



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Ingegneria Industriale DII

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria dell'Energia Elettrica

Confronto tra approccio analitico e simulazioni FEM per il dimensionamento delle reti di terra per sottostazioni

Relatore: Prof. Fabio Bignucolo

Correlatore: Ing. Riccardo Clementi

Laureando: Andrea Niero

Matricola: 1210209

Anno Accademico 2020/2021

Indice

INTRODUZIONE.....	5
I.1 Generalità.....	5
I.2 Scopo	5
1 TEORIA SUL SISTEMA DI MESSA A TERRA.....	7
1.1 Limiti di corrente tollerabili dal corpo umano	7
1.2 Limiti di tensione	8
1.3 Caratteristiche del suolo.....	9
1.3.1 Misura della resistività.....	11
1.3.2 Modello del suolo uniforme.....	13
1.3.3 Modello del suolo a due strati.....	13
2 PROGETTAZIONE DELLA RETE DI TERRA	15
2.1 IEEE Std 80-2013	15
2.1.1 Massima corrente I_G	15
2.1.2 Sezione del conduttore.....	19
2.1.3 Resistività del materiale superficiale ρ_s	21
2.1.4 Geometria della rete di terra	22
2.1.5 Resistenza di terra.....	24
2.1.6 Limite della tensione di passo e contatto	27
2.1.7 Progettazione	28
2.1.8 Calcolo della massima tensione di maglia e di passo	31
2.1.9 Revisione del progetto preliminare.....	33
2.2 Simulazioni FEM, XGSLab	34
2.2.1 Limiti di funzionamento	34
2.2.2 Dati in ingresso.....	36
2.2.3 Risultati in uscita	36
3 CASO STUDIO, PROGETTO IDROELETTRICO DI SINGROBO-AHOUATY .37	
3.1 Approccio analitico IEEE Std 80-2013.....	37
3.2 Approccio con simulazioni FEM	41
3.2.1 Simulazioni.....	52

3.3	Differenze tra i due metodi	61
3.3.1	Confronto con gli stessi input.....	62
3.4	Simulazioni al variare della resistività del suolo.....	67
3.4.1	Scenario 1	67
3.4.2	Scenario 2	77
3.4.3	Scenario 3	84
3.4.4	Scenario 4.....	89
CONCLUSIONI.....		99
BIBLIOGRAFIA.....		101
RINGRAZIAMENTI		103

Introduzione

I.1 Generalità

Il tema della messa a terra di grandi sottostazioni elettriche ad alta tensione, è di estrema importanza per quanto riguarda la sicurezza delle persone che ci operano all'interno e per la protezione degli apparecchi in caso di guasto. La messa a terra è il collegamento creato intenzionalmente tra le parti metalliche, che possono essere in tensione a causa di un guasto, e l'elettrodo di dispersione di terra collocato ad una adeguata profondità nel terreno. Nelle sottostazioni un buon impianto di messa a terra deve avere una resistenza molto bassa poiché è difficile raggiungere il valore nullo [1].

Quando si progetta un sistema di messa a terra, è fondamentale verificare la sicurezza delle persone nelle aree di interesse della sottostazione ed in particolare che le tensioni di contatto e di passo siano sotto i limiti ammissibili dalla normativa di riferimento. Altri parametri caratteristici sono la resistenza di terra, il potenziale di terra e la tensione di contatto trasferita. Un buon sistema di messa a terra quindi [2]:

- Fornisce mezzi per dissipare la corrente elettrica a terra senza superare i limiti operativi dell'attrezzatura.
- Fornisce un ambiente sicuro per proteggere il personale nelle vicinanze delle strutture con messa a terra dai pericoli di scosse elettriche in condizioni di guasto.

L'impianto di terra comprende tutte le strutture di messa a terra interconnesse nell'area della sottostazione, tra cui, fili di terra aerei, griglia di terra, resistenza di terra dei tralicci, ecc. La rete di terra consiste di conduttori interconnessi orizzontali e spesso integrata da aste di terra verticali. La sicurezza del sistema può essere verificata con i metodi forniti dalla normativa americana IEEE o europea IEC, oppure utilizzando software più complessi agli elementi finiti (FEM).

I.2 Scopo

Lo scopo di questo lavoro di tesi svolto durante uno stage universitario presso l'azienda STE Energy srl, è di confrontare l'approccio analitico degli standard americani IEEE 80-2013 con il software XGSLab agli elementi finiti, per il dimensionamento del sistema di messa a terra delle sottostazioni. Il confronto si basa su in progetto di un caso reale di una sottostazione in Costa D'Avorio per un impianto idroelettrico di 50 MW. Verranno analizzati i limiti dell'approccio con normativa e le potenzialità dell'utilizzo del software, confrontando i risultati ottenuti e valutando le differenze di costi in base ai parametri caratteristici della rete, come la quantità di materiale utilizzato. Oltre al progetto reale verranno proposti altri scenari per simulare diverse condizioni del suolo che si possono trovare nella realtà a seconda della composizione del terreno, e valutare

la migliore scelta progettistica da seguire. In particolare nel capitolo uno vengono presentati gli elementi di teoria sul sistema di messa a terra, con particolare attenzione agli aspetti di sicurezza; nel capitolo due vengono presentati i due metodi per progettare una rete di terra, quindi con il metodo da normativa IEEE 80-2013 e con l'utilizzo del software XGSLab agli elementi finiti; nel terzo capitolo si dimensiona la rete di terra del caso studio con approccio IEEE e con il software, simulando inoltre differenti configurazioni e situazioni che potrebbero accadere, analizzando le differenze tra i due metodi. In aggiunta, nell'ultima parte del capitolo, vengono simulati col software quattro diversi scenari variando la resistività del suolo.

1 Teoria sul sistema di messa a terra

Come anticipato nell'introduzione, il sistema di messa a terra è di estrema importanza nelle sottostazioni elettriche per la sicurezza delle persone. In questo capitolo si parlerà degli studi fatti sui limiti di corrente tollerabili dal corpo umano e ciò che sta alla base della progettazione di un buon impianto di terra ovvero la misura della resistività del suolo e la sua modellazione, e le tensioni che possono creare situazioni di pericolo come il potenziale di terra, la tensione di contatto e di passo.

1.1 Limiti di corrente tollerabili dal corpo umano

Gli effetti della corrente elettrica che attraversa le parti vitali del corpo umano dipendono dalla sua durata, ampiezza e frequenza. La situazione più pericolosa è quando il percorso della corrente include il cuore che può dare origine a fibrillazione ventricolare che causa l'arresto del battito cardiaco.

Alle frequenze di 50 Hz o 60 Hz una corrente di circa 0,1 A può essere letale. In corrente continua il corpo umano può tollerare una corrente di circa cinque volte superiore, mentre a frequenze da 3000 Hz a 10000 Hz si possono tollerare correnti anche superiori [3].

Riguardo all'ampiezza della corrente a seconda del suo valore crescente si possono distinguere i seguenti effetti fisiologici: soglia di percezione, contrazione muscolare, incoscienza, fibrillazione ventricolare, arresto respiratorio e ustioni. La soglia di percezione è normalmente di 1 mA mentre i valori di 6 mA e 9 mA, rispettivamente per donna e uomo, sono stati fissati come valori di soglia per le correnti di rilascio, ovvero correnti per le quali si ha ancora il controllo dei muscoli per rilasciare un eventuale oggetto energizzato. Tra 9 mA e 25 mA, le correnti possono essere dolorose e rendere difficile o impossibile il rilascio degli oggetti energizzati afferrati, inoltre correnti più elevate potrebbero rendere difficile la respirazione. Nell'intervallo da 60 mA a 100 mA si raggiunge la fibrillazione ventricolare, l'arresto cardiaco e respiratorio, può causare lesioni e la morte.

La durata della corrente è importante perché il valore di corrente che causa la fibrillazione ventricolare è correlata all'energia assorbita dal corpo umano. È quindi fondamentale una veloce eliminazione del guasto che porta ad una diminuzione della probabilità di esposizione alle shock elettrico e riduce la possibilità di lesioni o morte se la durata del flusso di corrente attraverso il corpo è molto breve.

Sulla base di studi e ricerche si presume che il 99,5% di persone possa sopportare in sicurezza, senza fibrillazione ventricolare, una corrente di ampiezza e durata determinata dalle seguenti formule rispettivamente per un peso corporeo di 50 kg e 70kg:

$$I_B = \frac{0,116}{\sqrt{t_s}} \quad I_B = \frac{0,157}{\sqrt{t_s}} \quad (1)$$

Considerando un intervallo di frequenze non troppo elevato (15-100 Hz) in Figura 1 viene riportato il grafico tempo-corrente, distinguendo le zone di pericolosità:

- AC-1 e AC-2 la corrente può essere percepita ma non è pericolosa;
- AC-3 si verificano effetti fisiopatologici quali tetanizzazione dei muscoli, difficoltà respiratorie, aritmie e arresti temporanei del cuore;
- AC-4 alta probabilità di fibrillazione ventricolare, l'arresto respiratorio e ustioni. La curva C2 si riferisce ad una probabilità del 5% mentre la curva C3 ad una del 50% di avere fibrillazione ventricolare.

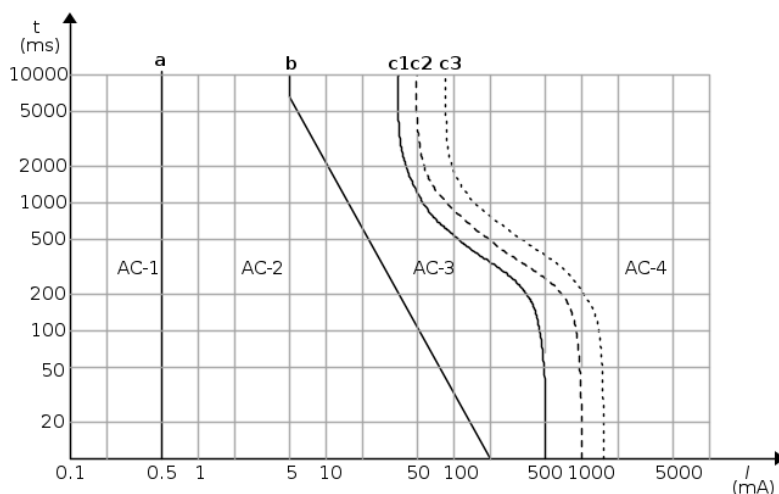


Figura 1: Zone di pericolosità della corrente attraverso il corpo

1.2 Limiti di tensione

In una sottostazione in caso di guasto si possono verificare situazioni di rischio per la persona che si trova all'interno o nelle vicinanze. Sono tre le principali situazioni di shock elettrico che si possono verificare. La prima è causata dalla tensione di passo E_s (step voltage), questa è la meno dannosa perché il percorso piede-piede non include organi vitali. La seconda è data dalla tensione di contatto E_t (touch voltage), che riguarda solitamente il percorso mano-piedi. Infine l'ultima è causata dalla tensione di contatto metallo-metallo o mano-mano, ovvero quando si toccano due oggetti a potenziale differente. Quest'ultima situazione si verifica quando non tutte le strutture metalliche all'interno della stazione sono connesse a terra. Un altro parametro importante da considerare negli impianti di terra è il GPR (ground potential rise) ossia il massimo potenziale elettrico che può raggiungere la rete di terra di una sottostazione rispetto a un punto di messa a terra che si trova al potenziale della terra remota, ed è pari alla massima corrente di terra moltiplicata per la resistenza della rete di terra. Questo potenziale è importante per valutare la tensione di contatto trasferita, all'interno o esterno della sottostazione, dove la persona che si trova in un punto remoto tocca un oggetto collegato all'impianto di terra della sottostazione.

In Figura 2 sono rappresentate le situazioni appena descritte, con indicate le relative tensioni.

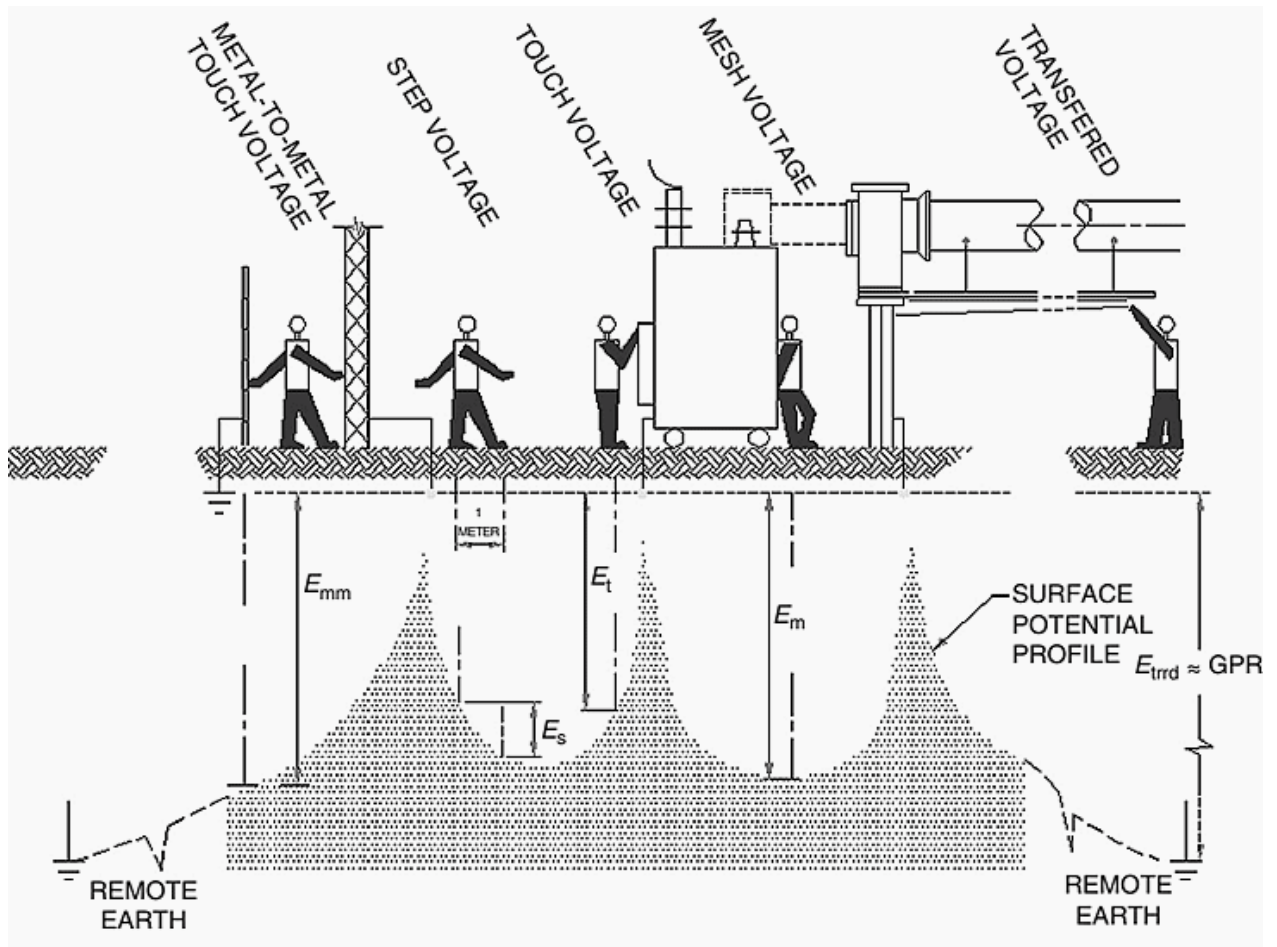


Figura 2: Principali situazioni di shock elettrico

1.3 Caratteristiche del suolo

La resistenza risultante di un dispersore di terra è pesantemente influenzata dalla resistività del terreno circostante. Una conoscenza della struttura e composizione del suolo è quindi un fattore determinante per una buona progettazione dell'impianto di terra.

Il suolo ha una conduzione di tipo elettrolitico, per questo motivo quando il contenuto di umidità è minore del 15%, la resistività del suolo aumenta velocemente, mentre per valori superiori al 20% cala lentamente. L'effetto della temperatura è quasi trascurabile per valori superiori al punto di congelamento, ma per valori inferiori a 0°C l'acqua inizia a congelare e la resistività aumenta rapidamente. Bisogna quindi tenere conto delle variazioni stagionali che possono comportare, in alcune zone, grandi variazioni di resistività del terreno. Un altro fattore che determina il valore di resistività del suolo è la presenza di sali solubili, acidi o alcali. Per esempio la presenza di sale

(cloruro di sodio) va a ridurre la resistività. La Figura 3 mostra le curve di variazione della resistività del suolo al variare della percentuale di sali, di umidità e della temperatura.

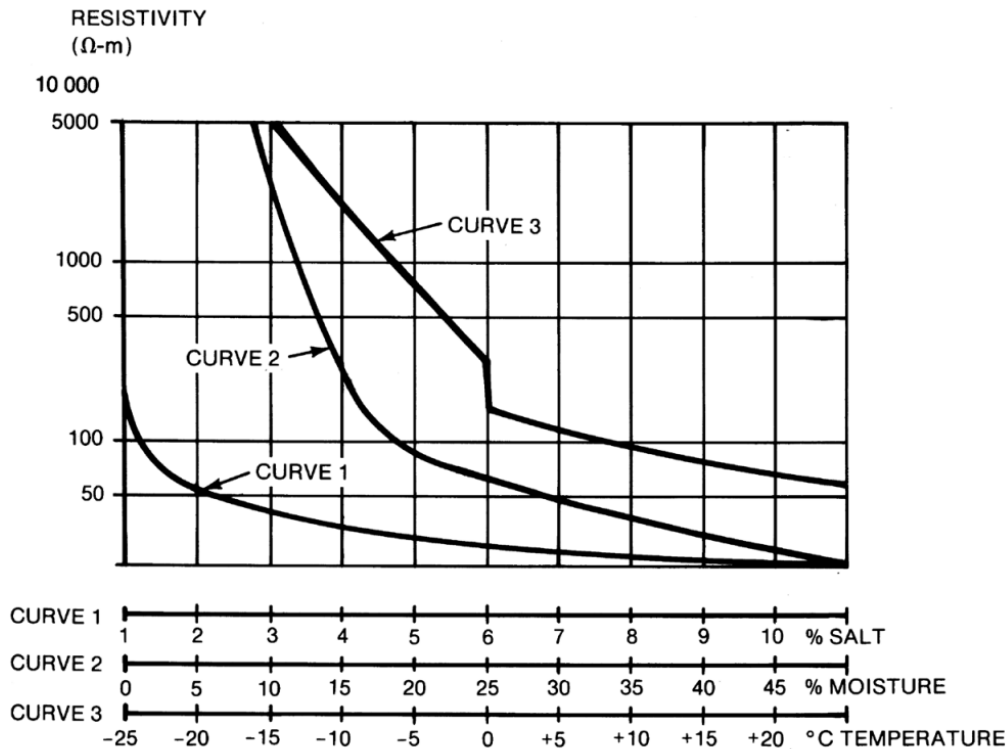


Figura 3: Effetto di sali, umidità e temperatura sulla resistività del suolo

L'aggiunta di uno strato di materiale superficiale come per esempio la ghiaia, aiuta a ritardare l'evaporazione dell'umidità dal terreno. Inoltre avendo una resistività molto alta, che varia anch'essa in condizione di asciutto o bagnato, è ottimo per ridurre le tensioni pericolose che possono causare uno shock elettrico.

Nella Tabella 1 sono riportati i range di valori di resistività del terreno in base alla sua natura, chiaramente terreni più umidi e con presenza di sali hanno resistività minore rispetto a quelli più rocciosi [4].

