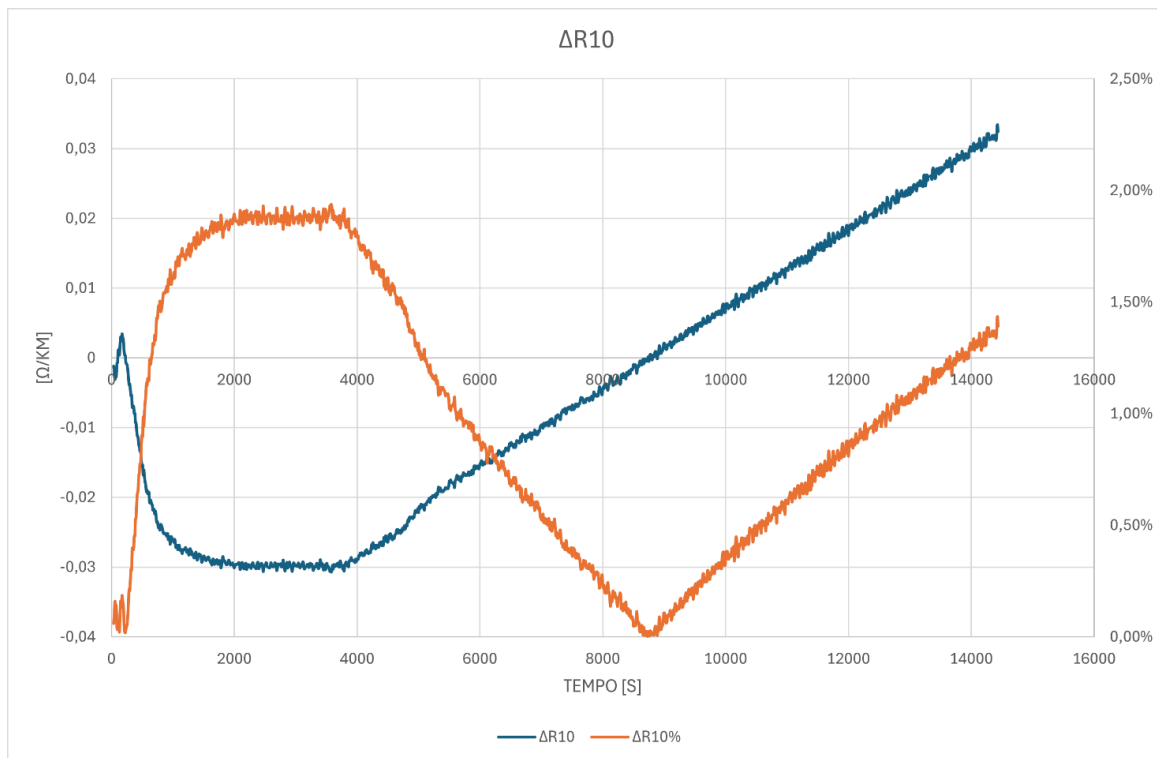


Figura 57: DeltaR10

Come è evincibile lo scostamento dai valori teorici non eccede il 3,25%.

11.3.5.2 Prova con temperatura decrescente ed umidità non controllata

La prova sperimentale è stata eseguita imponendo una rampa decrescente di temperatura interna alla camera climatica da 60°C a -10°C, con umidità non controllata. I risultati sono stati riportati nel paragrafo 11.1.2.

Gli andamenti delle resistenze misurate rispetto ai valori teorici attesi per i singoli cavi analizzati di sezione pari a 4, 6 e 10mmq rispettivamente, sono riportati nelle seguenti figure:

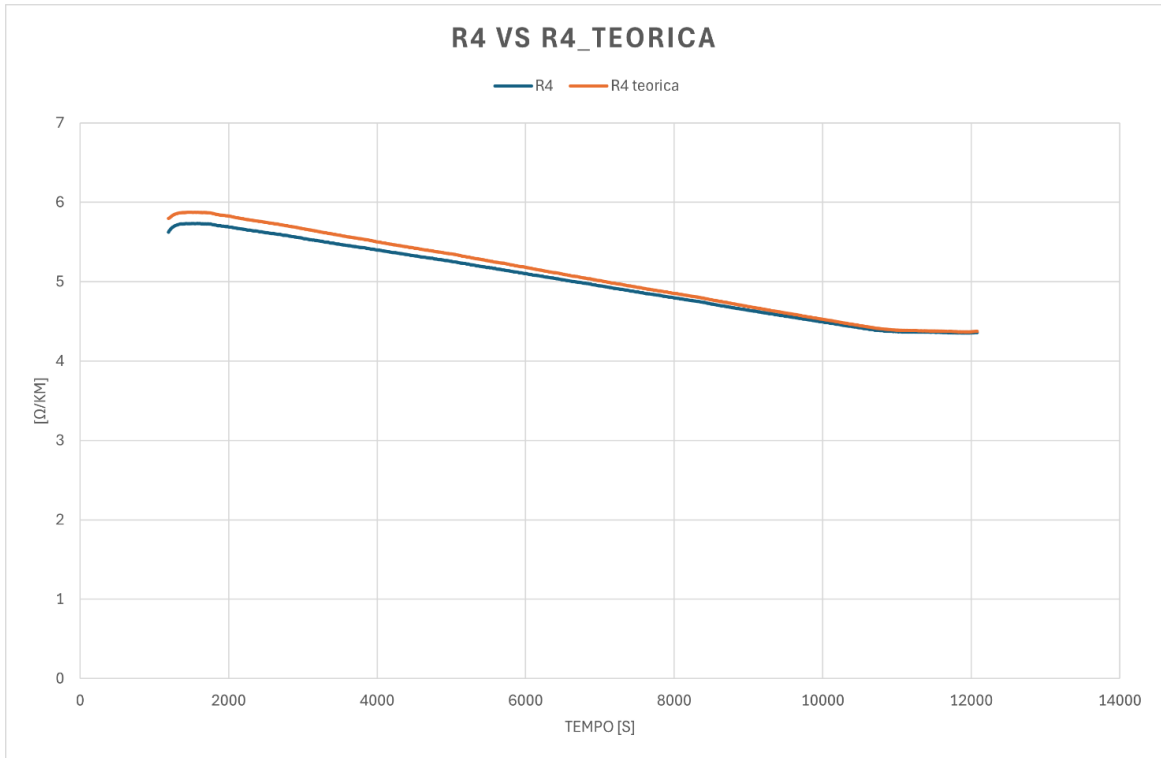


Figura 58: R4vsR4 teorica

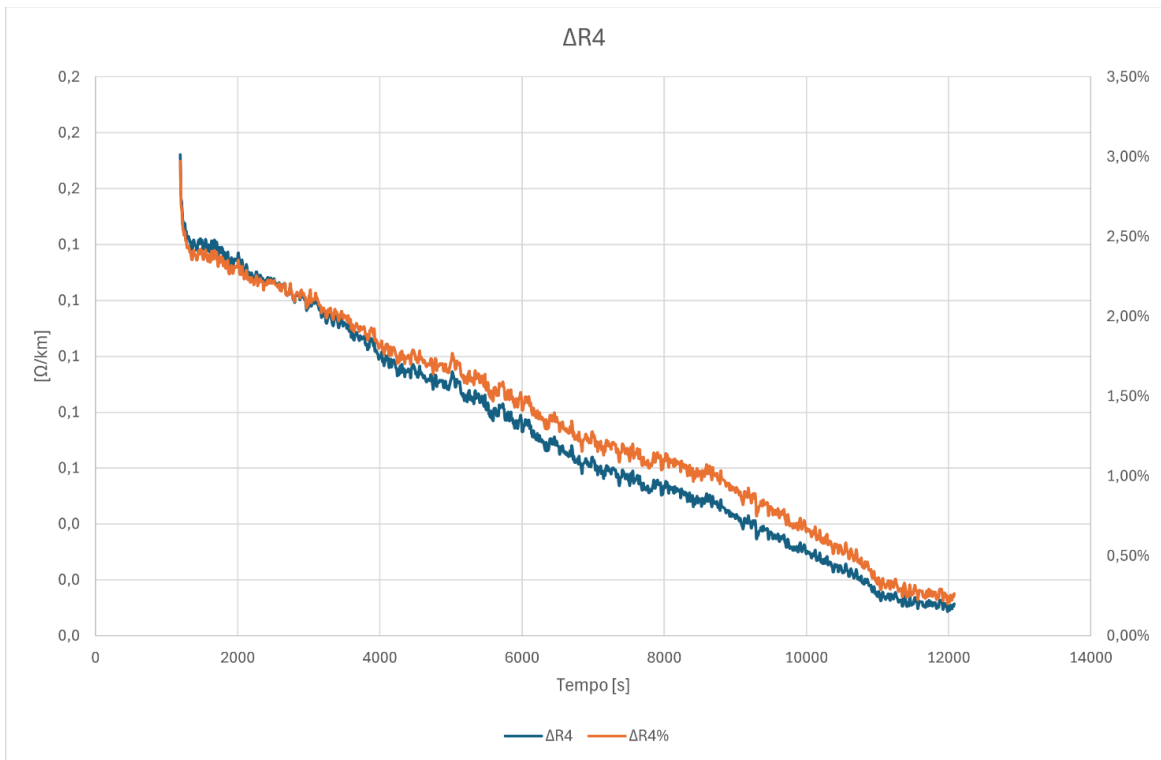


Figura 59: DeltaR4

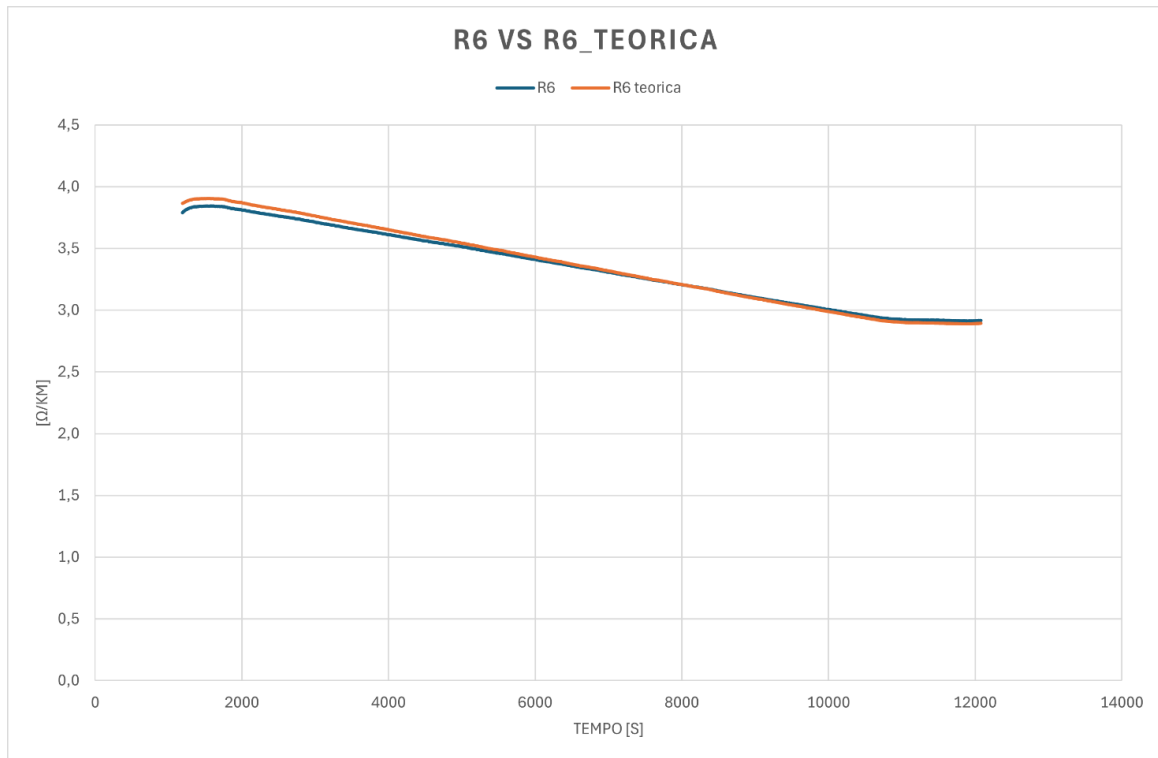


Figura 60: R6vsR6 teorica

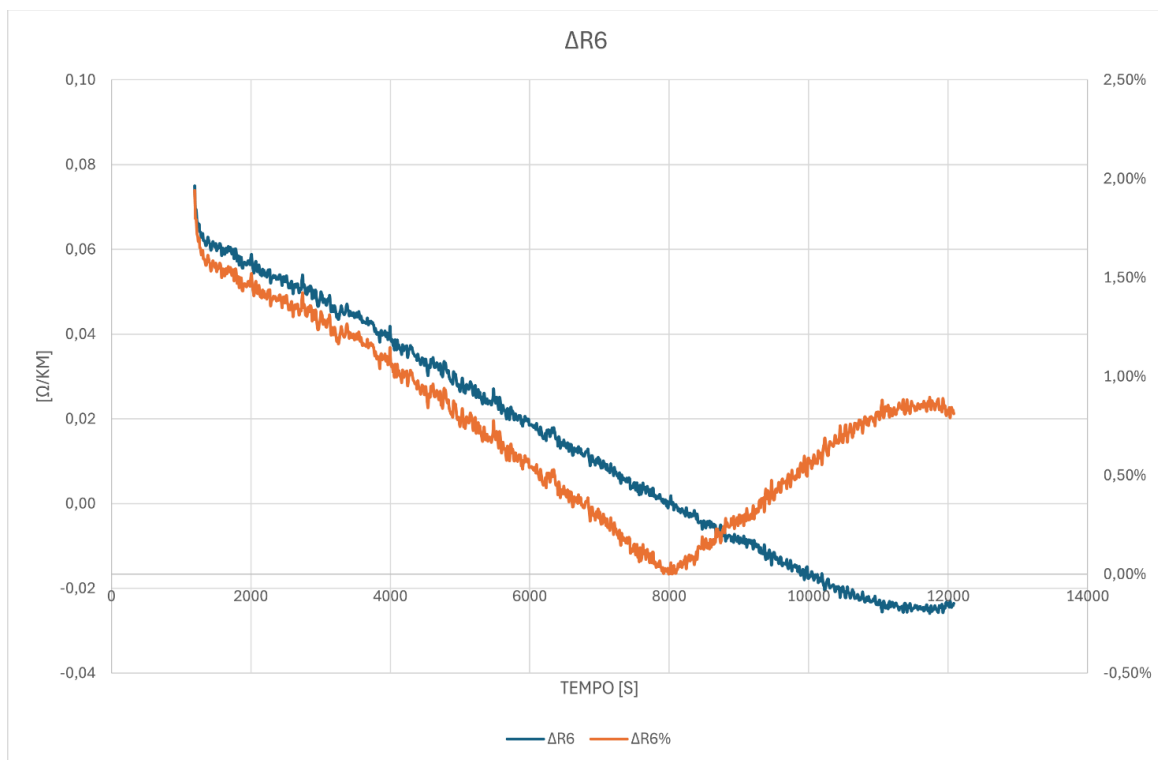