Tabella 1: Valori approssimativi della resistività del terreno in base alla sua natura

<i>Natura del terreno</i>	<i>Resistività [Ωm]</i>
<i>Terreno paludoso</i>	0 ÷ 30
<i>Terreno vegetale</i>	10 ÷ 150
<i>Torba umida</i>	5 ÷ 100
<i>Terra calcarea</i>	100 ÷ 200
<i>Sabbia argillosa</i>	50 ÷ 500
<i>Sabbia silicea</i>	200 ÷ 3000
<i>Terreno roccioso nudo</i>	1500 ÷ 3000
<i>Calcarea tenero</i>	100 ÷ 300
<i>Calcarea compatto</i>	1000 ÷ 5000
<i>Granite e gres alterati</i>	1500 ÷ 10000

1.3.1 Misura della resistività

Per conoscere la resistività del suolo bisogna fare un certo numero di misure in vari punti all'intero del sito di costruzione. Difficilmente si trovano siti dove la resistività del terreno è uniforme, in generale il suolo è costituito da diversi strati ognuno con la propria resistività. Possono esserci anche variazioni laterali, ma rispetto a quelli verticali si verificano con più gradualità.

Uno dei metodi più comunemente usati per la misura della resistività del suolo è il metodo Wenner a quattro pin come mostra la Figura 4. Il funzionamento di questo metodo è semplice. Le quattro sonde vengono conficcate nel terreno lungo una linea retta, a distanze uguali di lunghezza a e profondità b . Viene iniettata una corrente dagli elettrodi esterni mentre quelli interni misurano la differenza di potenziale e dividendola per la corrente si ottiene il valore della resistenza R .

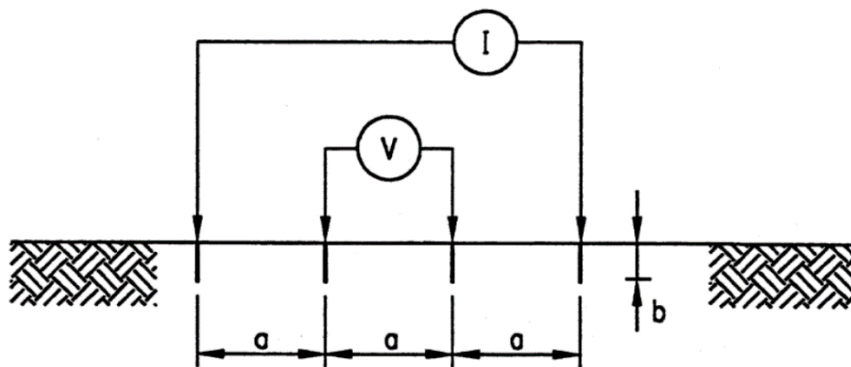


Figura 4: Metodo Wenner a quattro pin

Le misure della resistenza vengono fatte andando a variare la distanza tra le sonde e la resistività apparente ρ_a è data da:

$$\rho_a = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}} \quad (2)$$

Se b è piccolo rispetto ad a l'equazione (2) può essere semplificata:

$$\rho_a = 2\pi a R \quad (3)$$

Più la distanza a è grande, più la corrente penetra in profondità. Si può assumere che la resistività apparente è la resistività del terreno ad una profondità approssimativamente pari a $3/4 a$.

Un altro metodo per misurare la resistività del suolo, come mostrato nella Figura 5 è il metodo dell'asta guidata, basato sul metodo a tre perni o caduta di potenziale. In questo metodo viene variata la profondità L_r dell'asta di prova condotta nel terreno. Le altre due aste, note come aste di riferimento, sono guidate a una profondità ridotta in linea retta. La posizione dell'asta di tensione è variata tra l'asta di prova e l'asta corrente. In alternativa, l'asta di tensione può essere posizionata sul lato opposto all'asta corrente. La resistività apparente è data da

$$\rho_a = \frac{2\pi L_r R}{\ln\left(\frac{8L_r}{d}\right) - 1} \quad (4)$$

Dove

- L_r è la lunghezza del picchetto [m]
- d è il diametro del picchetto [m]

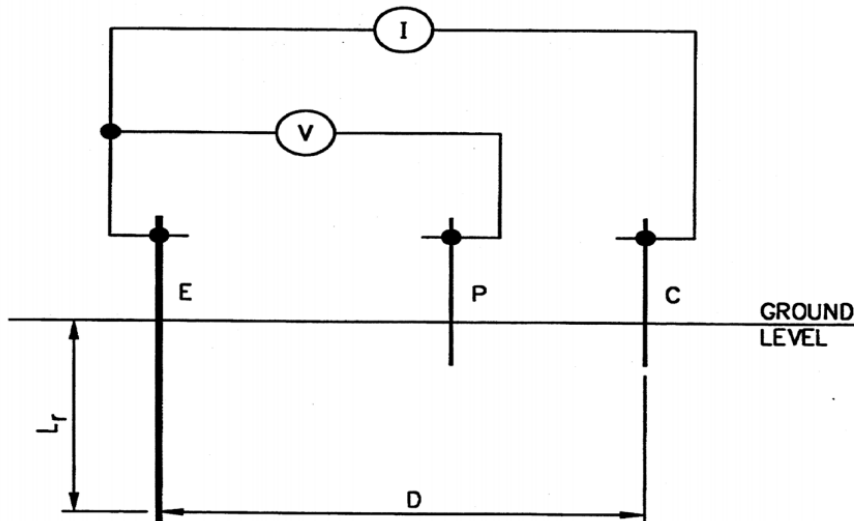


Figura 5: Schema del metodo a tre pin o dell'asta guidata

1.3.2 Modello del suolo uniforme

Ricavare il modello del suolo equivalente interpretando le misure di resistività non è semplice. Un modello di suolo uniforme dovrebbe essere utilizzato solo quando c'è una variazione moderata nella resistività apparente. Solitamente nella maggior parte dei casi le misure di resistività variano molto e ciò rende il modello non adeguato, fornendo risultati non accurati.

Il valore di resistività uniforme del modello può essere ottenuto dalla media aritmetica dei dati di resistività apparente misurati:

$$\rho_a = \frac{\rho_{(1)} + \rho_{(2)} + \dots + \rho_{(n)}}{n} \quad (5)$$

Dove

$\rho_{(1)}, \rho_{(2)}, \dots, \rho_{(n)}$ misure della resistività apparente [Ωm]
 n numero di misure

1.3.3 Modello del suolo a due strati

In caso di una grande variazione di resistività è meglio considerare un modello a più strati, che più si avvicina al modello reale. Il modello a due strati solitamente rappresenta accuratamente le condizioni effettive. È costituito da uno strato superiore di spessore finito e uno strato inferiore di resistività diversa e spessore infinito. Esistono diverse tecniche per determinare un modello equivalente a due strati del suolo. In alcuni casi è sufficiente un'ispezione visiva del grafico resistività apparente rispetto alla spaziatura delle sonde nel caso di misurazione col metodo Wenner a quattro pin, dato che, come visto sopra, la spaziatura è proporzionale alla profondità del relativo valore di resistività. Nella normativa IEEE Std 80-2013 [1] è descritto un metodo grafico per individuare i valori di resistività e spessore del modello a due strati. Esistono inoltre software commerciali per ricavare il modello a due o più strati del suolo.

2 Progettazione della rete di terra

Il sistema di messa a terra della sottostazione deve essere dimensionato e installato in modo tale che durante un guasto all'impianto elettrico, venga eliminato ogni pericolo per la vita, la salute e per le apparecchiature all'interno e al di fuori dell'impianto. Il sistema di messa a terra deve essere costruito per soddisfare quanto segue, e si applica a tutti i livelli di tensione [5]:

- Garantire la sicurezza del personale contro pericolose tensioni di contatto, incluso il massimo guasto a terra;
- Prevenire danni a proprietà e installazioni;
- Essere dimensionato per resistere alla corrosione e alle sollecitazioni meccaniche durante l'intero ciclo di vita;
- Essere dimensionato per resistere allo stress termico delle correnti di guasto.

Per questo scopo sono state fornite delle normative che guidano ad una corretta progettazione del sistema di terra. In questa tesi viene preso come riferimento lo standard IEEE Std 80-2013 Guide for Safety in AC Substation Grounding [3], inoltre il software commerciale XGSLab, utilizzato per le simulazioni, include tali standard.

2.1 IEEE Std 80-2013

Questo standard è applicabile per sottostazioni AC esterne isolate in aria o in gas. Include le sottostazioni degli impianti di distribuzione, trasmissione e generazione ed è applicabile anche alle porzioni interne di tali sottostazioni, o sottostazioni che sono interamente al chiuso.

I due principali obiettivi di progettazione che devono essere raggiunti da qualsiasi sistema di terra di una sottostazione in condizioni normali e di guasto sono:

- Fornire mezzi per dissipare le correnti elettriche nel terreno senza eccedere gli eventuali limiti delle apparecchiature.
- Garantire che una persona in prossimità di impianti con messa a terra non sia esposta a pericolose tensioni di contatto e di passo.

I seguenti parametri dipendenti dal sito e dall'impianto, hanno un impatto sostanziale sulla progettazione della rete: massima corrente I_G , durata del guasto t_f , durata dello shock t_s , resistività del suolo ρ , resistività del materiale superficiale ρ_s e la geometria della griglia.

2.1.1 Massima corrente I_G

Nella maggior parte dei casi, il più grande valore di corrente è anche responsabile della condizione più pericolosa. I passaggi da seguire per la determinazione della massima corrente I_G sono:

- Valutare il tipo e l'ubicazione dei guasti verso terra che probabilmente produrranno una maggiore corrente;
- Determinare il fattore di divisione S_f e stabilire i corrispondenti valori di corrente di rete simmetrica I_g ;
- Determinare il valore del fattore di decremento D_f che considera gli effetti dell'asimmetria, e calcolare quindi la massima corrente di guasto;
- Considerare gli aumenti futuri della corrente di guasto.

Nel sistema possono verificarsi molti tipi diversi di guasto. In Figura 6, Figura 7, Figura 8 e Figura 9 vengono mostrate le correnti di guasto per diverse configurazioni di sistema. Dato che la probabilità di guasti simultanei è molto bassa, si consiglia di considerare il guasto fase-terra e guasto bifase-terra.

Nel caso di guasto bifase-terra la corrente alla sequenza zero è

$$I_0 = \frac{E Z_2}{Z_1(Z_0 + Z_2 + 3R_f) + Z_2(Z_0 + 3R_f)} \quad (6)$$

Dove

- I_0 è il valore rms della corrente di guasto alla sequenza zero [A]
- E è la tensione fase-neutro [V]
- R_f è la resistenza di guasto [Ω]
- Z_1 è l'impedenza alla sequenza diretta [Ω]
- Z_2 è l'impedenza alla sequenza inversa [Ω]
- Z_0 è l'impedenza alla sequenza omopolare [Ω]

Nel caso di guasto monofase la corrente di guasto è

$$I_0 = \frac{E}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3R_f} \quad (7)$$

In molti casi il termine resistivo dell'equazione (6) e (7) è trascurabile. Considerando solo la reattanza si ottiene, per il guasto bifase terra:

$$I_0 = \frac{E X_2}{X_1(X_0 + X_2) + X_2 X_0} \quad (8)$$

Mentre per il guasto monofase:

$$I_0 = \frac{E}{X_1 + X_2 + X_0} \quad (9)$$

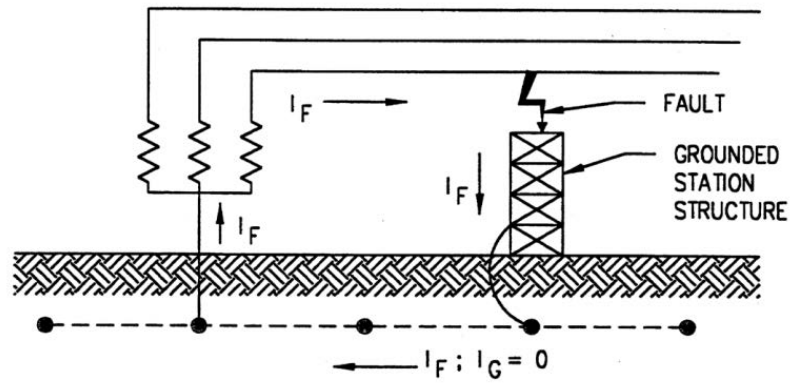


Figura 6: Guasto all'interno della sottostazione; messa a terra locale del neutro

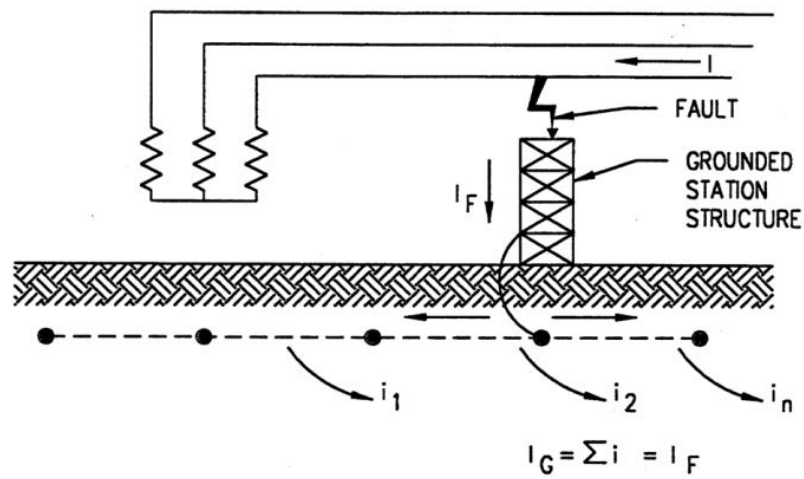


Figura 7: Guasto all'interno della sottostazione; neutro con messa a terra

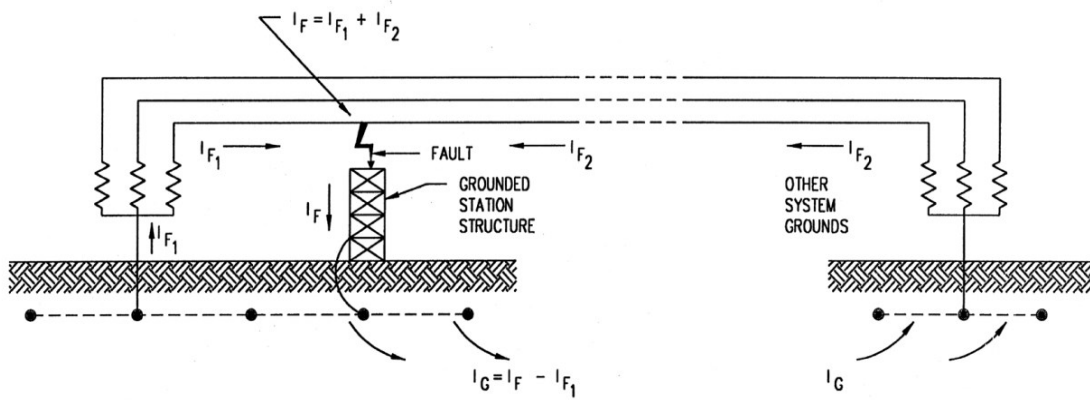


Figura 8: Guasto nella sottostazione; sistema collegato a terra nella sottostazione

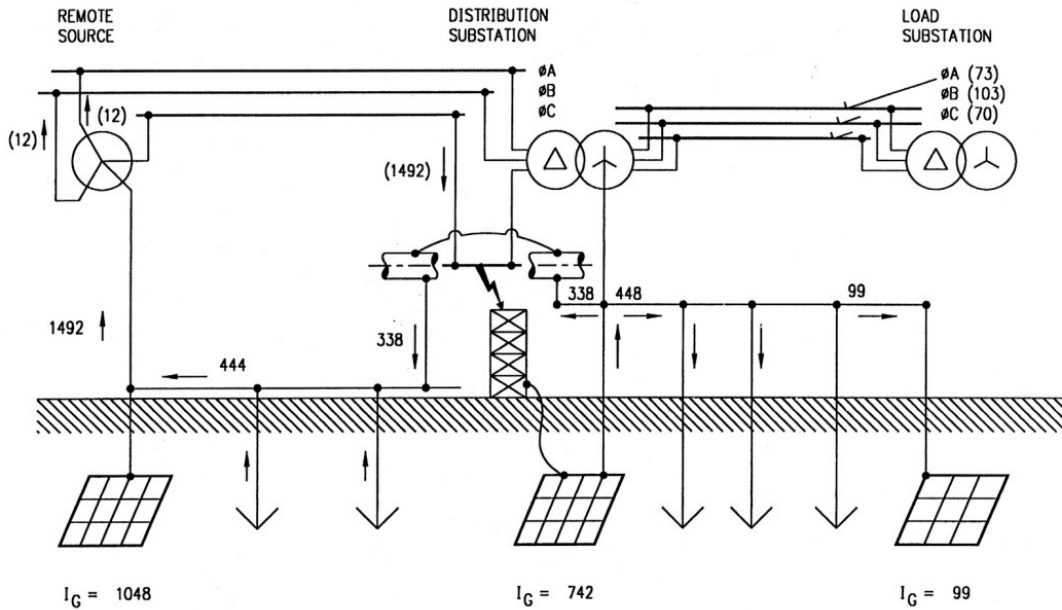


Figura 9: Tipica divisione della corrente per un guasto sul lato alta della

Fattore di riduzione della corrente S_f

Il calcolo del fattore di riduzione della corrente S_f deriva da una rappresentazione equivalente delle funi di guardai delle linee aeree, neutri, ecc., collegati alla rete e risolvendo il sistema per determinare quale frazione della corrente totale di guasto fluisce a terra e quale attraverso i fili di terra o neutri.

S_f dipende da molti parametri, alcuni dei quali sono:

- Localizzazione del guasto;
- Entità dell'impedenza della rete di terra della sottostazione;
- Tubi e cavi interrati in prossimità o direttamente collegati all'impianto di terra della sottostazione;
- Conduttori di terra aerei, neutri o altri percorsi di ritorno a terra.

A causa di S_f , la corrente di griglia simmetrica I_g , e quindi anche I_G , sono strettamente correlate alla posizione del guasto. Se i percorsi di terra aggiuntivi degli elementi c) e d) sopra indicati vengono trascurati, l'attuale rapporto di divisione (basato su contributi di corrente remota rispetto a quello locale) può essere calcolato utilizzando le componenti simmetriche tradizionali. Tuttavia, la corrente I_g , calcolata utilizzando un tale metodo, potrebbe essere eccessivamente conservativa.

$$S_f = \frac{Z_{eq}}{Z_{eq} + R_g} \quad (10)$$

Dove Z_{eq} è l'impedenza equivalente vista dal guasto compreso il contributo di conduttori di terra aerei, neutri, tubi e cavi interrati, mentre trascurando quest'ultimi, è data dalla somma delle impedenze alle sequenze. R_g è la resistenza della maglia di terra della sottostazione.

La corrente di guasto simmetrica può essere quindi espressa da:

$$I_g = S_f * (3I_0) \quad (11)$$

Effetto dell'asimmetria

Nel progetto di una rete di terra si deve considerare la corrente asimmetrica. Va considerato quindi un fattore di decremento D_f , per tenere conto dell'effetto dell'offset della corrente continua. In generale, la corrente di guasto asimmetrica include i componenti ac subtransitorio, transitorio e stazionario e la componente di offset dc. Sia la componente ac subtransitoria, transitoria e l'offset dc decadono in modo esponenziale ciascuna con una costante di attenuazione diversa. Il valore efficace della corrente asimmetrica approssimativa per l'intera durata di un guasto sarà quindi:

$$I_G = D_f * I_g \quad (12)$$

Dove il fattore di decremento è dato da:

$$D_f = \sqrt{1 + \frac{T_a}{t_f} \left(1 - e^{-\frac{2t_f}{T_a}}\right)} \quad (13)$$

$$T_a = \frac{X}{2\pi f * R}$$

Dove

- t_f è la durata del guasto [s]
- X/R è il parametro caratteristico del sistema nella posizione del guasto. Si devono considerare le componenti dell'impedenza di guasto subtransitoria.

La durata del guasto t_f e la durata dello shock t_s sono normalmente considerate uguali. La selezione di t_f dovrebbe riflettere il tempo di cancellazione del guasto, veloce per le sottostazioni di trasmissione e lento per sottostazioni di distribuzione e industriali. I valori tipici per t_f e t_s variano da 0,25 s a 1,0 s.

2.1.2 Sezione del conduttore

La scelta del materiale conduttore influisce sull'integrità e sulla durata di vita del sistema di messa a terra, che può essere di molti anni se le dimensioni sono adeguate e le condizioni del suolo non sono corrosive per il materiale. Nella valutazione del materiale del conduttore, delle dimensioni e

del limite massimo di temperatura, la scelta finale dovrebbe sempre riflettere le considerazioni delineate sotto:

- Avere una conduttività sufficiente da non contribuire in modo sostanziale alle differenze di tensione locali;
- Resistere alla fusione e al deterioramento meccanico nella condizione più sfavorevole di ampiezza e durata massima del guasto;
- Essere meccanicamente affidabile e robusto;
- Essere in grado di mantenere la sua funzione anche se esposto a corrosione o abuso fisico.

Nella Tabella 2 sono riportate le costanti dei materiali tipicamente usati negli impianti di terra.

Tabella 2: Costanti dei materiali

Description	Material ^a conductivity (% IACS)	α_r factor ^a at 20 °C (1/°C)	K_0 at 0 °C (°C)	Fusing ^a temperature T_m (°C)	Resistivity ^a at 20 °C ρ_r ($\mu\Omega\cdot\text{cm}$)	Thermal ^a capacity $TCAP$ [$\text{J}/(\text{cm}^3 \cdot ^\circ\text{C})$]
Copper, annealed soft-drawn	100.0	0.003 93	234	1083	1.72	3.4
Copper, commercial hard-drawn	97.0	0.003 81	242	1084	1.78	3.4
Copper-clad steel wire	40.0	0.003 78	245	1084 ^e	4.40	3.8
Copper-clad steel wire	30.0	0.003 78	245	1084 ^e	5.86	3.8
Copper-clad steel rod	17.0	0.003 78	245	1084 ^e	10.1	3.8
Aluminum-clad steel wire	20.3	0.00360	258	657	8.48	3.561
Steel, 1020	10.8 ^b	0.003 77	245	1510	15.90	3.8
Stainless-clad steel rod ^c	9.8	0.003 77	245	1400 ^e	17.50	4.4
Zinc-coated steel rod	8.6	0.003 20	293	419 ^e	20.10	3.9
Stainless steel, 304	2.4	0.001 30	749	1400	72.00	4.0

^aMaterial constants for copper, steel, stainless steel, and zinc are from *The Metals Handbook* by the American Society for Metals.

^bCopper-clad steel rods based on nominal 5/8 in rod, 0.010 in soft-drawn copper thickness over No. 1020 steel.

^cStainless-clad steel rod based on nominal 5/8 in rod, 0.020 in No. 304 stainless steel thickness over No. 1020 steel core.

^dUnlike most metals, steel has a highly variable heat capacity from 550 °C to 800 °C; however since the heat capacity in this range is much larger than at lower and higher temperatures, calculations using lower values are conservative with respect to conductor heating.

^eBi-metallic materials fusing temperature based on metal with lower fusing temperature.

Per calcolare la minima sezione che deve avere il conduttore si terra si utilizza l'equazione (14), che tiene conto della corrente e durata del guasto, della temperatura ambiente e le costanti del materiale.

$$A = \frac{I_g}{\sqrt{\left(\frac{TCAP * 10^{-4}}{t_c \alpha_r \rho_r}\right) \ln\left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a}\right)}} \quad (14)$$

Dove

A	è la sezione del conduttore [mm ²]
$TCAP$	è la capacità termica per unità di volume [J/(cm ³ ·°C)]
t_c	è la durata del guasto [s]
α_r	è il coefficiente termico di resistività [1/°C]
ρ_r	è la resistività del materiale a 20°C [$\mu\Omega\cdot\text{cm}$]
K_0	$(1/\alpha_r) - T_r$ [°C]
T_r	è la temperatura di riferimento per le costanti del materiale [°C]
T_m	è la massima temperatura consentita [°C]
T_a	è la temperatura ambiente [°C]

2.1.3 Resistività del materiale superficiale ρ_s

Spesso per aumentare la resistenza di contatto tra suolo e i piedi delle persone nelle sottostazioni, viene utilizzato uno strato di materiale superficiale di spessore variabile attorno ai 0,10 m, come la ghiaia, con una resistività superiore a quella del suolo. In questo modo la corrente che attraversa il corpo sarà notevolmente ridotta a causa di una resistenza maggiore tra terra e piedi. La riduzione dipende dai valori relativi di resistività del terreno e del materiale superficiale, e dallo spessore del materiale superficiale.

L'effetto di questa riduzione va ad incidere sul calcolo delle tensioni di contatto e di passo massime ammissibili. Il fattore di riduzione relativo al materiale superficiale C_s , è calcolato come:

$$C_s = 1 - \frac{\left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)}{2h_s + 0,09} \quad (15)$$

Dove

ρ	è la resistività del suolo [$\Omega\cdot\text{m}$]
ρ_s	è la resistività del materiale superficiale [$\Omega\cdot\text{m}$]
h_s	è lo spessore del materiale superficiale [m]

I valori di resistività dello strato superficiale dipendono da molti fattori, come il tipo di pietra, dimensioni, condizioni della pietra (pulita o sporca), contenuto di umidità, contaminazione atmosferica. La Tabella 3 indica la resistività dei materiali più utilizzati, nella condizione asciutta e bagnata, infatti la presenza di acqua ha una notevole influenza sulla resistività misurata dello strato di materiale superficiale.

Tabella 3: Resistività tipiche dei materiali superficiali

Number	Description of surface material (U.S. state where found)	Resistivity of sample, $\Omega\text{-m}$	
		Dry	Wet
1	Crusher run granite with fines (NC)	140×10^6	1300 (ground water, 45 $\Omega\text{-m}$)
2	1½ in (0.04 m) crusher run granite (GA) with fines	4000	1200 (rain water, 100 $\Omega\text{-m}$)
3	¾ in to 1 in (0.02 m to 0.025 m) granite (CA) with fines	---	6513 (10 minutes after 45 $\Omega\text{-m}$ water drained)
4	No. 4 (1 in to 2 in) (0.025 m to 0.05 m) washed granite (GA)	1.5×10^6 to 4.5×10^6	5000 (rain water, 100 $\Omega\text{-m}$)
5	No. 3 (2 in to 4 in) (0.05 m to 0.1 m) washed granite (GA)	2.6×10^6 to 3×10^6	10 000 (rain water, 100 $\Omega\text{-m}$)
6	Size unknown, washed limestone (MI)	7×10^6	2000 to 3000 (ground water, 45 $\Omega\text{-m}$)
7	Washed granite, similar to ¾ in (0.02 m) gravel	2×10^6	10 000
8	Washed granite, similar to pea gravel	40×10^6	5000
9	No. 57 (¾ in) (0.02 m) washed granite (NC)	190×10^6	8000 (ground water, 45 $\Omega\text{-m}$)
10	Asphalt	2×10^6 to 30×10^6	10 000 to 6×10^6
11	Concrete	1×10^6 to 1×10^9 ^a	21 to 200

2.1.4 Geometria della rete di terra

Nelle sottostazioni la rete di terra solitamente è costituita da una griglia di conduttori interrati orizzontalmente, integrati da una serie di picchetti verticali collegati alla rete.

Alcuni dei motivi per utilizzare il sistema combinato di aste verticali e conduttori orizzontali sono:

- I conduttori orizzontali sono più efficaci nel ridurre il pericolo di alte tensioni di contatto e di passo sulla superficie, a condizione che la rete sia installata a una profondità ridotta (di solito da 0,3 m a 0,5 m). I picchetti di terra sufficientemente lunghi servono per stabilizzare le prestazioni di un tale sistema combinato. Per molte installazioni questo è importante perché il congelamento o l'essiccazione degli strati superiori del suolo potrebbe variare la resistività con stagioni, mentre la resistività degli strati inferiori rimane pressoché costante.
- Le aste che penetrano nel terreno a bassa resistività sono molto più efficaci nel dissipare le correnti di guasto ogni volta che si incontra un terreno a due strati o multistrato dove lo strato superiore ha resistività più alta rispetto agli strati inferiori. Per molte GIS (Gas Insulated Substation) e altre installazioni con spazio limitato, questa condizione diventa

infatti quella più desiderata o da raggiungere con mezzi di progettazione appropriati (picchetti di terra extra lunghi, pozzi di messa a terra, ecc.).

- Se le aste sono installate prevalentemente lungo il perimetro della griglia in terreno multistrato o uniforme, le aste moderano considerevolmente il forte aumento del gradiente superficiale vicino le maglie periferiche.

In generale, la maggior parte dei sistemi di messa a terra utilizza due gruppi di elettrodi di terra. Gli elettrodi di terra primari sono progettati specificamente per scopi di messa a terra (rete di terra). Gli elettrodi di terra ausiliari sono elettrodi che comprendono varie strutture metalliche sotterranee installate per scopi diversi dalla messa a terra (ferri di armatura, strutture metalliche sotterranee).

La progettazione di un sistema a griglia inizia solitamente con l'ispezione della planimetria della sottostazione, che mostra tutte le principali attrezzature e strutture. I seguenti punti possono servire come linee guida per iniziare un tipico progetto di griglia di terra:

- Un anello conduttore continuo dovrebbe circondare il perimetro per racchiudere quanta più area possibile. Questa misura aiuta ad evitare un'elevata concentrazione di corrente e, quindi, alti gradienti sia nell'area della griglia che vicino alle estremità sporgenti dei cavi. Inoltre racchiudere più area possibile riduce anche la resistenza della rete di terra.
- All'interno dell'anello, i conduttori sono generalmente disposti in linee parallele e, dove possibile, lungo le strutture o file di apparecchiature per fornire brevi collegamenti a terra.
- Un tipico sistema di rete per una sottostazione può includere conduttori in rame nudi 4/0 interrati da 0,3 m a 0,5 m, ad una distanza da 3 m a 7 m. Nei collegamenti incrociati, i conduttori dovrebbero essere saldamente legati insieme. Le aste di terra possono essere agli angoli della griglia e nei punti di giunzione lungo il perimetro, possono anche essere installate sulle principali apparecchiature, in particolare vicino agli scaricatori di sovratensione. In terreni multistrato o ad alta resistività, potrebbe essere utile utilizzare aste più lunghe o aste installate in punti di giunzione aggiuntivi.
- Questo sistema a griglia si estende sull'intero piazzale della sottostazione e spesso oltre la linea di recinzione. Dove possono verificarsi alte concentrazioni di corrente, ad esempio in un collegamento neutro-terra di generatori, banchi di condensatori o trasformatori, si utilizzano più conduttori di terra o conduttori di dimensioni maggiori.

I parametri della rete di terra che hanno un maggiore impatto sulla tensione di maglia sono l'area totale, la spaziatura dei conduttori e la profondità della rete. I parametri come il diametro del conduttore e lo spessore del materiale di rivestimento hanno un impatto minore. In generale, le limitazioni sui parametri fisici di una rete di terra si basano su aspetti economici e limitazioni fisiche dell'installazione della rete. Il limite economico è evidente, non è pratico installare un sistema di messa a terra con piastra in rame. Inoltre lo scavo delle trincee in cui è posato il materiale conduttore limita la distanza tra i conduttori a circa 2 m o più e le distanze tipiche dei conduttori vanno da 3 m a 15 m, mentre le profondità tipiche della griglia vanno da 0,5 m a 1,5 m.

2.1.5 Resistenza di terra

Per il calcolo della resistenza di terra della sottostazione devo conoscere la resistività del terreno, ricavata con uno dei metodi di misura presentati nel paragrafo 1.3.1, l'area occupata e la geometria della rete di terra. La resistenza dipende principalmente dall'area occupata dal sistema di messa a terra, che di solito è nota nella fase iniziale di progettazione. In prima approssimazione, il valore minimo della resistenza del sistema di messa a terra della sottostazione in un terreno uniforme può essere stimato mediante la formula di una piastra metallica circolare a profondità zero.

$$R_g = \frac{\rho}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A}} \quad (16)$$

Dove

R_g è la resistenza di terra della sottostazione [Ω]
 ρ è la resistività del suolo [Ωm]
 A è l'area occupata dalla rete di terra [m^2]

Il limite superiore della resistenza di terra si ottiene aggiungendo all'equazione (16) un secondo termine:

$$R_g = \frac{\rho}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A}} + \frac{\rho}{L_T} \quad (17)$$

Dove

L_T è la lunghezza totale dei conduttori interrati [m]

Nel caso di una combinazione di picchetti e rete in un terreno uniforme, una lunghezza combinata di conduttori orizzontali e picchetti di terra produrranno una stima leggermente conservativa di L_T , perché le aste di terra di solito sono più efficaci per unità di lunghezza.

Una modifica dell'equazione (17) che tiene conto della profondità della griglia è

$$R_g = \rho \left[\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{20/A}} \right) \right] \quad (18)$$

Dove

h è la profondità della rete di terra [m]

Equazioni di Schwarz

Un altro metodo per calcolare la resistenza di terra delle sottostazioni è stato proposto da Schwarz che ha sviluppato la seguente serie di equazioni valide per un sistema di messa a terra in un terreno omogeneo costituito da elettrodi orizzontali (griglia) e verticali (barre).

$$R_g = \frac{R_1 R_2 - R_m^2}{R_1 + R_2 - 2R_m} \quad (19)$$

Dove

- R_1 è la resistenza dei conduttori [Ω]
- R_2 è la resistenza dei picchetti [Ω]
- R_m è la mutua resistenza tra i conduttori e picchetti [Ω]

$$R_1 = \frac{\rho}{\pi L_C} \left[\ln \left(\frac{2L_C}{a'} \right) + \frac{k_1 * L_C}{\sqrt{A}} - k_2 \right] \quad (20)$$

$$R_2 = \frac{\rho}{2\pi n_R L_r} \left[\ln \left(\frac{4L_r}{b} \right) - 1 + \frac{2k_1 * L_r}{\sqrt{A}} (\sqrt{n_R} - 1)^2 \right] \quad (21)$$

$$R_m = \frac{\rho}{\pi L_C} \left[\ln \left(\frac{2L_C}{L_r} \right) + \frac{k_1 * L_C}{\sqrt{A}} - k_2 + 1 \right] \quad (22)$$

Dove

- L_C è la lunghezza totale dei conduttori della rete [m]
- L_r è la lunghezza di ogni picchetto [m]
- a' è $\sqrt{a * 2h}$ per i conduttori interrati ad una profondità h
- a è il raggio dei conduttori [m]
- k_1, k_2 sono dei coefficienti geometrici
- b è il raggio dei picchetti [m]
- n_R è il numero dei picchetti

I coefficienti geometrici dipendono dalla profondità di interramento h :

Per profondità $h = 0$

$$\begin{aligned} k_1 &= -\frac{0,04 * L}{W} + 1,41 \\ k_2 &= \frac{0,15 * L}{W} + 5,50 \end{aligned} \quad (23)$$

Per profondità $h = 1/10 \sqrt{A}$

$$\begin{aligned}k_1 &= -\frac{0,05 * L}{W} + 1,20 \\k_2 &= \frac{0,10 * L}{W} + 4,68\end{aligned}\tag{24}$$

Per profondità $h = 1/10 \sqrt{A}$

$$\begin{aligned}k_1 &= -\frac{0,05 * L}{W} + 1,13 \\k_2 &= \frac{0,05 * L}{W} + 4,40\end{aligned}\tag{25}$$

Dove L e W sono rispettivamente la lunghezza e la larghezza massime della rete di terra.

Metodi per ridurre la resistenza

Spesso è impossibile ottenere la riduzione desiderata della resistenza di terra aggiungendo più conduttori alla rete o più picchetti di terra. Una soluzione alternativa è quella di modificare la resistività del terreno attorno all'elettrodo. È sufficiente agire sul terreno circostante all'elettrodo perché è quello che influenza maggiormente la resistenza di terra. Alcuni di questi metodi prevedono:

- Uso di cloruro di sodio, magnesio e solfati di rame, o cloruro di calcio, per aumentare la conduttività del terreno che circonda un elettrodo;
- Uso della bentonite, un'argilla naturale che si è formata da azioni vulcaniche anni fa. Non è corrosiva, è stabile e ha una resistività di 2,5 Ω -m a 300% di umidità. A causa della sua natura idroscopica, agisce come un agente essiccante che attira l'umidità disponibile dall'ambiente circostante. La bentonite ha bisogno di acqua per ottenere e mantenere le sue caratteristiche benefiche. Il suo contenuto di umidità iniziale si ottiene al momento dell'installazione quando viene preparato il liquame. Una volta installata, la bentonite fa affidamento sulla presenza di umidità del terreno per mantenere le sue caratteristiche. La maggior parte dei terreni ha un'umidità del suolo sufficiente così che l'essiccazione non sia un problema. Potrebbe non funzionare bene in un ambiente molto secco, perché potrebbe ritirarsi dall'elettrodo, aumentando la resistenza;
- Uso di elettrodi di tipo chimico, costituiti da un tubo di rame riempito con un sale. I fori nel tubo consentono all'umidità di entrare, sciogliere i sali e consentire alla soluzione salina di filtrare nel terreno;
- Uso di materiali con una resistività inferiore a 0,12 Ω -m (circa il 5% della resistività della bentonite), vengono tipicamente posizionati intorno ai picchetti o intorno ai conduttori della rete in una trincea. Alcuni di questi materiali di miglioramento sono permanenti e non rilasciano sostanze chimiche nel terreno.

Un altro metodo prevede l'utilizzo del calcestruzzo che, essendo idroscopico, attira l'umidità. Sepolto nel terreno, un blocco di cemento si comporta come un mezzo semiconduttore con una resistività da 30 Ω -m a 200 Ω -m a seconda del livello di umidità. Questo è di particolare interesse nei terreni a media e alta resistenza perché un'asta metallica racchiusa nel calcestruzzo ha una resistenza inferiore rispetto a un elettrodo simile sepolto direttamente nel terreno. Questo rivestimento riduce la resistività della parte più critica del materiale che circonda l'elemento metallico, in modo molto simile ad un trattamento chimico del terreno citato sopra. Tuttavia, questo fenomeno può spesso essere sia un vantaggio che uno svantaggio di progettazione.

Alcuni dei motivi sono i seguenti:

- Da un lato, è difficile costruire fondazioni per strutture in cui l'acciaio interno (barre di rinforzo) non sia elettricamente connesso al metallo della struttura. Anche se si prestasse estrema attenzione al posizionamento dei bulloni di ancoraggio, al fine di prevenire qualsiasi contatto diretto metallo-metallo, la natura semiconduttiva del calcestruzzo fornirebbe un collegamento elettrico.
- D'altra parte, la presenza di una piccola corrente continua può causare la corrosione del materiale dell'armatura. Sebbene la corrente alternata in quanto tale non produca corrosione, circa lo 0,01% della corrente alternata viene raddrizzata all'interfaccia della barra d'acciaio e del calcestruzzo.
- La spaccatura del calcestruzzo può avvenire per il fenomeno di cui sopra, perché l'acciaio corrosivo occupa circa 2,2 volte il suo volume originale, producendo pressioni che si avvicinano a 35 MPa oppure per il passaggio di una corrente molto elevata, che vaporizzerebbe l'umidità nel calcestruzzo.