Figura 61: DeltaR6

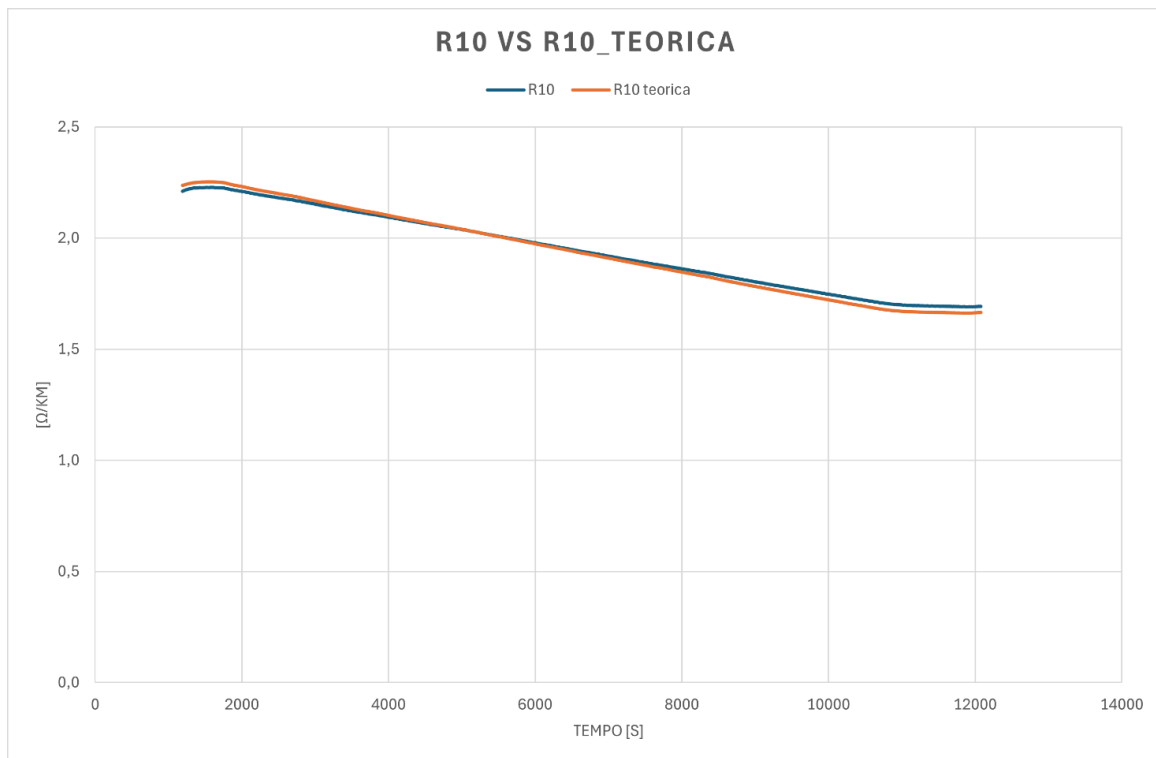


Figura 62: R10vsR10 teorica

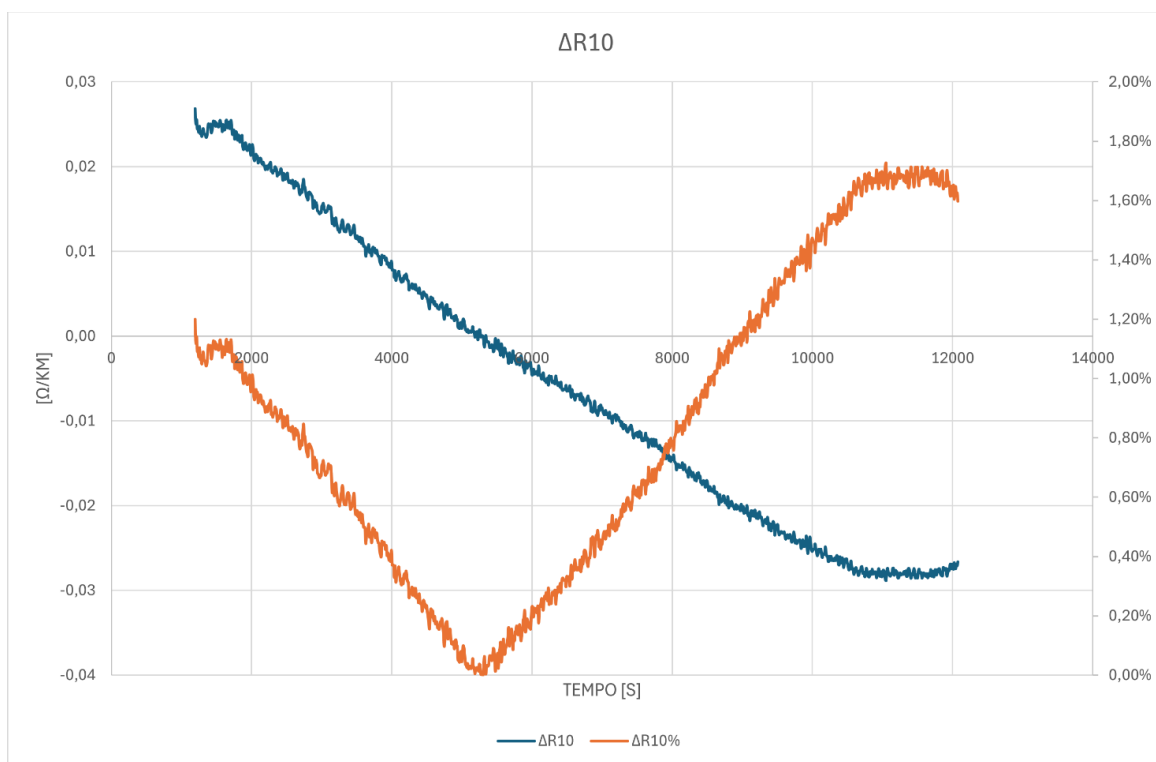


Figura 63: DeltaR10

Lo scostamento dai valori teorici riscontrato non eccede il 3%.