2.1.6 Limite della tensione di passo e contatto

La sicurezza di una persona dipende dalla quantità critica di energia dello shock assorbito prima che il guasto venga cancellato e il sistema si disecchi. La massima tensione di qualsiasi circuito accidentale non deve superare i limiti definiti come segue. Per la tensione di passo il limite è

$$E_{step} = (R_B + 2R_f)I_B \quad (26)$$

Per un corpo di 50 kg

$$E_{step} = (1000 + 6C_s * \rho_s) \frac{0,116}{\sqrt{t_s}} \quad (27)$$

Per un corpo di 70 kg

$$E_{step} = (1000 + 6C_s * \rho_s) \frac{0,157}{\sqrt{t_s}} \quad (28)$$

Per la tensione di contatto il limite è

$$E_{touch} = \left(R_B + \frac{R_f}{2} \right) I_B \quad (29)$$

Per un corpo di 50 kg

$$E_{touch} = (1000 + 1,5C_s * \rho_s) \frac{0,116}{\sqrt{t_s}} \quad (30)$$

Per un corpo di 70 kg

$$E_{touch} = (1000 + 1,5C_s * \rho_s) \frac{0,157}{\sqrt{t_s}} \quad (31)$$

Se non viene utilizzato uno strato superficiale protettivo, $C_s=1$ e $\rho_s=\rho$, ovvero uguale alla resistività del suolo.

2.1.7 Progettazione

La progettazione di una rete di terra segue un ordine di passaggi rappresentati dallo schema a blocchi di Figura 10. Quanto segue descrive le fasi della procedura:

1. La planimetria generale della sottostazione dovrebbe fornire una buona stima dell'area da mettere a terra. Dalla misura della resistività del suolo, descritta al paragrafo 1.3, si ricava il modello del suolo che più si addice al profilo di resistività misurata.
2. La dimensione dei conduttori è determinata come descritto nel paragrafo 2.1.2. La corrente di guasto dovrebbe essere la massima corrente futura attendibile che fluisce nei conduttori per il tempo t_c , il massimo tempo di eliminazione guasto.
3. I limiti di tensione di passo e di contatto sono ricavati dalle equazioni del paragrafo 2.1.6.
4. Il progetto preliminare dovrebbe includere un anello di conduttori che circonda l'intera area di messa a terra, oltre a conduttori trasversali per fornire un comodo accesso alle apparecchiature da collegare a terra.
5. È possibile effettuare una stima della resistenza preliminare del sistema di messa a terra in un terreno uniforme utilizzando le equazioni fornite in 2.1.5.
6. La corrente I_G è determinata dalle equazioni fornite nel paragrafo 2.1.1. per evitare il sovradimensionamento della rete di terra, dovrebbe essere utilizzata solo la corrente che fluisce attraverso la rete alla terra remota.

7. Se il GPR calcolato del progetto preliminare è inferiore alla tensione di contatto tollerabile, non sono necessarie altre analisi. Sono solo richiesti i conduttori aggiuntivi per mettere a terra le apparecchiature.
8. Il calcolo della tensione di magli e della tensione di passo si calcolano con le equazioni del paragrafo 2.1.8 per un terreno uniforme. È possibile utilizzare anche tecniche più accurate di analisi con computer.
9. Se la tensione di maglia calcolata è inferiore della tensione di contatto tollerabile, il progetto può essere completato (vedere il passaggio 10). Se invece la tensione di maglia è maggiore della tensione di contatto tollerabile, deve essere rivisto il progetto preliminare (vedere il passaggio 11).
10. Se entrambe le tensioni di maglia e di passo calcolate sono inferiori alle tensioni tollerabili, il progetto necessita solo delle rifiniture richieste per consentire l'accesso alla rete delle apparecchiature da mettere a terra. In caso contrario, il progetto preliminare deve essere rivisto (vedere il passaggio 11).
11. Se vengono superati i limiti della tensione di passo o di maglia, è necessaria la revisione del progetto della griglia. Queste revisioni possono includere distanze tra i conduttori più piccole, picchetti di terra aggiuntivi, ecc.
12. Dopo aver soddisfatto i requisiti di tensione di passo e maglia, potrebbero essere richiesti conduttori e picchetti aggiuntivi. I conduttori di rete aggiuntivi possono essere necessari se il progetto della griglia non include conduttori vicino alle apparecchiature da mettere a terra. I picchetti aggiuntivi potrebbero essere necessari alla base di scaricatori di sovratensioni, ai neutri dei trasformatori, ecc. Anche il progetto finale deve subire una revisione per eliminare pericoli dovuti al potenziale trasferito e pericoli associati a speciali aree di interesse.

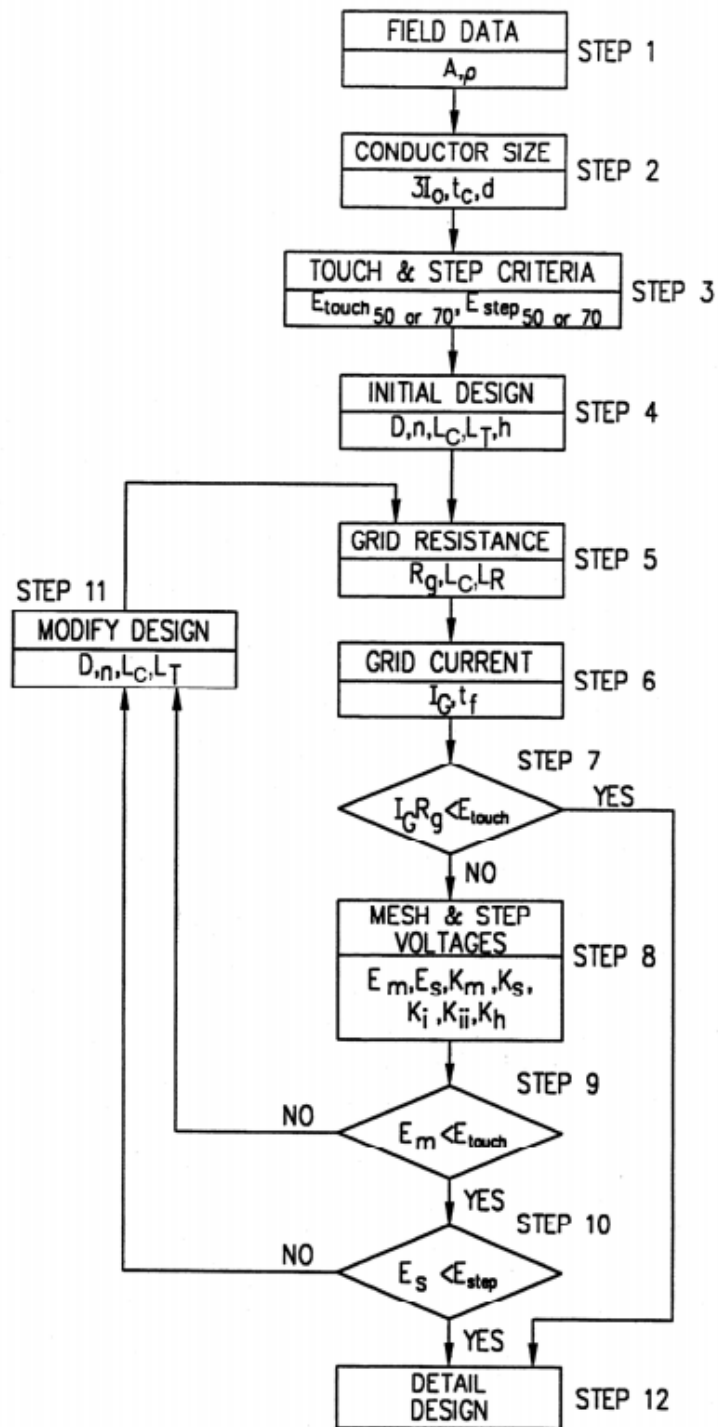


Figura 10: Schema a blocchi delle fasi di progetto

2.1.8 Calcolo della massima tensione di maglia e di passo

La tensione di maglia è la massima tensione di contatto che si può verificare all'interno dell'area di messa a terra. I valori della tensione di maglia sono ottenuti come prodotto del fattore geometrico K_m ; un fattore correttivo K_i , che tiene conto di alcuni errori introdotti dalle ipotesi fatte nel derivare K_m ; la resistività del suolo ρ ; e la corrente media per unità di lunghezza dei conduttori interrati del sistema di messa a terra (I_G/L_M).

$$E_m = \frac{\rho * K_m * K_i * I_G}{L_M} \quad (32)$$

Il fattore geometrico K_m si calcola come:

$$K_m = \frac{1}{2 * \pi} \left\{ \ln \left[\frac{D^2}{16 * h * d} + \frac{(D + 2 + h)^2}{8 * D * d} - \frac{h}{4 * d} \right] + \frac{K_{ii}}{K_h} * \ln \left[\frac{8}{\pi(2 * n - 1)} \right] \right\} \quad (33)$$

Dove

- D è lo spazio tra conduttori paralleli [m]
- h è la profondità della rete di terra [m]
- d è il diametro dei conduttori [m]
- K_h è il coefficiente che considera la profondità della rete:

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}} \quad \text{con } h_0 = 1 \text{ m}$$

K_{ii} è il coefficiente che tiene conto della disposizione dei picchetti nella rete:

$K_{ii} = 1$ per reti con picchetti agli angoli, lungo il perimetro o ovunque nell'area della griglia

$K_{ii} = \frac{1}{(2 * n)^{\frac{2}{n}}}$ per reti senza picchetti o solo alcuni non agli angoli o nel perimetro

n è il numero equivalente dei conduttori in parallelo

$$n = n_a * n_b * n_c * n_d$$

$n_a = \frac{2 * L_C}{L_p}$ per qualunque forma della rete

$$n_b = 1$$

$$n_c = 1$$

$$n_d = 1$$

per una forma quadrata della rete
per una forma quadrata e rettangolare della rete
per una forma quadrata e rettangolare ed a L della rete

Altrimenti

$$n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4 * \sqrt{A}}}$$

$$n_c = \left(\frac{L_x * L_y}{A}\right)^{\frac{0,7 * A}{L_x * L_y}}$$

$$n_d = \frac{D_m}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}}$$

L_C è la lunghezza totale dei conduttori orizzontali della rete [m]

L_p è la lunghezza del perimetro della rete [m]

A è l'area della rete [m²]

L_x è la massima lunghezza della rete nella direzione x [m]

L_y è la massima lunghezza della rete nella direzione y [m]

D_m è la massima distanza tra due punti della rete [m]

Il fattore di irregolarità K_i si calcola come:

$$K_i = 0,644 + 0,148 * n \quad (34)$$

Nelle reti senza picchetti di terra o reti con solo pochi picchetti sparsi per tutta la rete, ma nessuno situato negli angoli o lungo il perimetro della griglia, l'effettiva lunghezza interrata, L_M è

$$L_M = L_C + L_R \quad (35)$$

Invece per le reti con picchetti di terra negli angoli, così come lungo il perimetro e su tutta la rete, l'effettiva lunghezza interrata L_M è

$$L_M = L_C + \left[1,55 + 1,22 \left(\frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right) \right] L_R \quad (36)$$

Dove

L_R è la lunghezza totale dei picchetti di terra [m]

L_r è la lunghezza di un singolo picchetto di terra [m]

I valori della tensione di passo sono ottenuti come prodotto del fattore geometrico K_s , il fattore correttivo K_i , la resistività del suolo ρ , la corrente media per unità di lunghezza dei conduttori interrati del sistema di messa a terra (I_G/L_s).

$$E_S = \frac{\rho * K_S * K_i * I_G}{L_S} \quad (37)$$

Per le reti con o senza picchetti di terra, la lunghezza effettiva del conduttore interrato L_S , è

$$L_S = 0,75 * L_C + 0,85 * L_R \quad (38)$$

Si presume che la tensione massima di passo si verifichi su una distanza di 1 m, iniziando ed estendendosi al di fuori del conduttore perimetrale all'angolo bisecante dell'angolo più estremo della griglia. Per la solita profondità di interramento di $0,25 \text{ m} < h < 2,5 \text{ m}$ K_S è

$$K_S = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2 * h} + \frac{1}{D + h} + \frac{1}{D} (1 - 0,5^{n-2}) \right] \quad (39)$$

2.1.9 Revisione del progetto preliminare

Se le tensioni di passo o di contatto superano i livelli limiti all'interno della sottostazione, si devono adottare delle soluzioni per ridurre queste differenze di potenziale. Alcune di queste sono riportate in seguito:

- a) *Diminuire la resistenza totale della rete:* una diminuzione della resistenza totale della rete diminuirà il GPR massimo e, quindi, la tensione massima trasferita. Il modo più efficace per diminuire la resistenza della griglia di terra è aumentando l'area occupata dalla griglia. Possono essere utilizzati picchetti o pozzi profondi se l'area disponibile è limitata e i picchetti penetrano negli strati di resistività inferiore.
- b) *Spaziature della griglia più ravvicinate:* utilizzando una distanza più ravvicinata dei conduttori della griglia, i potenziali pericolosi all'interno della sottostazione possono essere quindi eliminati. Il problema al perimetro può essere più difficile, specialmente per piccole sottostazioni dove la resistività è alta. Tuttavia, di solito è sufficiente seppellire l'anello più esterno al di fuori della linea di recinzione. Oppure aumentare la densità dei picchetti di terra sul perimetro e diminuire la densità verso il centro della griglia. Un altro approccio è quello di seppellire due o più conduttori paralleli attorno al perimetro a profondità successivamente maggiore. Oppure ancora, variare la spaziatura dei conduttori di rete con conduttori più vicini al perimetro della rete.
- c) *Devviare una parte maggiore della corrente di guasto verso altri percorsi:* Collegando i fili di terra aerei delle linee di trasmissione o diminuendo le resistenze del basamento dei tralicci in prossimità della sottostazione, parte della corrente di guasto verrà deviata dalla rete.
- d) *Limitazione della corrente di guasto totale:* se possibile, la limitazione della corrente di guasto totale ridurrà il GPR e tutti i gradienti in proporzione. Altri fattori, tuttavia, di solito lo rendono impraticabile.

- e) *Blocco dell'accesso ad aree limitate*: il blocco dell'accesso ad alcune aree, ove possibile, ridurrà la probabilità di rischi per il personale.
- f) *Aumentare le tensioni di tocco e passo tollerabili*: le tensioni di contatto e di passo tollerabili possono essere aumentate riducendo il tempo di cancellazione del guasto, utilizzando un materiale superficiale con una resistività maggiore o aumentare lo spessore del materiale superficiale.

2.2 Simulazioni FEM, XGSLab

In questa tesi viene utilizzato il software XGSLab, sviluppato e commercializzato dalla società SINT Informatica S.r.l. per l'analisi e il dimensionamento degli impianti di terra e l'analisi della resistività del suolo. Il software è basato sul metodo di calcolo agli elementi finiti e consente di analizzare con precisione le prestazioni di un dispersore di una forma qualsiasi. Tiene conto degli standard internazionali (IEC / TS 60479-1: 2018), europei (EN 50522: 2010) e americani (IEEE Std 80-2013). Per l'analisi degli impianti di terra il software è diviso in tre moduli [6]:

- **GSA** si basa su un modello numerico statico PEEC (circuiti equivalenti ad elementi parziali) e sulla condizione equipotenziale degli elettrodi. Può analizzare le prestazioni a bassa frequenza di sistemi di messa a terra composti da molti elettrodi distinti, di qualsiasi forma ma di dimensioni limitate, in un modello di terreno uniforme o multistrato.
- **GSA_FD** è un modulo per il calcolo e la progettazione della rete di terra nel dominio della frequenza, inclusa l'analisi della resistività del suolo. Si basa su un modello numerico PEEC a onda intera e può essere applicato in condizioni generali con sistemi composti da molti elettrodi distinti di qualsiasi forma, dimensione e tipo conduttore (solido, cavo o intrecciato e rivestito o nudo), in un modello di terreno uniforme, multistrato o multizona e in un'ampia gamma di frequenze da DC a circa 100 MHz. Inoltre il modello implementato considera sia auto che mutue impedenze.
- **XGSA_FD** estende il campo di applicazione GSA_FD ai sistemi sopraelevati. Anche XGSA_FD si basa su un modello numerico a onda intera PEEC e può essere applicato in condizioni generali nella stessa gamma di frequenza di GSA_FD. In più a GSA_FD, XGSA_FD può calcolare campi elettromagnetici e interferenze tra sistemi sopra e sotto terra (ad esempio tra linee elettriche e installazioni come condutture, ferrovie o linee di comunicazione).

2.2.1 Limiti di funzionamento

Il diagramma in Figura 11 rappresenta il dominio dell'applicazione dei moduli GSA e GSA_FD. L'area centrale evidenziata indica la normale condizione alla frequenza di rete. Il diagramma è stato ottenuto da un'analisi parametrica utilizzando griglie di rame quadrate ben reticolate,

energizzate con una corrente iniettata in un angolo. I parametri analizzati sono stati la diagonale della griglia “D”, la resistività del suolo e la frequenza.

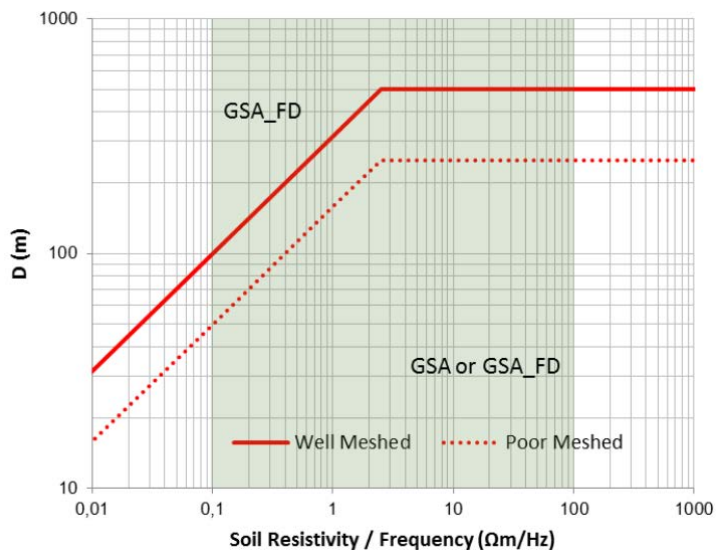


Figura 11: Dominio di applicazione di GSA e GSA_FD

Nel suo dominio applicativo definito dalla linea continua rossa, l'errore commesso da GSA nel calcolo delle tensioni di contatto e GPR è inferiore a circa il 10%. In pratica, in caso di reti ben reticolate, i limiti di applicazione del modulo GSA possono essere definiti in funzione della lunghezza d'onda del campo elettromagnetico nel terreno come segue:

$$\lambda = 3162 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (40)$$

Dove

- λ è la lunghezza d'onda [m]
- ρ è la resistività del suolo [Ωm]
- f è la frequenza [Hz]

Il diagramma precedente indica che GSA può essere utilizzato se " $D < \lambda / 10$ ". GSA richiede anche " $D < 500$ m" come limite ragionevole. I limiti di applicazione saranno inferiori se la forma della griglia non è regolare, se le reti sono sparse e se la griglia è in acciaio o altro metallo ad alta resistività. In tutti questi casi va considerato il limite relativo alle griglie a maglie scadenti come definito dalla linea rossa tratteggiata.

2.2.2 Dati in ingresso

I dati richiesti in ingresso vengono descritti come segue:

- a) *Dati elettrici*: all'inizio del progetto il software chiede la norma di riferimento che verrà utilizzata per calcolare i limiti di tensione di contatto e di passo e per il dimensionamento termico dei dispersori. Successivamente si dovrà inserire la corrente di guasto monofase a terra e il tempo di intervento delle protezioni.
- b) *Dati geometrici*: è richiesta la geometria della rete di terra, indicando i materiali dei conduttori e le loro dimensioni. Il software permette di importare la geometria direttamente dal file .dxf di AutoCAD.
- c) *Dati fisici*: il software richiede i dati di resistività e il modello del suolo. Se non si dispone già di un modello, un software integrato, attraverso le misure di resistività o resistenza condotte col metodo Wenner, fornisce il modello di suolo uniforme, a due o più strati, con la possibilità della multizona per le variazioni orizzontali. Può considerare inoltre la presenza di un materiale superficiale ad altra resistività.