11.3.5.3 Prova con umidità crescente e temperatura costante

La prova sperimentale è stata eseguita alla temperatura di camera costante di 20°C mentre è stata imposta una rampa crescente di umidità interna di camera climatica dal 10% al 95%.

I risultati ottenuti sono stati riportati nel paragrafo 11.1.3.

Le successive figure riportano gli andamenti delle resistenze misurate rispetto ai valori teorici attesi per i singoli cavi analizzati di sezione pari a 4, 6 e 10mmq rispettivamente:

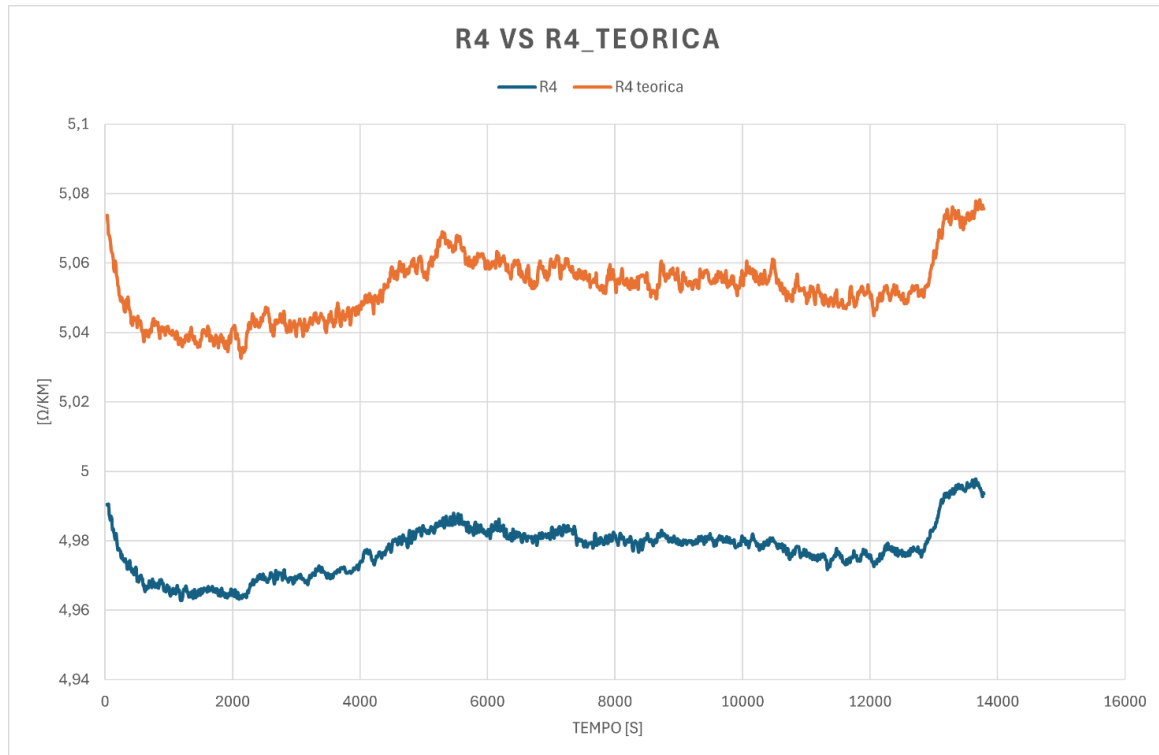