2.2.3 Risultati in uscita

I principali risultati resi disponibili sono i seguenti:

- a) *Layout del sistema disperdente*: il dispersore può essere visualizzato secondo proiezioni ortogonali o nelle tre dimensioni.
- b) *Corrente dispersa*: calcola fattore di riduzione della corrente di guasto a terra (r) secondo le Norme CENELEC, oppure il fattore di decremento (D_f) ed il fattore di riduzione (S_f) secondo le Norme IEEE, calcolando quindi la corrente dispersa.
- c) *Sezione minima*: utilizzando le normative calcola la sezione trasversale dei conduttori, considerando la sollecitazione termica, la corrente di guasto e del tempo di interruzione.
- d) *Tensione di contatto e di passo tollerabili*: in ottemperanza alle Norme CENELEC o IEEE.
- e) *Resistenza di terra*: calcola la resistenza e la tensione totale di terra di ciascun elettrodo del sistema disperdente.
- f) *Densità di corrente dispersa*: calcola la distribuzione della densità di corrente dispersa dalla rete di terra, con la possibilità di una rappresentazione grafica tridimensionale.
- g) *Potenziale di terra*: calcola il GPR su un'area rettangolare selezionata e permette la rappresentazione 2D e 3D.
- h) *Tensione di contatto e di passo*: è possibile calcolare la distribuzione della tensione di contatto e di passo lungo una direttrice, rappresentandole con i rispettivi limiti. Il calcolo si può estendere anche a tutta l'area della rete, e mette in evidenza le zone sicure e quelle pericolose.
- i) *Distribuzione del campo magnetico*: il calcolo può essere effettuato lungo una direttrice o in un'area con rappresentazione 2D e 3D.

3 Caso studio, progetto idroelettrico di Singrobo-Ahouaty

In questo capitolo verrà studiato l'impianto di terra della sottostazione di un impianto idroelettrico in progetto in Costa D'Avorio. Nella prima parte, il dimensionamento della rete di terra verrà fatto seguendo la norma IEEE Std 80-2013. Successivamente la stessa rete sarà dimensionata utilizzando il software agli elementi finiti XGSLab e i risultati verranno confrontati per analizzare potenzialità e vantaggi del software. Nell'ultima parte verranno studiati, utilizzando il software XGSLab, diversi casi al variare della resistività del suolo e quindi modificando la rete di terra e adottando diverse tecniche, individuando l'approccio migliore da utilizzare in modo da raggiungere i livelli di sicurezza richiesti. I casi che verranno studiati sono:

Tabella 4: Senari al variare della resistività del terreno

Scenario 1	Suolo a due strati	$\rho_1 = 1000 \Omega\text{m}$, $h = 2 \text{ m}$, $\rho_2 = 200 \Omega\text{m}$
Scenario 2	Suolo a due strati	$\rho_1 = 200 \Omega\text{m}$, $h = 2 \text{ m}$, $\rho_2 = 1000 \Omega\text{m}$
Scenario 3	Suolo a due strati	$\rho_1 = 500 \Omega\text{m}$, $h = 2 \text{ m}$, $\rho_2 = 100 \Omega\text{m}$
Scenario 4	Suolo uniforme	$\rho = 490 \Omega\text{m}$

3.1 Approccio analitico IEEE Std 80-2013

L'impianto idroelettrico utilizza due unità di generatori sincroni da 27 MVA, 11 kV collegati ognuno ad una turbina Kaplan ad asse orizzontale. La power house è collegata alla sottostazione con due linee da 11 kV attraverso due trasformatori 11/90 kV 28 MVA. La sottostazione è gestita alla tensione di 90 kV, e presenta due linee di trasmissione da 90 kV, una linea a 33 kV e un trasformatore 90/33 kV 24 MAV. È presente inoltre una sezione in bassa tensione a 400 V, con due trasformatori 11/0,4 kV 400 kVA, per l'alimentazione degli ausiliari e delle batterie.

Resistività del suolo

Sul sito dell'impianto sono state prelevate le misure della resistività del suolo con il metodo Wanner a quattro pin, variando la distanza tra i pin. Le misure sono state raccolte in tre punti diversi del sito, lungo la direzione nord-sud ed est-ovest. I dati misurati sono ripostati nella Tabella 5, dove a è la distanza tra i pin, ρ è la resistività apparente misurata, e p è la profondità stimata alla quale è relativo il valore di resistività, calcolata come $p = (3/4)a$.

Tabella 5: Misure della resistività del terreno utilizzando il metodo Wanner

Distanza “a” [m]	ρ [Ωm]	ρ [Ωm]	ρ [Ωm]	ρ [Ωm]	ρ [Ωm]	ρ [Ωm]	Profondità “p” [m]
	P1 – N/S	P1 – E/W	P2 – N/S	P2 – E/W	P3 – N/S	P3 – E/W	
0,7	31,56	28,7	232,89	192,62	1,9	1,41	0,525
1	38,63	40,4	201,94	261,67	1,99	1,68	0,75
1,5	43,64	45,09	224,19	426,69	1,83	1,76	1,125
2,3	58,73	60,44	444,81	514,41	1,86	1,94	1,725
3,5	81,66	100,96	626,73	823,31	2,12	2,22	2,625
5	110,75	149,25	725,6	826,99	2,61	2,62	3,75
7	135,8	178,24	859,74	760,8	3,44	3,44	5,25
10	211,28	198,95	922,29	893,33	4,97	4,96	7,5
15	384,16	211,92	1013,2	1050,6	8,4	7,84	11,25
23	541,51	295,9	981,73	1193,95	16,01	14,1	17,25
35	867,21	732,71	821,32	1345,06	31,8	29,22	26,25
50	936,66	1426,78	697,64	1447,26	56,84	41,46	37,5

Dalle misure raccolte si nota che quelle prelevate nel punto P3 sono molto diverse dalle altre e di dubbia credibilità, probabilmente misurate quando la condizione del terreno era molto umida. Per il punto P3 si considerano quindi solo le misure effettuate con distanza tra i pin a 50 m perché sono relative ad una resistività ad elevata profondità. Le equazioni dello standard IEEE per le reti di terra, si basano su un modello del suolo uniforme. Tale modello si ottiene calcolando la media delle misure di resistività con l’equazione (5). Il modello così ottenuto ha resistività:

$$\rho = 490 \Omega\text{m}$$

Corrente di guasto

La sottostazione è connessa con 2 linee a 90kV ad altre 2 sottostazioni. Dagli studi di rete sono stati ricavate le correnti di cortocircuito massime trifase e monofase, calcolate per gli anni 2021 e 2022. riportate nella Tabella sottostante.

Tabella 6: Correnti di guasto trifase e monofase

Nodo 90 kV	Trifase		Monofase	
Anno	2021	2022	2021	2022
Icc [kA]	5,62	5,65	3,61	3,61
Nodo 33 kV	Trifase		Monofase	
Anno	2021	2022	2021	2022
Icc [kA]	2,83	2,84	0,09	0,09

Per il dimensionamento della rete di terra si deve utilizzare la corrente di guasto verso terra nella situazione peggiore. In questo caso la condizione peggiore è il guasto monofase a 90 kV perché la corrente di guasto si richiude attraverso la rete di terra con i centri stella degli avvolgimenti dei trasformatori, e con la terra remota delle altre due sottostazioni collegate. Le correnti di guasto monofase per i livelli di tensione 11 kV e 33 kV sono limitate mettendo a terra i centri stella degli avvolgimenti, rispettivamente di generatore e trasformatore, con una resistenza elevata. La corrente che verrà utilizzata per i calcoli, con l'ipotesi conservativa di trascurare il fattore di riduzione S_f , sarà quindi:

$$I_G = 3,61 \text{ kA}$$

Sezione dei conduttori

Per il calcolo della sezione minima dei conduttori, le specifiche di progetto forniscono una corrente di guasto di 20 kA e un tempo di estinzione del guasto di 1s. Queste ipotesi sono fatte per avere una sezione del conduttore maggiore in modo da allungare la vita utile dell'intero impianto. Infatti la rete di terra, essendo interrata, è soggetta a fenomeni corrosivi e degradazione. Si utilizzano conduttori in rame, con limite massimo di temperatura a 200°C e temperatura ambiente di 40°C. Con tali specifiche utilizzando l'equazione (14) la sezione minima calcolata è 130,63 mm², la sezione che verrà considerata è:

$$A = 150 \text{ mm}^2$$

Geometria della rete di terra

La sottostazione copre un'area di 125 x 79,2 m, la rete di terra è limitata a tale area con l'aggiunta di un conduttore esterno che circonda il recinto ad una distanza di 1 m. Tale conduttore è necessario per la protezione dalla tensione di contatto in caso di recinto realizzato con materiale conduttore. Ai vertici della griglia sono presenti dei picchetti anche se non contribuiscono alla diminuzione della resistenza di terra, ma danno un contributo per la riduzione della tensione di contatto e passo. Il layout della rete di terra è mostrato in Figura 12, mentre la Tabella 7 mostra le caratteristiche geometriche.

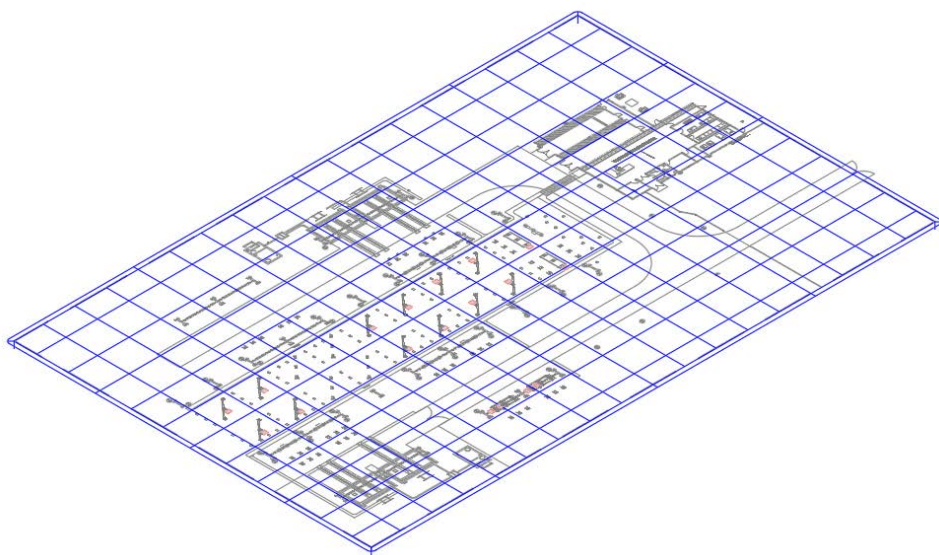


Figura 12: Layout della rete di terra

Tabella 7: Dati caratteristici della rete di terra

Lunghezza	125	m
Larghezza	79,2	m
Perimetro	408,4	m
Distanza tra conduttori	7	m
Distanza conduttore esterno	1	m
Lunghezza totale	3562,2	m
Profondità	1	m
Numero picchetti	4	
Lunghezza picchetti	1,5	m
Raggio picchetti	0,0125	m
Distanza massima	148	m
Area totale	9900	m ²

Resistenza e potenziale di terra

Con i dati della geometria della rete si calcola la resistenza di terra con l'equazione (19) e il *GPR* moltiplicando la resistenza per la massima corrente:

$$R_g = 2,028 \, \Omega$$

$$GPR = 7319,9 \, V$$

Limiti di tensione

Per, ridurre la tensione di contatto e di passo si aggiunge uno strato superficiale di ghiaia (Tabella 3 numero 8), con resistività 5000 Ωm e spessore 0,1 m. Il coefficiente di riduzione C_s calcolato è 0,72. I limiti di tensione calcolati con le equazioni del paragrafo 2.1.6 sono:

$$E_{lim-step70} = 5018,3 \text{ V}$$

$$E_{lim-touch70} = 1421,1 \text{ V}$$

$$E_{lim-step50} = 3707,8 \text{ V}$$

$$E_{lim-touch50} = 1050,0 \text{ V}$$

Le massime tensioni di contatto e di passo all'interno dell'area occupata dalla rete di terra sono calcolate rispettivamente con le equazioni (32) e (37) e risultano:

$$E_m = 999,7 \text{ V}$$

$$E_s = 526,4 \text{ V}$$

Tali tensioni sono minori dei limiti della normativa quindi si può considerare che il dimensionamento della rete di terra sia corretto per la sicurezza dell'area della sottostazione in caso di guasto.

3.2 Approccio con simulazioni FEM

Resistività del suolo

Per lo studio del progetto si utilizza il modulo GSA_FD. Attraverso il modulo integrato SRA si calcola il modello multistrato del suolo con le misure della Tabella 5 e con le stesse considerazioni effettuate con il metodo IEEE. Il calcolo della resistività del suolo è fatto dando più peso alle misure più vicine alla superficie, dato che influenzano maggiormente i valori delle tensioni di contatto e di passo. I risultati in uscita dal programma sono:

Layer	Resistività [Ωm]	h [m]
1	32,98	1,19
2	153,55	∞

Viene considerato, cautelativamente, un modello con valori maggiori. La Figura 13 mostra graficamente i layer e le misure utilizzate.

Layer	Resistività [Ωm]	h [m]
1	40	1,2
2	200	∞

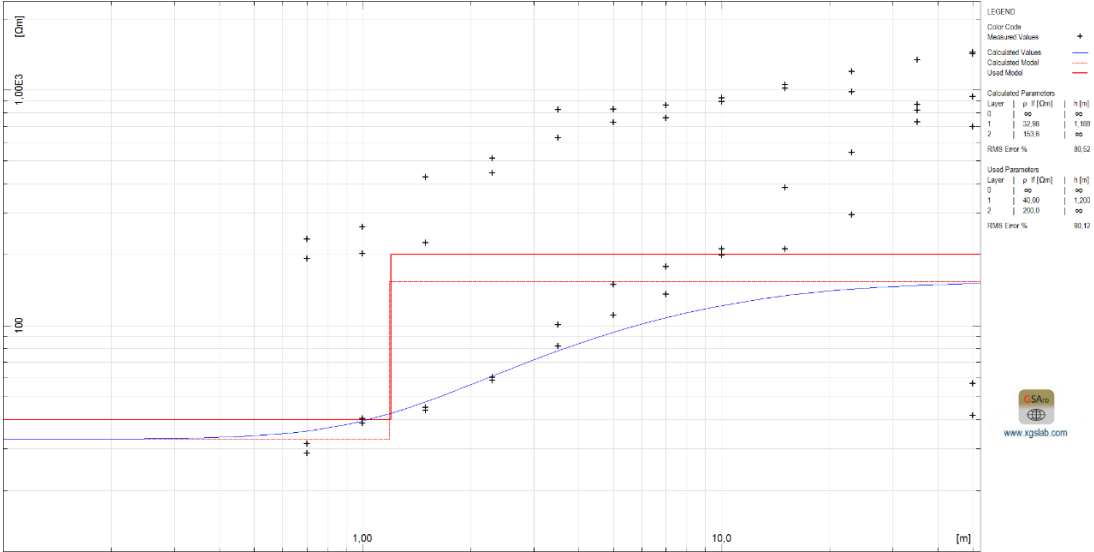


Figura 13: Grafico logaritmico del modello multistrato del suolo (ρ -h)

Un modello del suolo con più di due strati non viene considerato perché si ha un esiguo miglioramento dell'errore relativo e i layer calcolati hanno uno spessore molto piccolo.

Geometria della rete di terra

Il grande vantaggio dell'utilizzo del software, oltre all'utilizzo di un suolo multistrato, è che in questo caso per diminuire la resistenza dell'impianto di terra della sottostazione, posso collegare la rete della sottostazione con l'impianto di terra della power house che si trova a circa 130 m di distanza. La power house contiene le condotte della diga e la sala macchine. Dalle specifiche di terra, la rete di messa a terra non è richiesta al di sotto delle fondamenta degli edifici o delle lastre di cemento con uno spessore superiore a 500 mm, tuttavia deve essere fornito un circuito di messa a terra chiuso sulla circonferenza di tale area. L'impianto di terra della power house comprende quindi:

- Parte dell'armatura in ferro della diga, delle condotte e della sala macchine.
- Un conduttore di rame interrato ad 1 m e distante 1 m dall'edificio, presente solamente nel lato est a causa della diga e del fiume.

Inoltre non è stata presa in considerazione la resistività del calcestruzzo, perché nel tempo il calcestruzzo assorbe l'umidità del suolo, quindi il suo valore di resistività si allinea con quello del terreno che lo circonda. In Figura 14 è rappresentato il layout dell'impianto di terra della power house. I ferri di armatura della diga e della power house sono rappresentati in blu, con ipotesi conservativa della distanza tra le barre di rinforzo di 2 m, che nella realtà è ben al di sotto di tale valore. Il conduttore in rame che circonda la power house nel lato est è rappresentato in magenta. Sono presenti anche 3 conduttori equidistanti 2,5 m che collegano l'impianto di terra della power house con quello della sottostazione, rappresentati in verde.

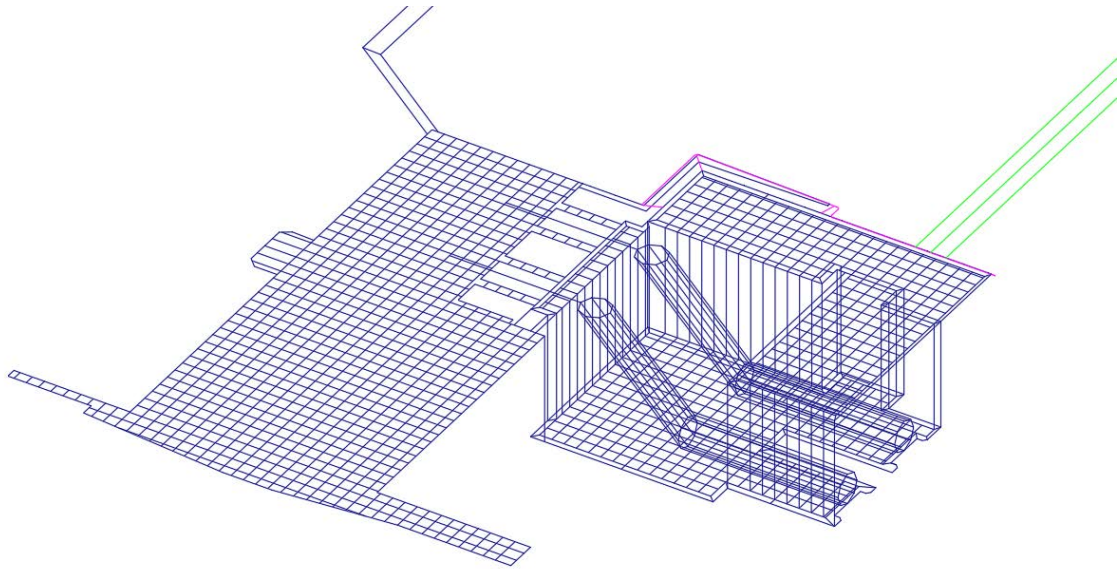


Figura 14: Layout impianto di terra power house – vista 3D

L'impianto di terra della sottostazione è stato eseguito considerando di interrare i conduttori vicini alle apparecchiature che richiedono la messa a terra, con l'aggiunta di un conduttore per il controllo del potenziale distante 1 m dall'esterno delle recinzioni in acciaio che si trovano all'interno e intorno all'area della sottostazione. In Figura 15 è rappresentato il Layout della sottostazione. I due impianti di terra sono collegati da tre cavi equidistanti 2,5 m l'uno dall'altro. La scelta di utilizzare tre conduttori è per un fattore di sicurezza in caso uno o due conduttori venissero tranciati. Grazie a questo collegamento la resistenza di terra si riduce di molto, utilizzando un'area più grande e sfruttando l'armatura della diga e power house. In Figura 16 viene rappresentato l'insieme dell'intero impianto di terra in tre dimensioni.

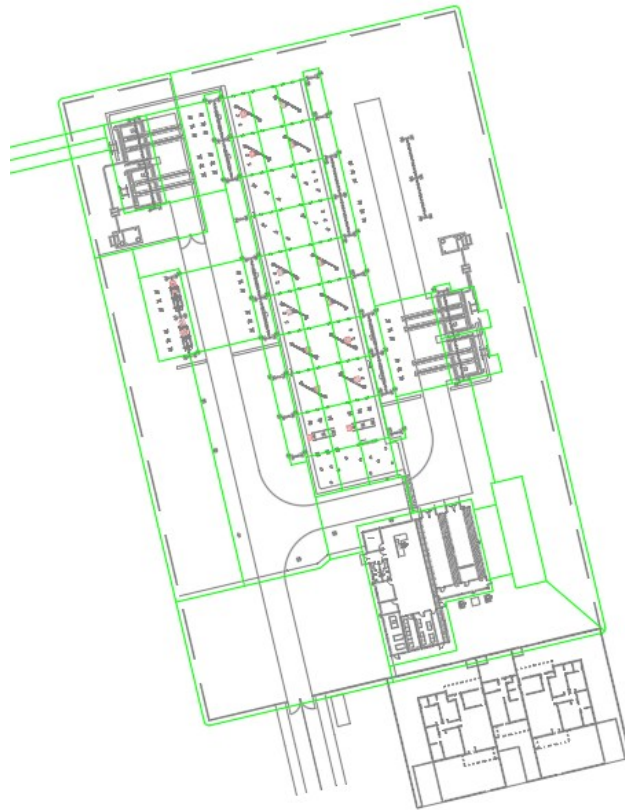


Figura 15: Layout rete di terra della sottostazione

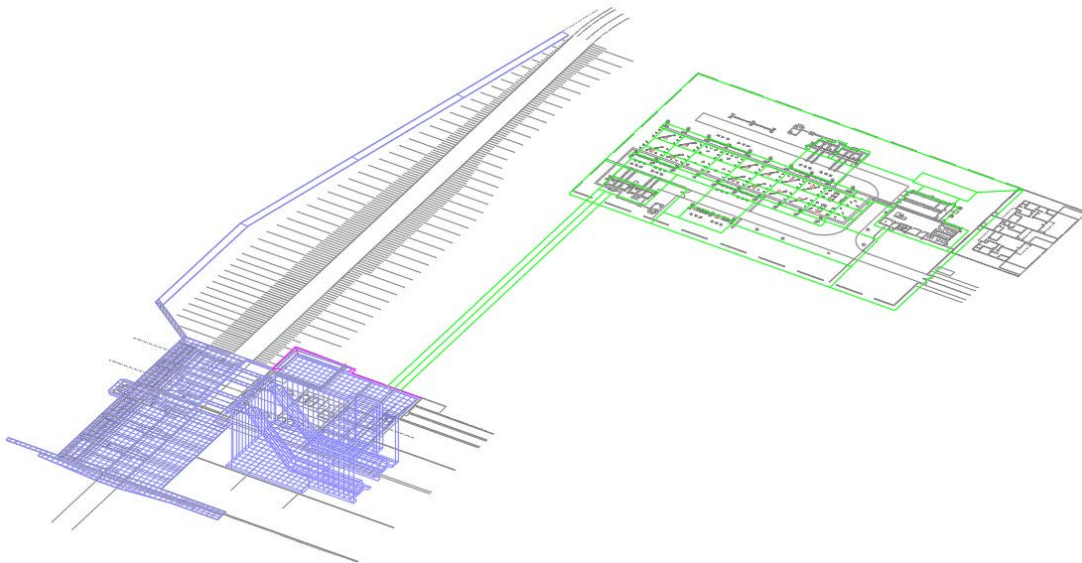


Figura 16: Layout impianto di terra – Vista 3D

Sezione dei conduttori

Per il dimensionamento termico dell'impianto di terra della power house, che è un sistema con neutro messo a terra attraverso un'elevata resistenza (750Ω), si considera l'85% della corrente di guasto trifase a 11 kV, ovvero 16,78 kA. La sezione minima calcolata è di $77,49 \text{ mm}^2$, mentre la sezione che si considera è di:

$$A = 120 \text{ mm}^2$$

Tale valore tiene conto dei valori minimi richiesti dalla normativa, della sollecitazione termica, della resistenza meccanica, della corrosione, e la capacità di resistenza all'intera corrente di terra. Questa sezione è utilizzata per il conduttore in rame che circonda la power house e per l'armatura in ferro.

Per la rete di terra della sottostazione e per i tre cavi che connettono i due impianti di terra, come per metodo IEEE, si considera la corrente di guasto di 20 kA e 1 s come tempo di estinzione, date dalle specifiche di terra del progetto. La sezione minima calcolata è $130,63 \text{ mm}^2$, ma per le stesse considerazioni fatte per il caso precedente, la sezione che si considera è:

$$A = 150 \text{ mm}^2$$

Resistenza e potenziale di terra

Considerando la corrente di guasto monofase di 3,61 kA (Tabella 6), vicino al trasformatore 90/33 kV nella sottostazione, la resistenza di terra e il potenziale di terra calcolati da GSA_FD è:

$$R_g = 0,428 \Omega$$

$$GPR = 1544,9 \text{ V}$$

La distribuzione del potenziale di terra in un'area che comprende l'intero impianto di terra è rappresentato in Figura 17 e in Figura 18.

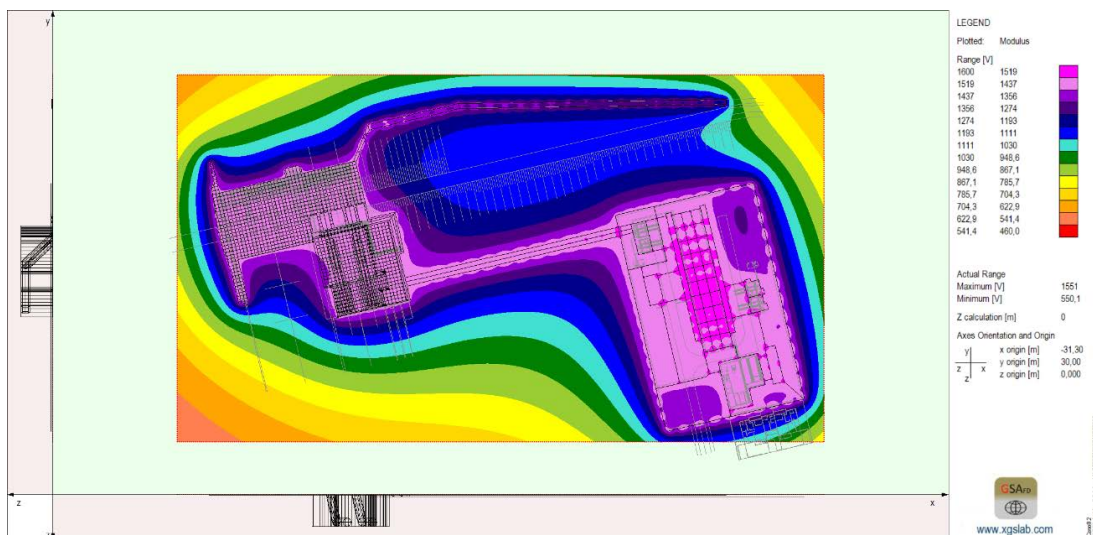


Figura 17: Distribuzione del potenziale di terra – Vista 2D

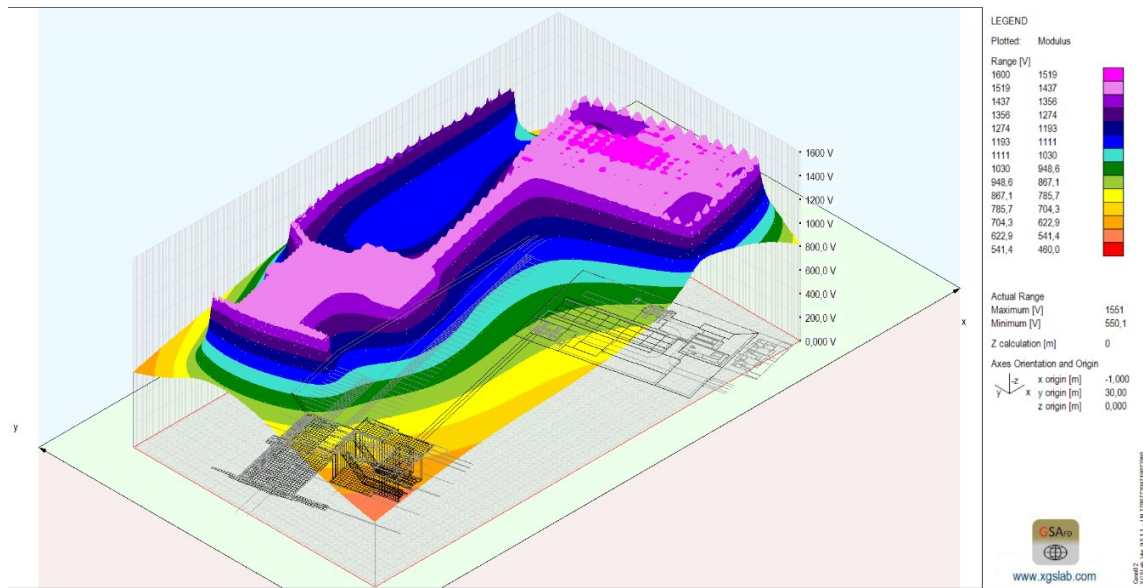


Figura 18: Distribuzione del potenziale di terra – Vista 3D

Limiti di tensione

I limiti di tensione di contatto e di passo, calcolati secondo gli standard IEEE, per un corpo di 50 kg con un tempo di cancellazione del guasto, sono rispettivamente:

$$U_{stp} = 174,3 \text{ V}$$

$$U_{ssp} = 205,1 \text{ V}$$

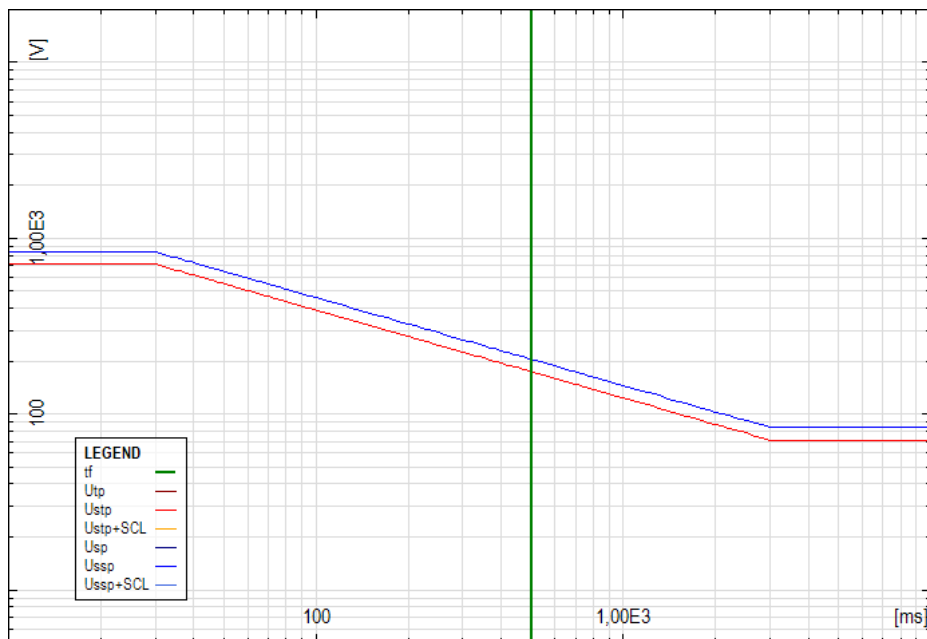


Figura 19: Limiti di tensione di contatto (rosso) e di passo (blu)

Il GPR è ben al di sopra di tali limiti, quindi sarà necessario verificare la che tensione massima di tocco e di passo non ecceda tali limiti.

Distribuzione della corrente

Il modulo GSA_FD permette di calcolare la distribuzione della corrente dispersa lineare Figura 20, ovvero la corrente che scorre tra i conduttori e la terra circostante. Nella leggenda è riportato il modulo massimo del campo elettrico nella terra circostante gli elettrodi, queste informazioni sono utili per individuare se sono possibili fenomeni di ionizzazione del suolo. Il valore critico del campo elettrico dipende dalle caratteristiche del suolo e può variare nel range $100 \div 2000$ kV/m. I valori più comuni sono nel range $300 \div 400$ kV/m. Tuttavia fenomeni di ionizzazione del suolo non sono comuni. La Figura 21 rappresenta invece la distribuzione della corrente di guasto.



Figura 20: Distribuzione della corrente dispersa dalla rete di terra



Figura 21: Distribuzione della corrente di guasto sulla rete di terra

Verifica tensione di contatto e di passo

Le aree dove i limiti di tensione vengono superati sono mostrate in Figura 22. Il verde rappresenta l'area sicura, dove tensione di passo e di contatto sono sotto il limite, il giallo indica un'area dove solamente la tensione di passo è sotto il limite. Come si può notare tutta l'area della rete di messa a terra presenta tensioni al di sotto dei limiti di sicurezza. Le aree gialle all'interno della sottostazione presentano una tensione di contatto superiore al limite, ma in tali aree non sono presenti dispositivi o strutture metalliche. Eventuali dispositivi utilizzati in queste aree devono avere un isolamento di classe 2, oppure è possibile ricoprire le aree con ghiaia per renderle sicure.

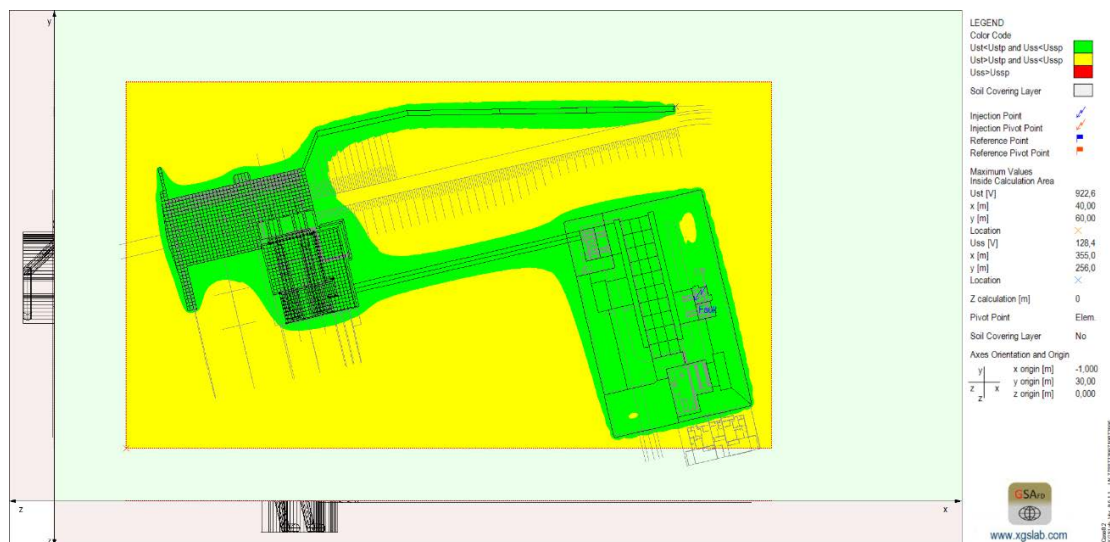


Figura 22: Aree sicure sulla superficie del suolo

La Figura 23 e Figura 24 rappresentano rispettivamente la distribuzione della tensione di contatto e della tensione di passo nell'intera area di calcolo.

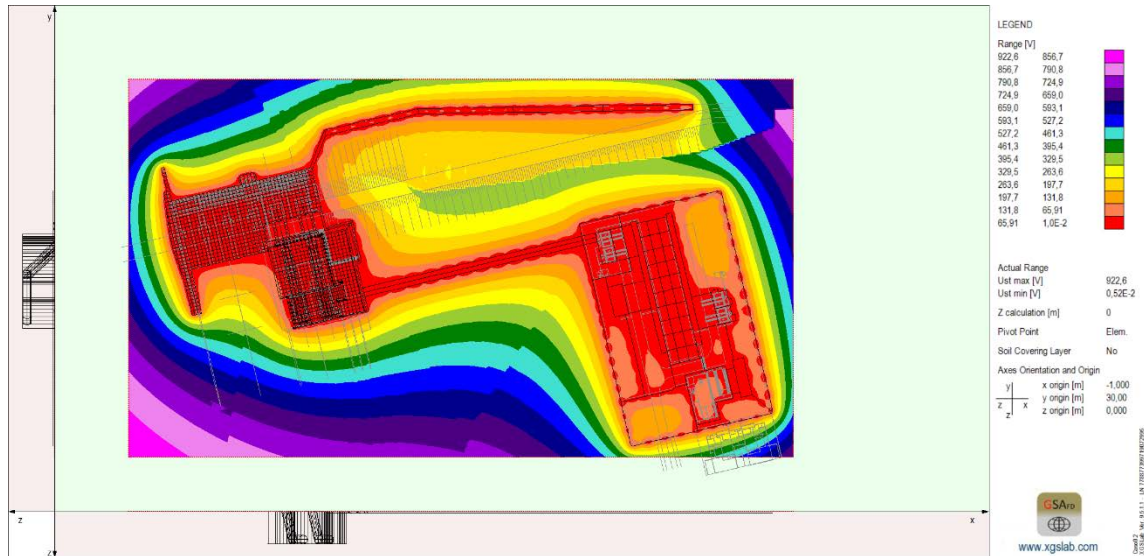


Figura 23: Distribuzione della tensione di contatto

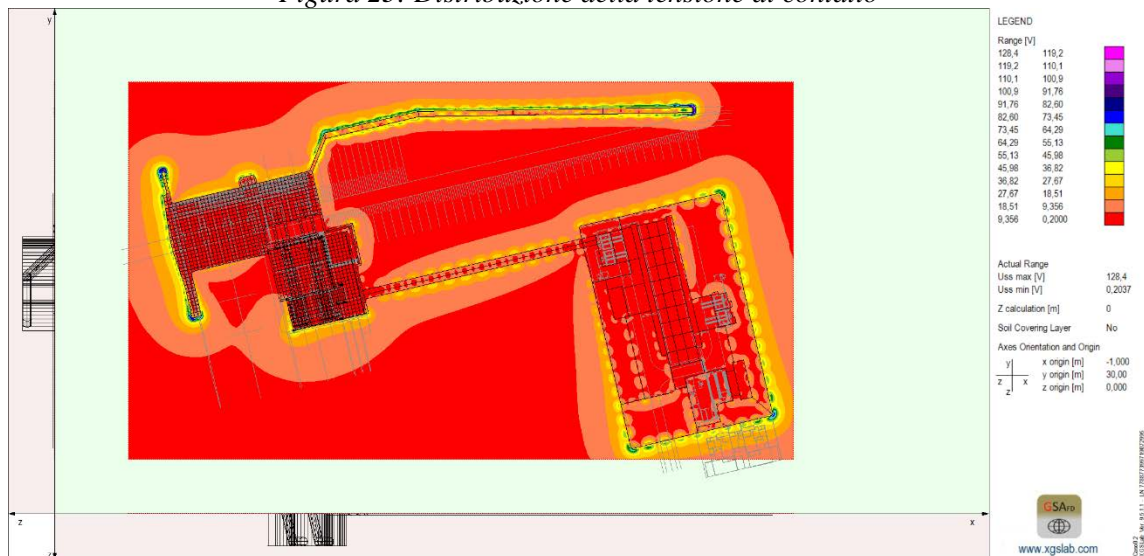


Figura 24: Distribuzione della tensione di passo

Per una verifica più accurata è possibile calcolare le tensioni lungo una linea. Per esempio le tensioni lungo la diagonale della sottostazione che comprende i punti dove la tensione di contatto eccede i limiti sono rappresentate nel grafico seguente:

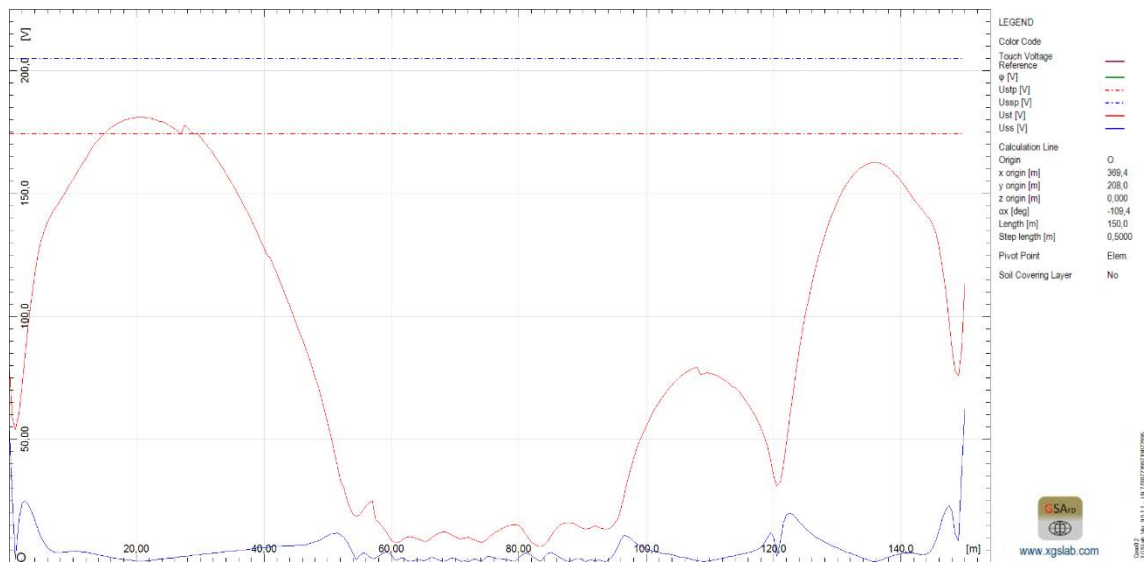


Figura 25: Tensione di contatto e di passo lungo la linea di calcolo

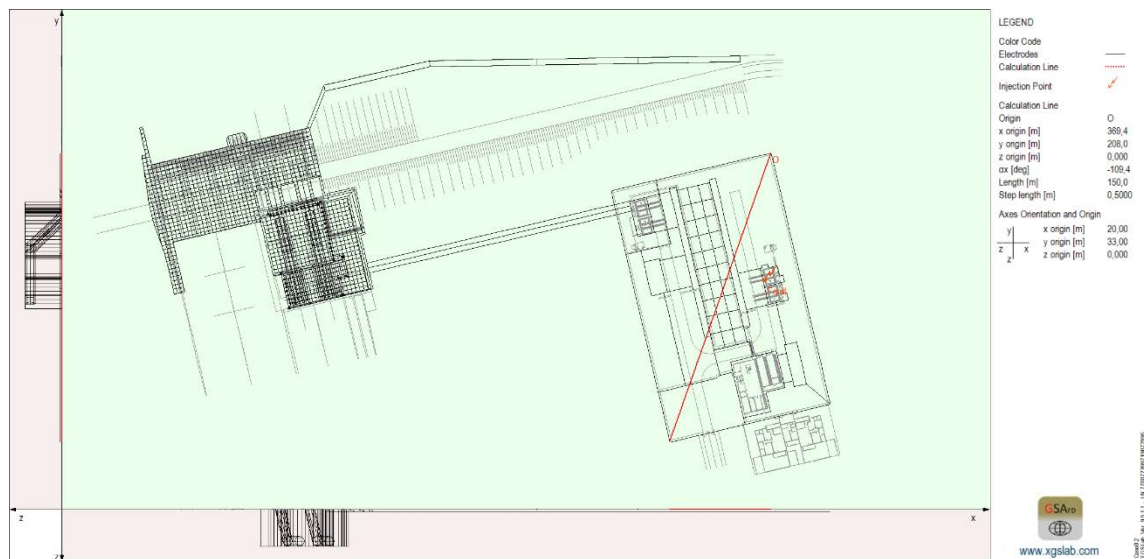


Figura 26: Linea di calcolo

L'area di calcolo della Figura 22, Figura 23, Figura 24 si riferisce alla superficie del suolo. La sala macchine della power house si trova ad una profondità di 18m, quindi è necessaria un'altra area di calcolo a tale profondità. Come per il caso precedente, in Figura 27 è rappresentato in verde l'area dove la tensione di passo e di contatto sono sotto il limite e in giallo indica l'area dove solamente la tensione di passo è sotto il limite. La Figura 28 e Figura 29 mostrano rispettivamente la tensione di contatto e di passo alla profondità 18m.

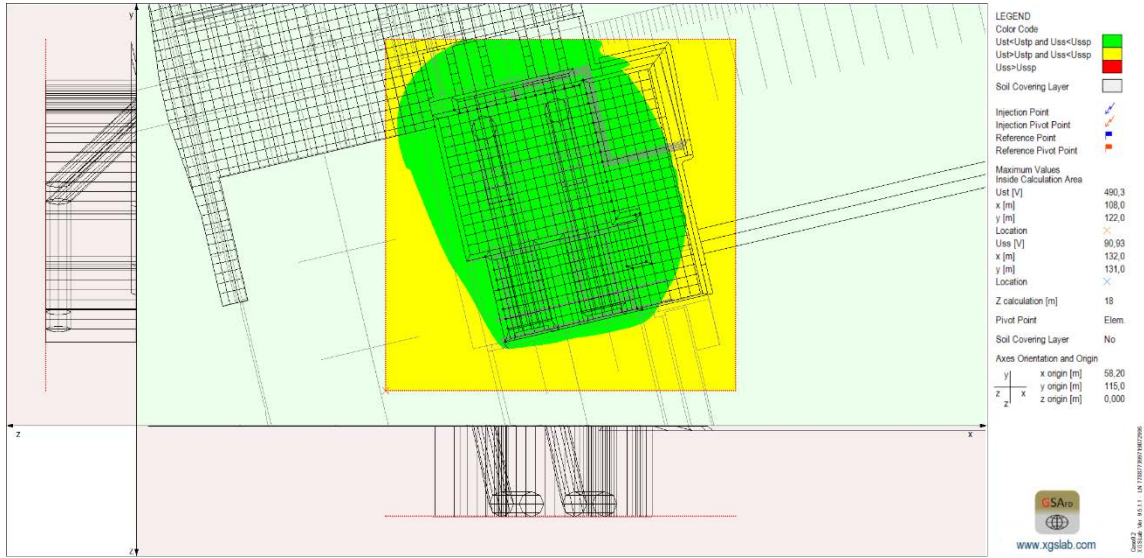


Figura 27: Aree sicure sala macchine

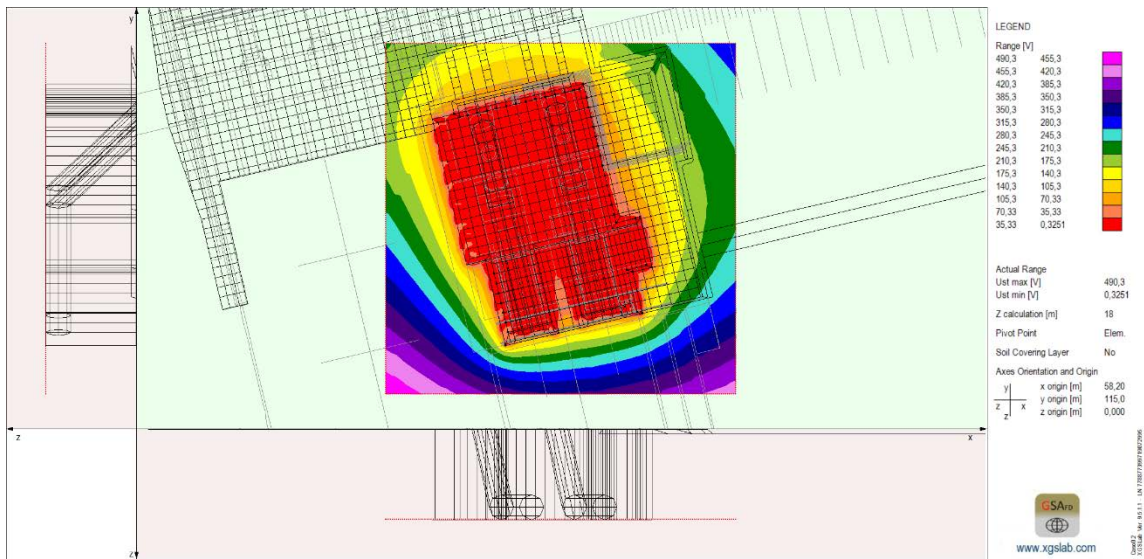


Figura 28: Distribuzione della tensione di contatto



Figura 29: Distribuzione della tensione di passo

Tutte le aree di interesse hanno le tensioni di contatto e di passo al di sotto dei valori limite, quindi si può considerare il dimensionamento dell'impianto di terra adeguato per la sicurezza in caso di guasto.

3.2.1 Simulazioni

Grazie al software è possibile eseguire alcune simulazioni di eventi che si potrebbero verificare o differenti caratteristiche geometriche per un'analisi economica. In questa sezione si analizza il caso in cui i cavi che collegano i due impianti di terra venissero tranciati tutti e tre, il caso in cui rimanesse un solo cavo di collegamento, diverse profondità di interrimento della griglia e la massima corrente di cortocircuito ammessa.

Tre cavi tranciati

Il layout dell'impianto di terra è mostrato in Figura 30, con i tre cavi di collegamento tranciati nei pressi della sottostazione. La resistenza di terra e il potenziale di terra calcolati sono:

$$R_g = 0,738 \Omega$$

$$GPR = 2665,4 V$$

Come ci si aspettava i valori sono maggiori del caso con le reti di terra collegate.

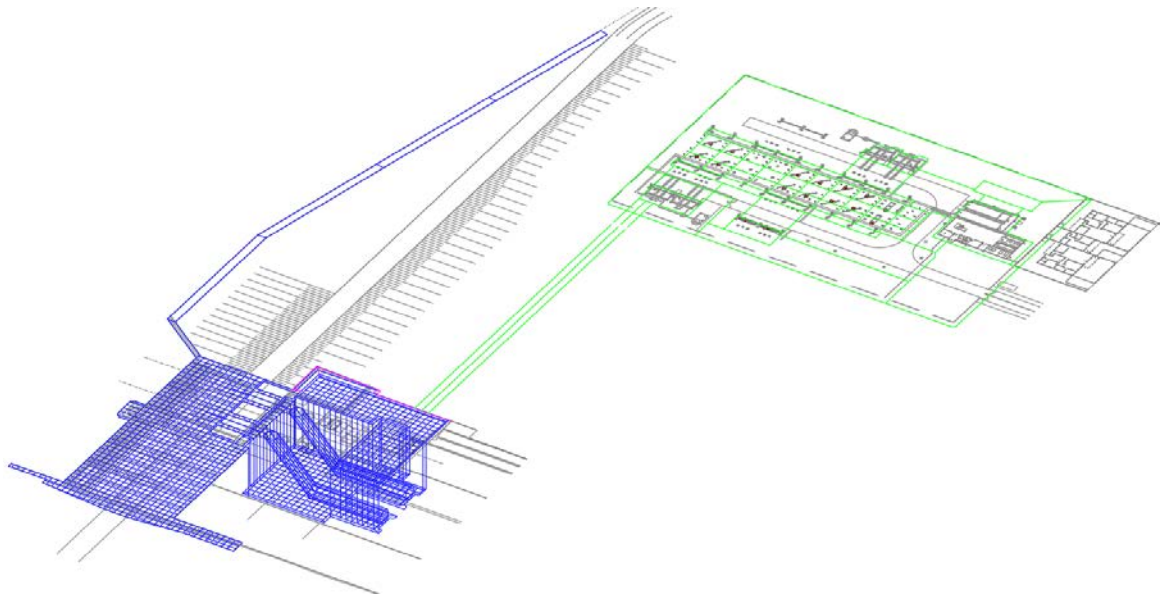


Figura 30: Layout impianto di terra con cavi di collegamento tranciati – Vista 3D

In Errore. L'origine riferimento non è stata trovata. Figura 32 e Figura 33 sono rappresentate rispettivamente la tensione di contatto, la tensione di passo e il dettaglio della tensione di passo nella sottostazione con la vista 3D. Si nota come la tensione di passo raggiunga valori elevati proprio dove è venuta a mancare la continuità dei tre cavi di collegamento. Bisognerà fare un confronto con le tensioni limiti ammissibili per verificarne la sicurezza.

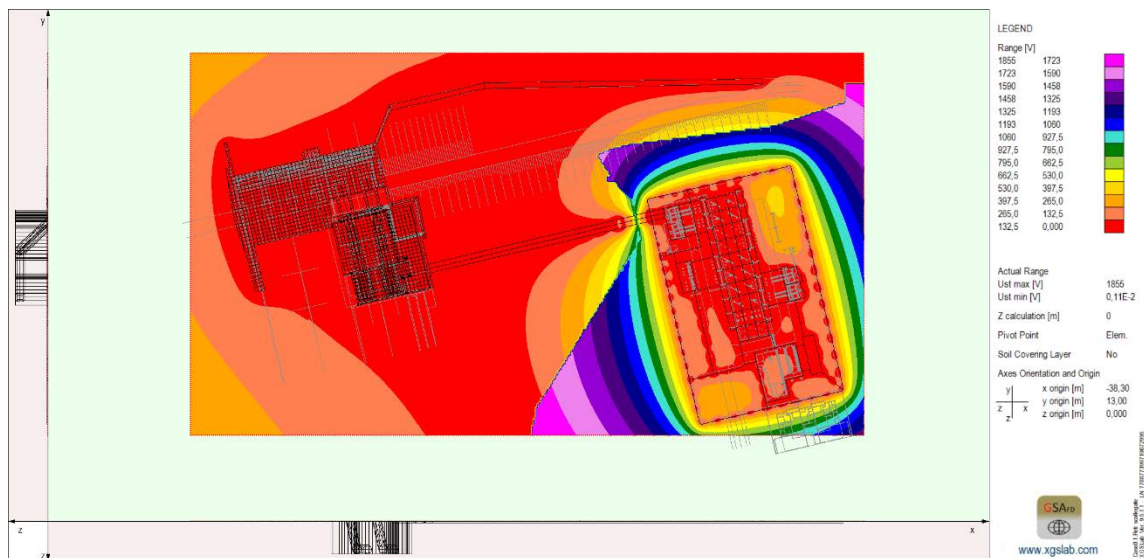


Figura 31: Distribuzione della tensione di contatto - Cavi tranciati

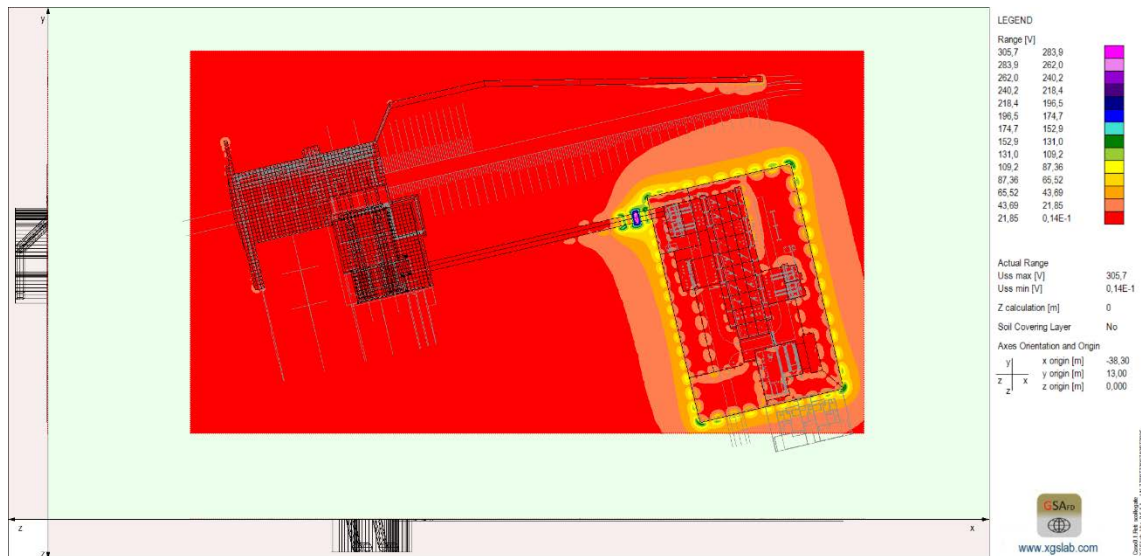


Figura 32: Distribuzione della tensione di passo - Cavi tranciati - Vista 2D

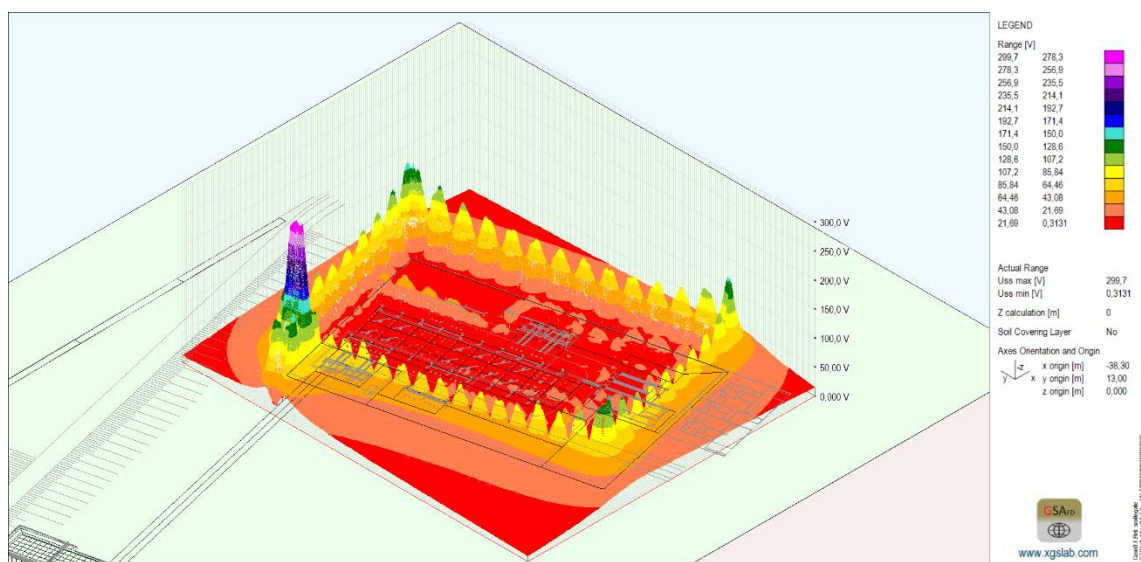


Figura 33: Distribuzione della tensione di passo in sottostazione - Cavi tranciati - Vista 3D

Le tensioni di contatto e di passo superano i limiti in alcune aree come mostra la Figura 34. In particolare molte zone lungo a recinzione non sono sicure per la tensione di contatto e, come ci si aspettava, in corrispondenza dell'interruzione dei cavi non è sicuro nemmeno per la tensione di passo, rappresentata con il colore rosso. È importante garantire il collegamento elettrico tra i due impianti di terra, altrimenti si può andare incontro a situazioni pericolose. Per questo motivo è di fondamentale importanza la scelta di utilizzare tre cavi di collegamento.



Figura 34: Aree sicure con i cavi di collegamento tranciati

Due cavi tranciati

In questo caso viene simulata la condizione che due cavi vengono tranciati nei pressi della sottostazione ma rimane saldo un collegamento. La resistenza di terra è aumentata di poco, circa il 9,5% di conseguenza anche il potenziale di terra è aumentato.

$$R_g = 0,469 \Omega$$

$$GPR = 1691,7 \text{ V}$$

Le tensioni di passo e di contatto questa volta sono al di sotto sotto dei limiti ammessi dalla normativa nelle aree di interesse come è visibile dalla Figura 35.