Figura 64: R4vsR4 teorica

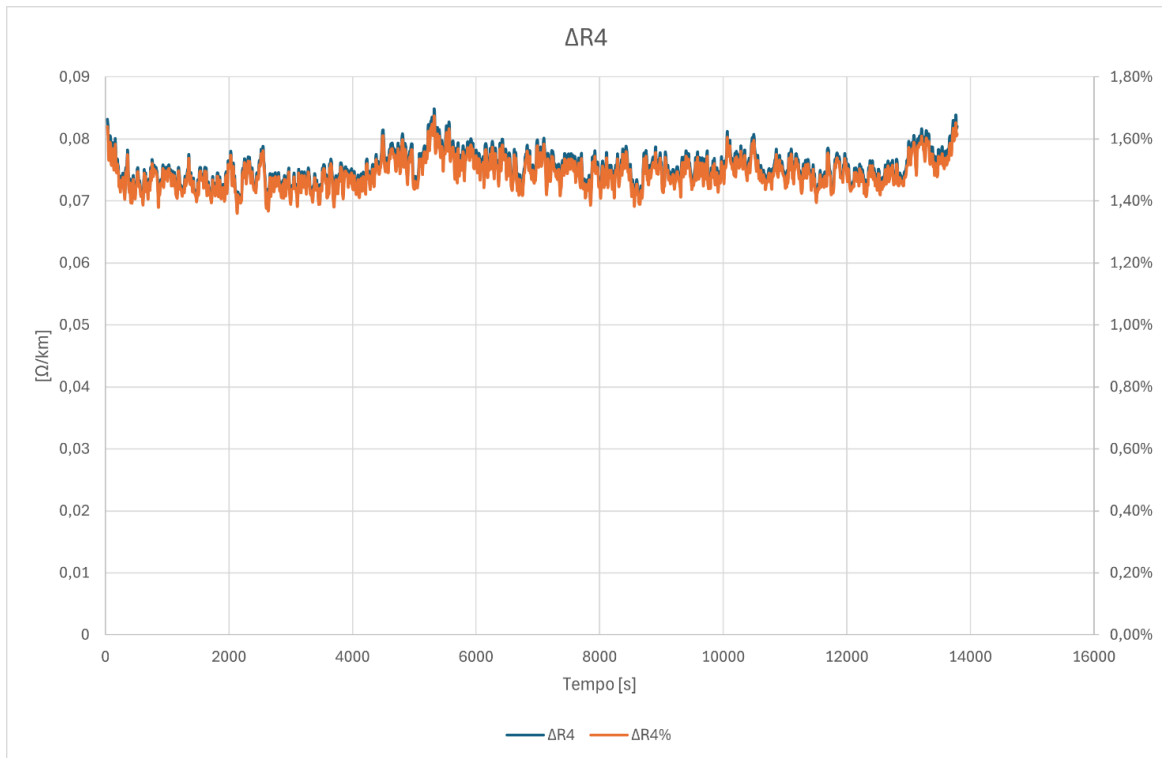


Figura 65: DeltaR4

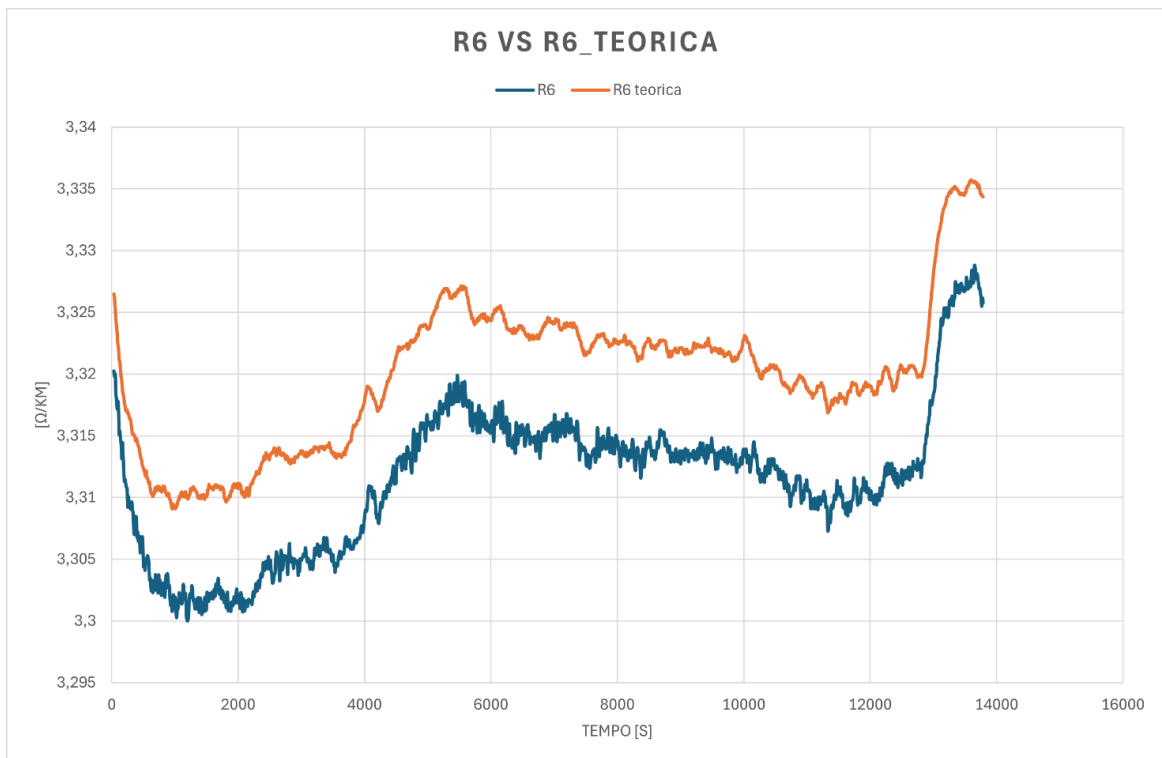


Figura 66: R6vsR6 teorica

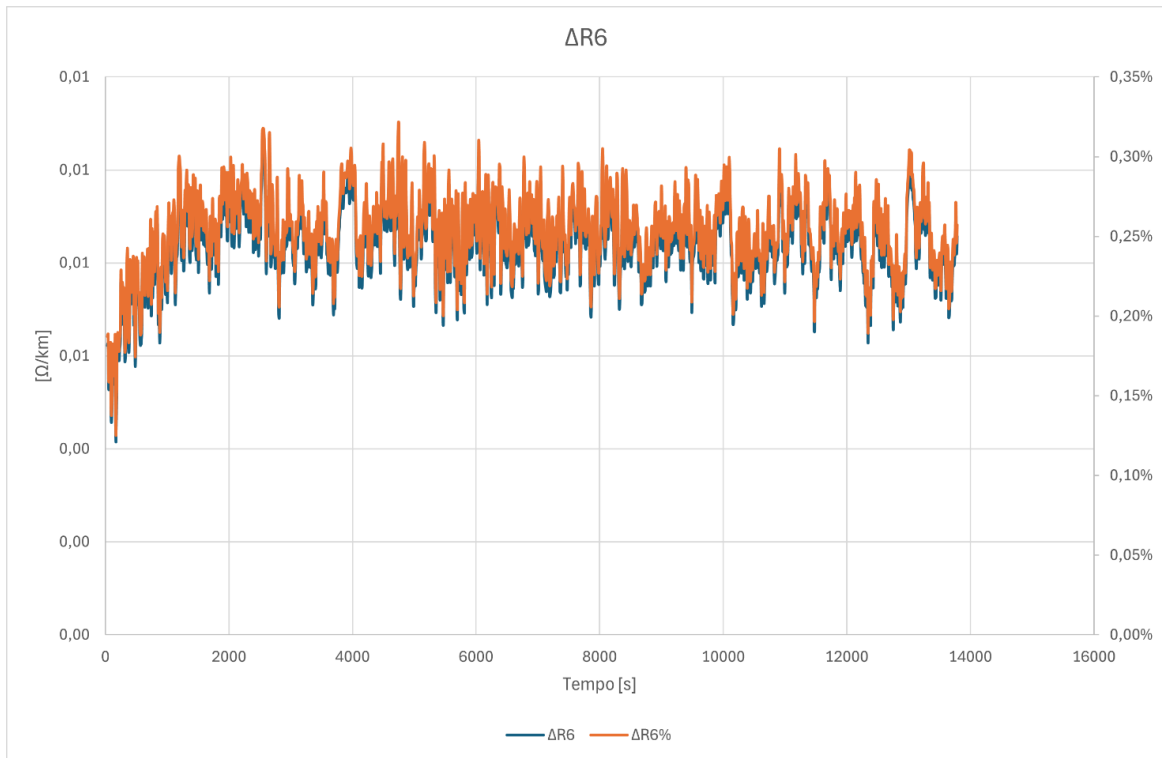


Figura 67: DeltaR6

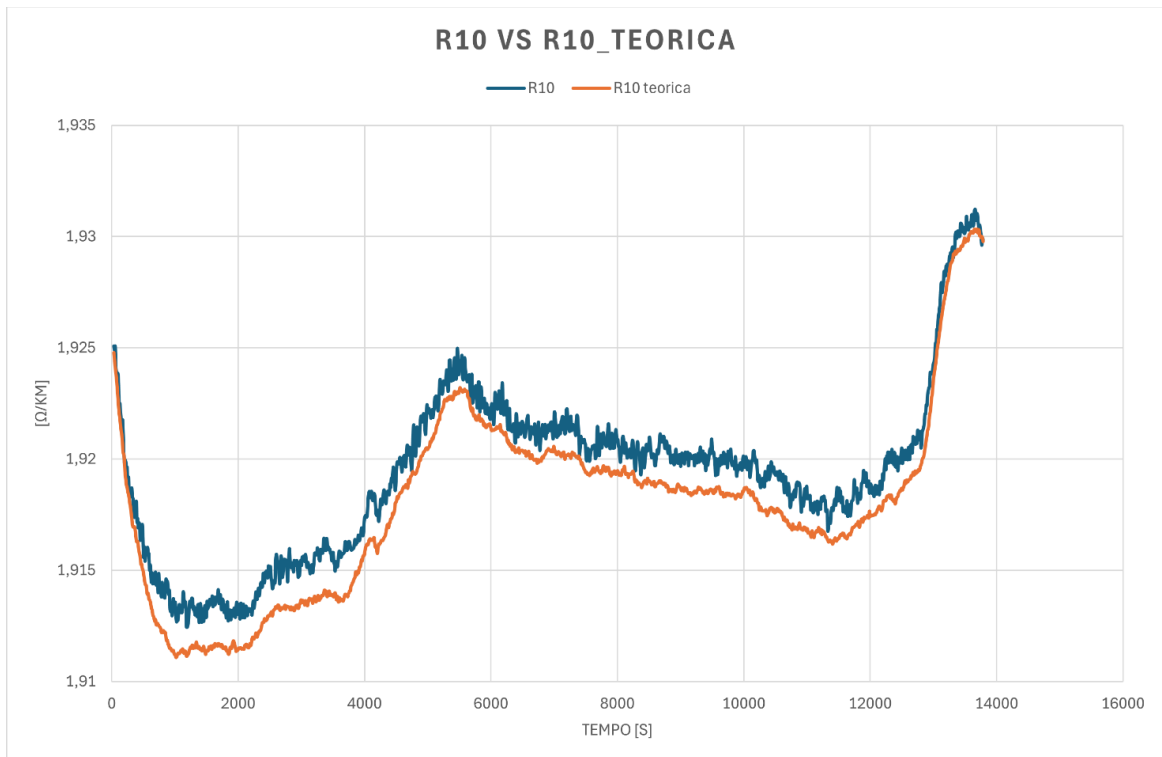


Figura 68: R10vsR10 teorica

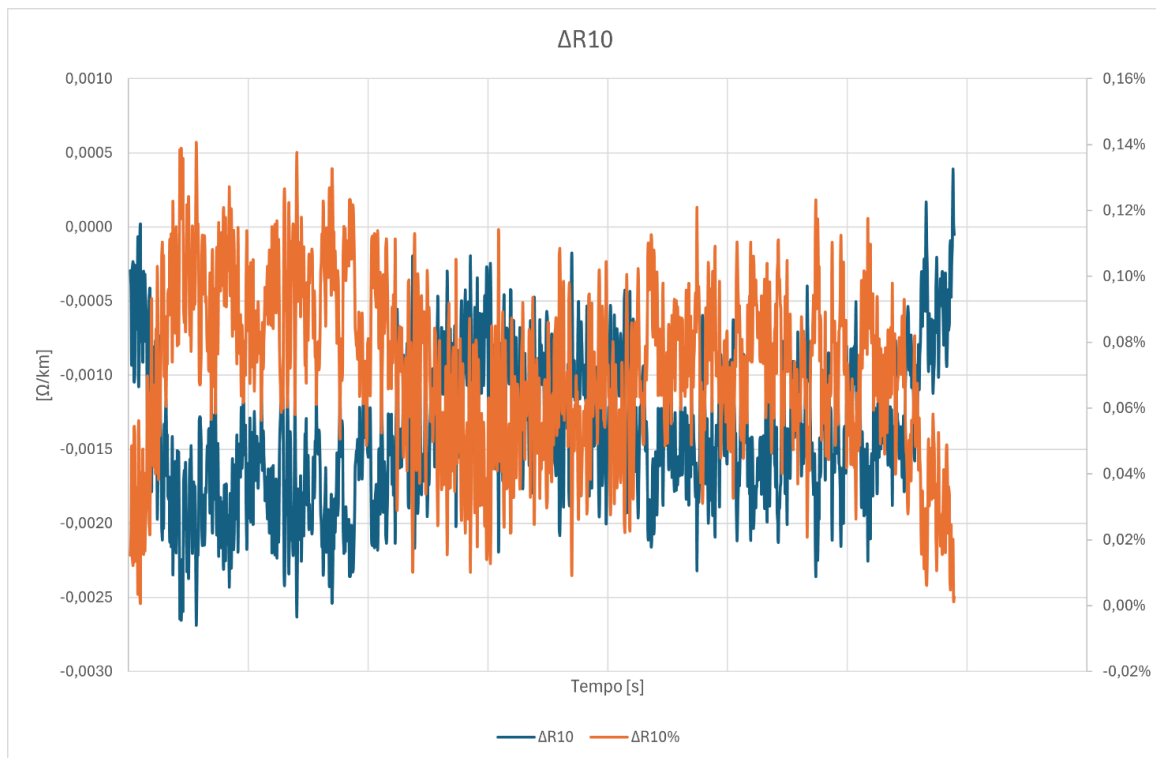


Figura 69: DeltaR10

Lo scostamento dai valori teorici riscontrato durante la prova è nettamente inferiore rispetto alle prove a temperatura variabile e non eccede il 1,6% riscontrato nel caso peggiore del cavo da 4mmq.

11.3.5.4 Prova con umidità e temperatura di camera costante

La prova sperimentale è stata eseguita fissando la temperatura di camera costante pari a 20°C ed umidità interna costante a 5% con valori di corrente crescente per aumentare la temperatura di esercizio dei campioni.

I risultati ottenuti sono stati riportati nel paragrafo 11.1.4.

Gli andamenti delle resistenze misurate rispetto ai valori teorici attesi per i singoli cavi analizzati di sezione pari a 4, 6 e 10mmq rispettivamente, sono riportati di seguito:

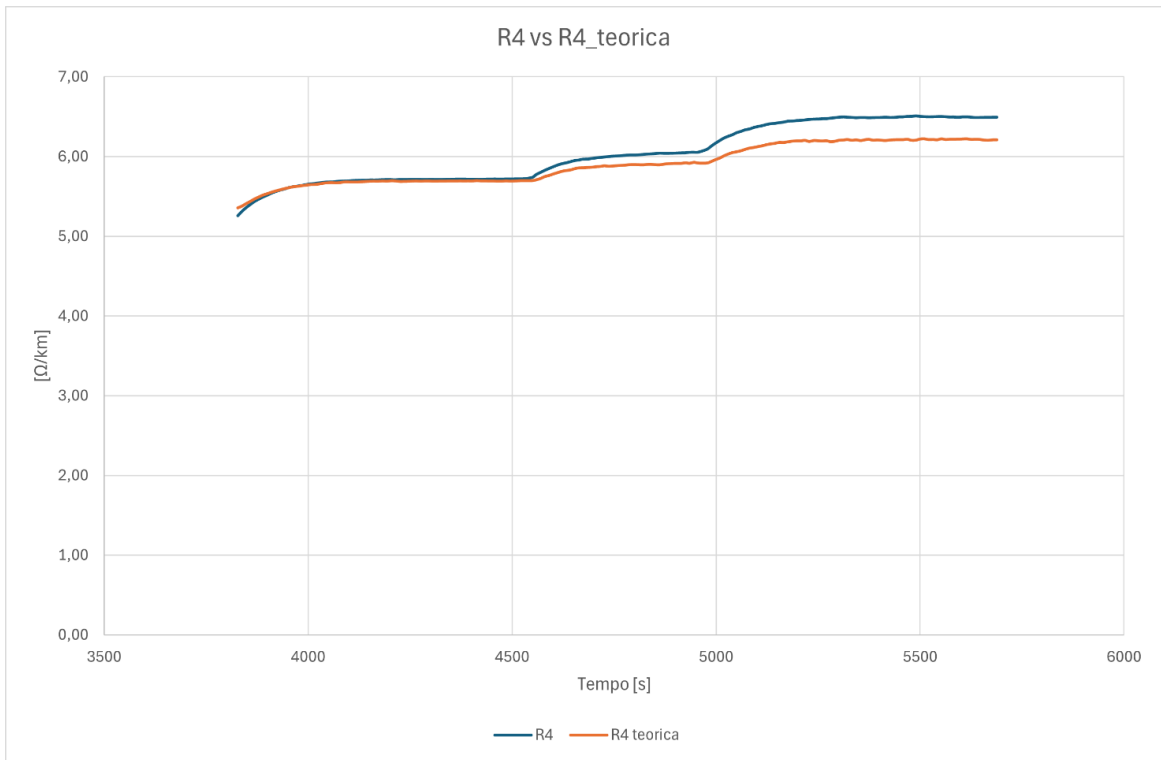


Figura 70: R4vsR4 teorica

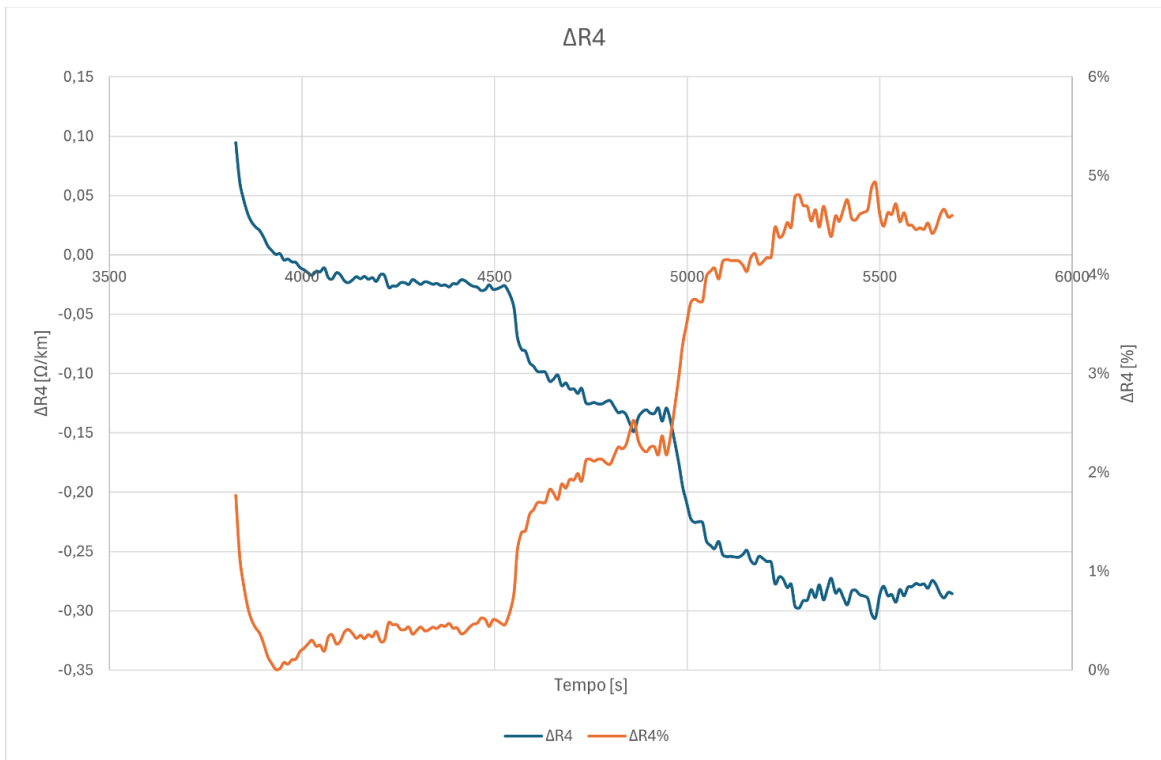


Figura 71: . DeltaR4

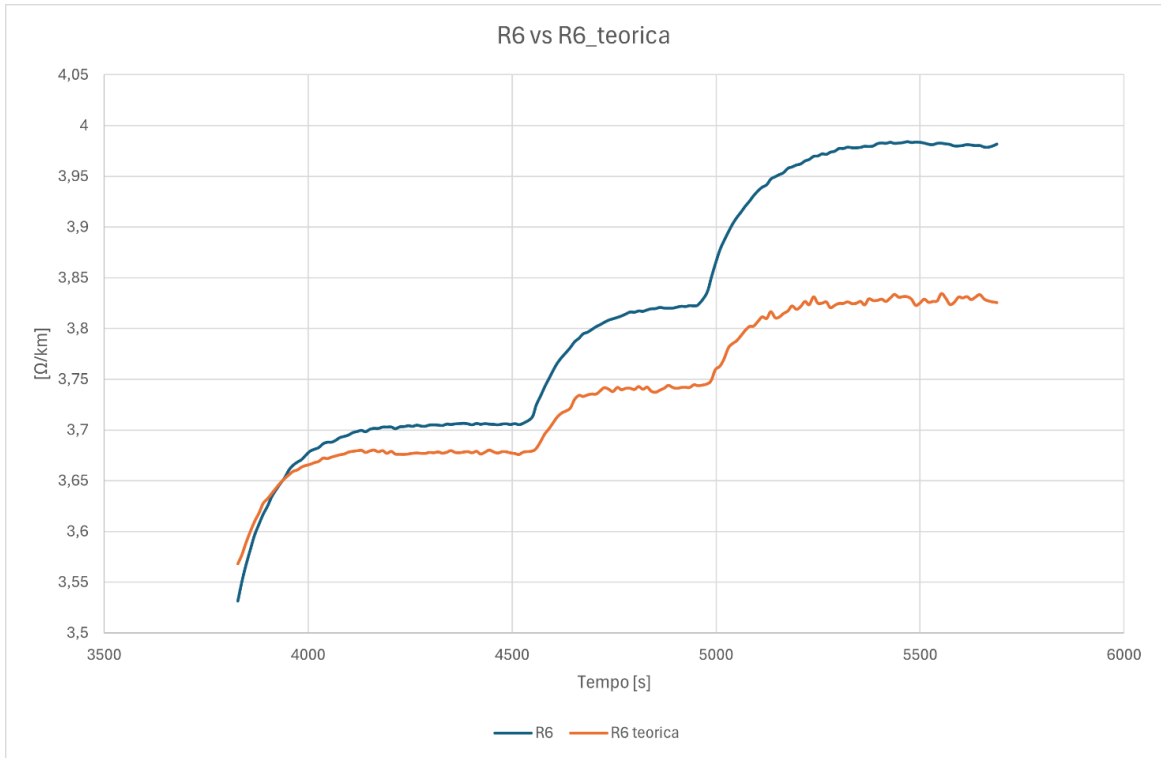


Figura 72: R6vsR6 teorica



Figura 73: DeltaR6

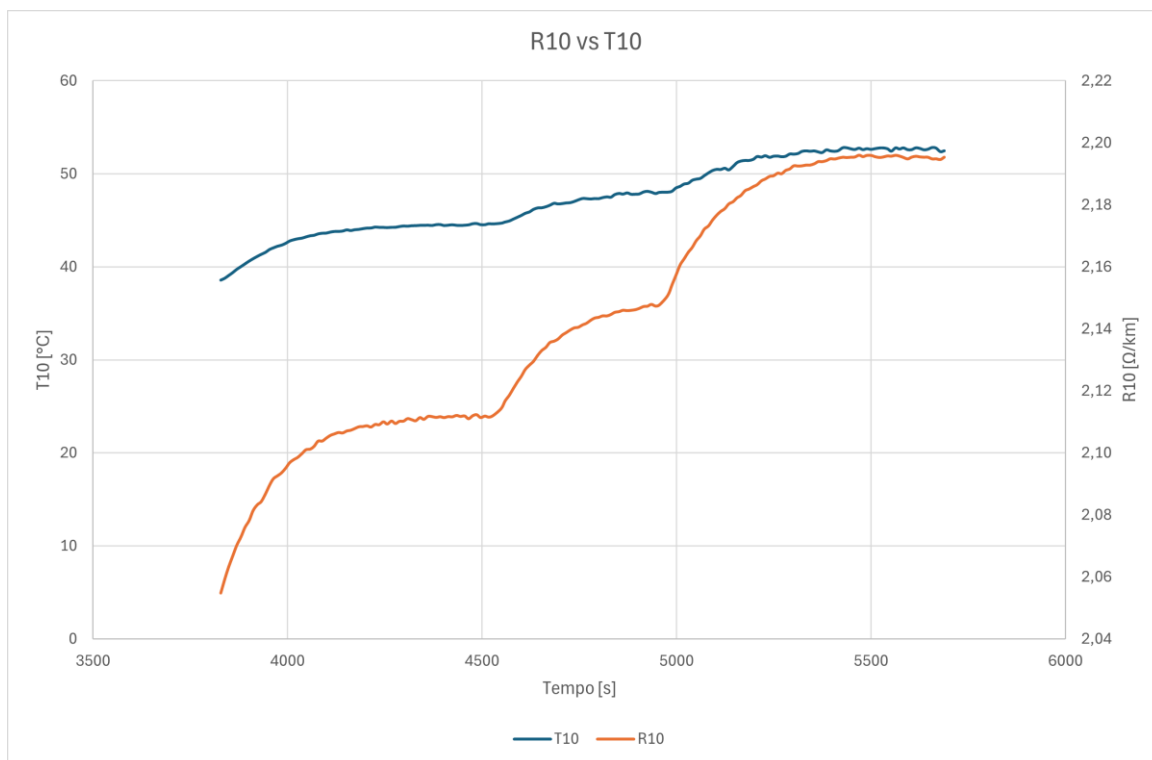


Figura 74: R10vsR10 teorica

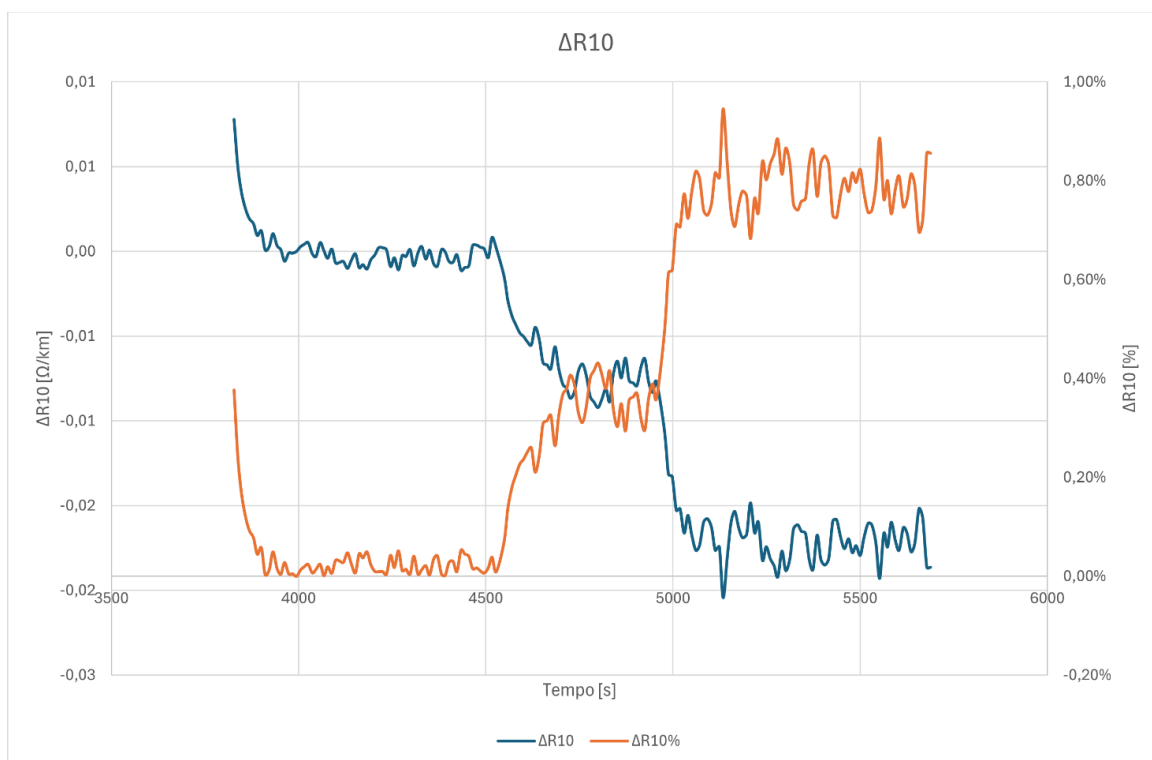


Figura 75: DeltaR10

Come evincibile dalle precedenti figure, lo scostamento dai valori teorici riscontrato durante la prova è estremamente maggiore rispetto alle altre prove sperimentali eseguite, in quanto le temperature raggiunte dalle singole guaine dovute al sovraccarico di corrente sono state nettamente superiori. Ancora una volta, il cavo maggiormente sollecitato è stato il campione da 4mmq per il quale lo scostamento ha fatto registrare un massimo di circa il 5,5%, anche se anche gli altri campioni presentano scostamenti nettamente superiori al caso delle altre prove.