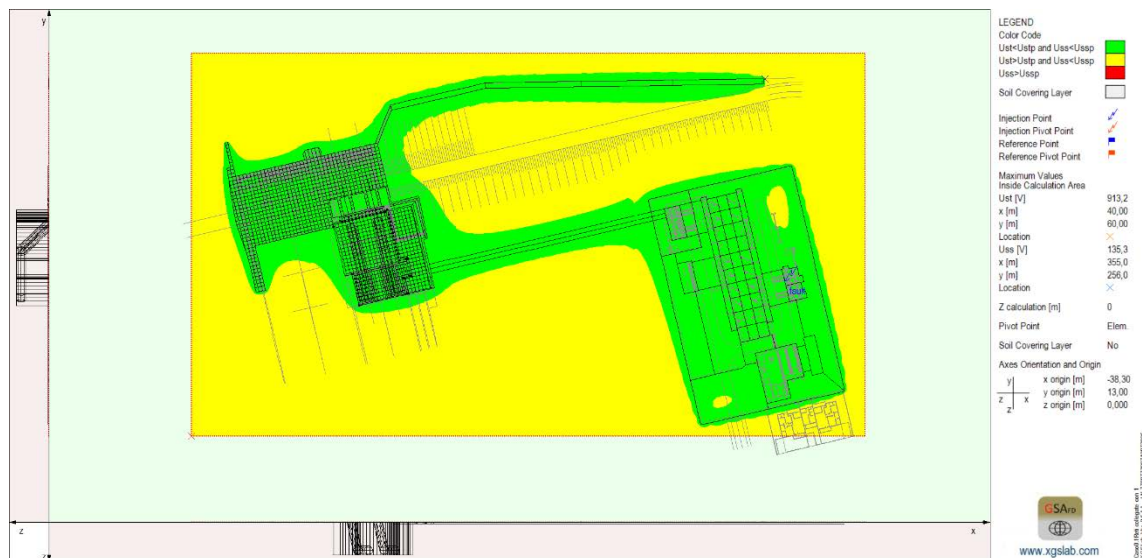


Figura 35: Aree sicure con due cavi di collegamento tranciati

Questo dimostra come la scelta di utilizzare tre cavi sia valida per aumentare la sicurezza in caso uno o due cavi venissero tranciato per errore.

Variatione della profondità di interramento

In questa simulazione si varia la profondità di interramento della rete di terra, facendo attenzione alla variazione della resistenza di terra, la massima tensione di contatto e la massima tensione di passo all'interno della sottostazione. Il programma non ammette che la rete di terra si trovi all'interfaccia dei due strati di terra con differente resistività, quindi non può essere simulata direttamente una rete a profondità 1,2 m. Tali parametri, come si vedrà in seguito, sono influenzati molto dalla resistività del suolo.

La Tabella 8 mostra i valori calcolati nelle diverse simulazioni e la Figura 36 e Figura 37 rappresentano graficamente la variazione rispettivamente della resistenza di terra e delle tensioni di contatto e di passo, la linea verticale in arancio indica l'interfaccia dei due layer del suolo.

Tabella 8: Variazione dei principali parametri con la profondità di interramento

Profondità [m]	R_g [Ω]	Tensione di contatto [V]	Tensione di passo [V]
0,2	0,4285	187,9	94
0,4	0,4282	181,9	82,83
0,6	0,4278	179,6	60,6
0,8	0,4277	178,9	53,61
1	0,428	181,3	44,25
1,1	0,4287	187,4	45,45
1,15	0,4303	200,6	43,17
1,25	0,4328	223,9	39,94
1,3	0,4395	287,9	35,51
1,4	0,4423	316,5	33,5
1,6	0,4435	337,7	31,48

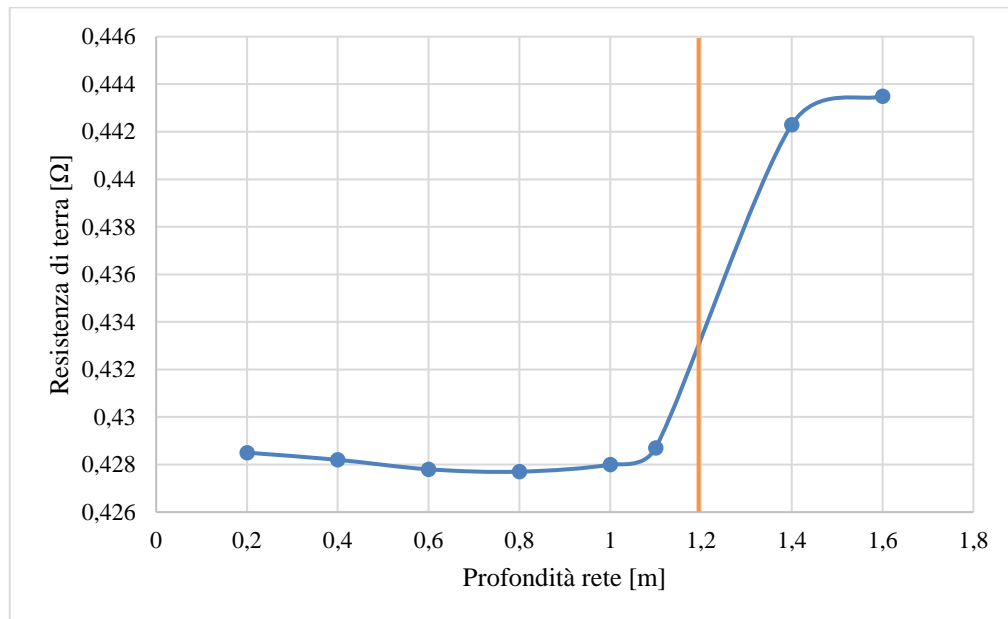


Figura 36: Variazione della resistenza di terra al variare della profondità di interramento della rete di terra

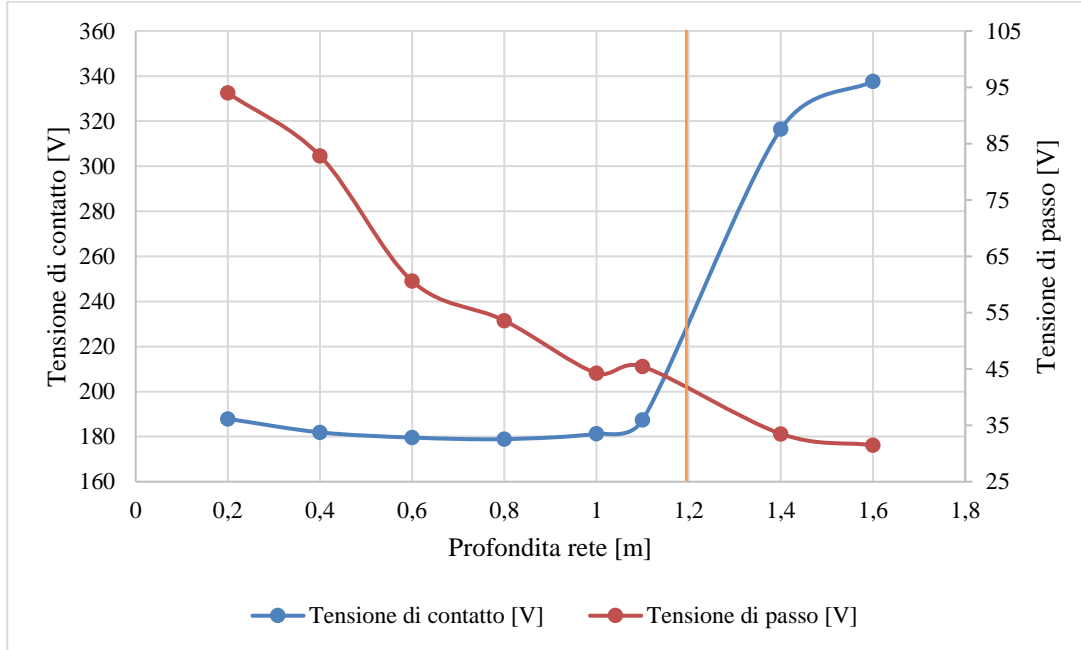


Figura 37: Variazione della tensione di contatto e di passo al variare della profondità di interramento della rete di terra

Come si nota la resistenza di terra non varia molto con la profondità se si trova nel primo layer, diminuisce lievemente, e quando raggiunge il secondo layer a resistività maggiore aumenta leggermente, di circa il 3,6% per la profondità di 1,6 m rispetto al progetto preliminare. La tensione di contatto segue circa l'andamento della resistenza di terra, aumentando di circa l'86% a 1,6 m di profondità. La tensione di passo ha complessivamente un andamento decrescente all'aumentare della profondità, con un massimo relativo vicino all'interfaccia dei due layer del suolo.

Dalla Tabella 8 si vede come la profondità di 0,8 m ha valori di resistenza di terra e tensione di contatto più basse, e quindi si presterebbe alla migliore scelta di profondità della rete. Questi parametri sono molto influenzati dal modello del suolo che si considera, resistività del terreno e spessore dei layers, inoltre bisogna tenere in considerazione che anche se una rete interrata a bassa profondità è più economica, è anche più soggetta alle variazioni climatiche dell'ambiente esterno.

Limite di corrente di cortocircuito

Dato che la rete elettrica si può espandere, soprattutto in un contesto come quello di questo progetto, in un paese in via di sviluppo, la corrente di corto circuito potrebbe aumentare e la rete di terra dimensionata potrebbe non soddisfare più i requisiti di sicurezza. In questa sezione si analizza per quale valore massimo di corrente l'impianto di terra è idoneo. Considerando il layout di Figura 16 la massima corrente di corto circuito accettabile è circa 4500 A, il 24% in più di quella originale. Per individuare la massima corrente si sono eseguite delle simulazioni variando la corrente di corto circuito e calcolando attraverso GSA_FD le tensioni di contatto e di passo. I punti più critici si trovano in prossimità della recinzione perimetrale all'interno della sottostazione, come si vede nella Figura 38. Per un'analisi più precisa è stato eseguito il calcolo lungo la direttrice

distante 1 metro dalla recinzione, la Figura 39 mostra la variazione della tensione di contatto e di passo lungo tale direttrice, e si può notare come la tensione di contatto sia al limite di sicurezza.

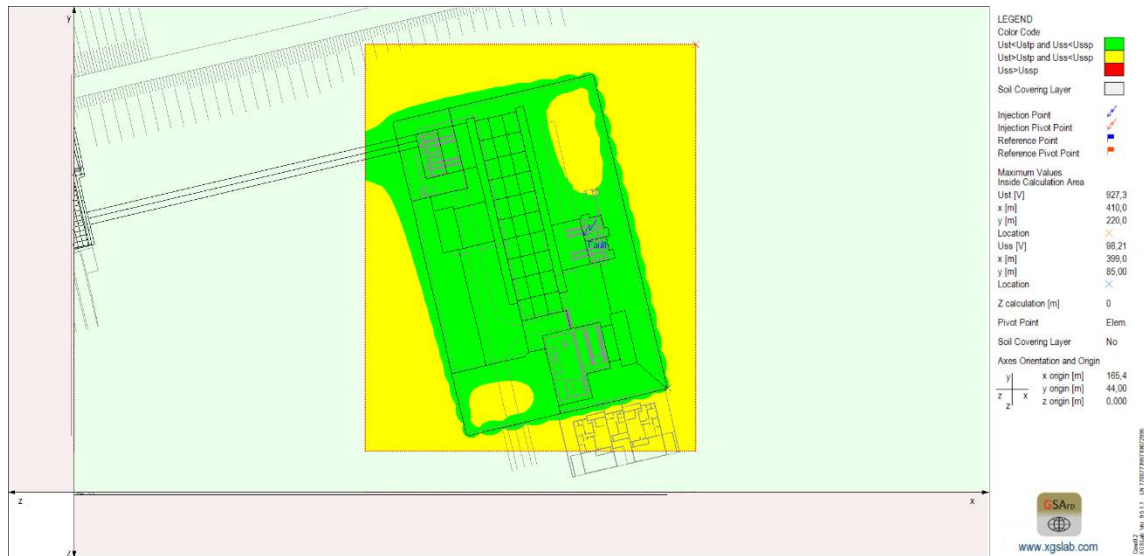


Figura 38: Aree sicure con corrente di cortocircuito di 4500 A



Figura 39: Tensione di contatto e di passo lungo la linea di calcolo con corrente di corto circuito si 4500 A

Se una futura corrente di cortocircuito dovesse superare i 4500 A, invece di andare a modificare la rete di terra è sufficiente aggiungere un layer di materiale superficiale con resistività 3000 Ωm e spessore 0,1 m dove è necessario. Per esempio per una corrente di 10.000 A nella Figura 40 sono mostrate le aree sicure prima e dopo l'aggiunta del materiale superficiale. Sarà sufficiente ricoprire

il perimetro interno della sottostazione per rientrare nei limiti della tensione di contatto. È inoltre importante controllare che con un alto valore di corrente, la tensione di passo all'esterno della sottostazione non superi il limite, come nell'angolo sud-est della sottostazione mostrato in colore rosso nella Figura 40.

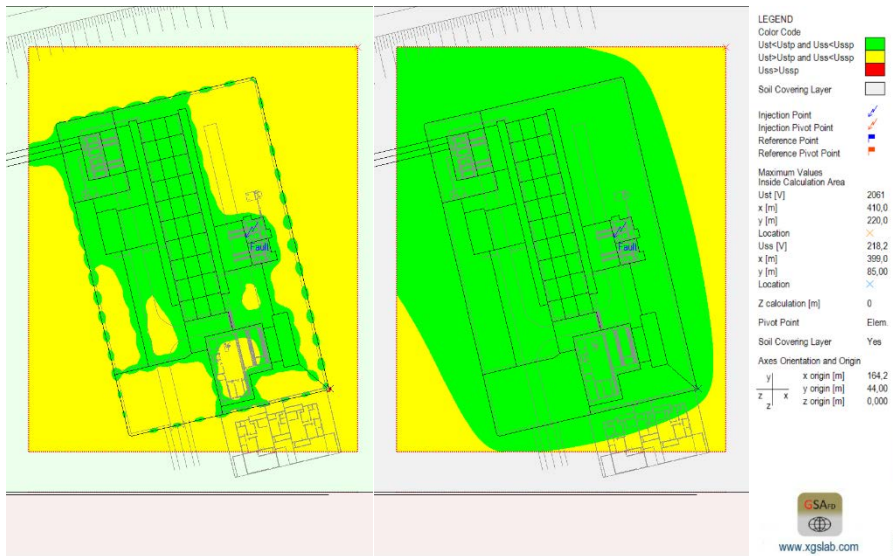


Figura 40: Aree sicure senza e con il materiale superficiale

3.3 Differenze tra i due metodi

Nei due paragrafi precedenti si può vedere come l'approccio analitico IEEE Std 80-2013 sia molto più limitato rispetto a quello con un software a simulazione FEM. In primo luogo la modellazione del suolo con l'approccio analitico è limitata al suolo uniforme. Infatti la resistività del suolo uniforme è molto maggiore di quella colata dal software XGSLab e questo porta a dover utilizzare più conduttori interrati per raggiungere un valore adeguato di resistenza. Un altro limite riguarda la geometria della rete di terra. La normativa IEEE utilizza equazioni che supportano reti di forma quadrata, rettangolare ed a L con il vincolo che le distanze tra i conduttori della rete siano tutte uguali. Inoltre con la normativa non è possibile valutare l'effetto del collegamento della rete di terra all'armatura delle fondamenta degli edifici e, come in questo caso, considerare il collegamento tra due impianti di terra diversi tra loro. Tutti questi limiti portano ad un sovradimensionamento dell'intero impianto di terra, la resistenza di terra calcolata risulterà maggiore di quella reale, come la tensione di contatto e quella di passo. Al contrario con il software agli elementi finiti si può modellare il suolo con diversi strati, supporta reti di terra di qualsiasi forma e può tenere in considerazione l'effetto delle armature degli edifici e di altre reti di terra nei dintorni. Grazie a questo si può progettare una forma preliminare della rete di terra con i conduttori interrati vicino alle apparecchiature che richiedono la messa a terra, risparmiando quindi sulla quantità di conduttori. È possibile inoltre verificare quali zone presentano pericoli per la persona e modificare il progetto localmente per soddisfare i requisiti di sicurezza, come per esempio aggiungendo uno strato superficiale ad alta resistività. Riassumendo, i limiti dell'approccio analitico rispetto a quello con software FEM sono:

- Modello del suolo uniforme.
- Geometria della rete limitata alla forma quadrata, rettangolare ed a L.
- Distanze uguali tra i conduttori che formano le maglie della rete.
- Impossibilità di considerare l'armatura in ferro degli edifici.
- Impossibilità di considerare un collegamento con impianti di terra diversi nelle vicinanze.
- Impossibilità di valutare gli effetti di eventuali oggetti conduttori interrati non facenti parte dell'impianto di terra.

Nella Tabella 9 sottostante sono riportati i valori dei principali parametri di progetto, calcolati con i due differenti metodi.

Tabella 9: Confronto dei parametri calcolati con l'approccio analitico e simulazioni FEM

Parametro	IEEE	GSA_FD	Differenza [%]
<i>Suolo</i>	$\rho = 490 \Omega\text{m}$	<i>Layer1</i> = 40 Ωm <i>h</i> = 1,2 m <i>Layer2</i> = 200 Ωm	/
R_g [Ω]	2,028	0,428	-78,9
<i>GPR</i> [V]	7319,9	1544,9	-78,9
E_m [V]	999,7	181,3	-81,7
E_s [V]	526,4	44,25	-91,6
<i>Layer superficiale</i>	$\rho = 5000 \Omega\text{m}$ <i>h</i> = 0,1 m	Nessuno	/
<i>Lunghezza totale dei conduttori [m]</i>	3562,2	2189,3	-38,5
<i>Lunghezza totale dei picchetti [m]</i>	16	Nessuno	/

Come si può notare i valori calcolati con GSA_FD sono molto minori di quelli calcolati usando la sola normativa IEEE. Il fattore che influenza maggiormente i calcoli è il modello del suolo. La resistenza di terra e il *GPR* calcolati con un modello del suolo a due strati, sono circa 4,7 volte più piccoli rispetto ai valori calcolati con il modello del suolo uniforme. Con il metodo IEEE è stato necessario utilizzare per l'intera area della superficie uno strato superficiale di materiale ad alta resistività, mentre con il metodo FEM questo non è necessario. Si può notare anche la differenza nella quantità di conduttori di rame. Il metodo FEM utilizza molto meno rame, il 38,5% in meno. In questo caso col metodo FEM non è servito l'uso di picchetti per raggiungere i livelli di sicurezza. I picchetti sono utili per drenare la corrente quando il layer inferiore ha resistività minore di quello superiore, ma sono utili anche in corrispondenza degli scaricatori di sovratensione nei pressi dei trasformatori e delle linee di trasmissione.

Con il software FEM si possono eseguire analisi più accurate dell'impianto di terra e simulare eventi anomali, o diverse condizioni di progetto come mostrato nel paragrafo 3.2.1. Tutto questo porta ad un risparmio in termini economici e una maggiore sicurezza del progetto.

3.3.1 Confronto con gli stessi input

È interessante andare a simulare con i software GSA_FD il dimensionamento della rete di terra ricavato con il metodo IEEE, utilizzando lo stesso modello del suolo, la stessa corrente di cortocircuito e la stessa geometria, andando a confrontare i diversi parametri.

In Figura 41 è mostrata la distribuzione del potenziale di terra nella sottostazione che si presenta abbastanza uniforme dato che la rete di terra è molto fitta. La Figura 42 e la Figura 43 mostrano rispettivamente la tensione di contatto e la tensione di passo nell'area della sottostazione.

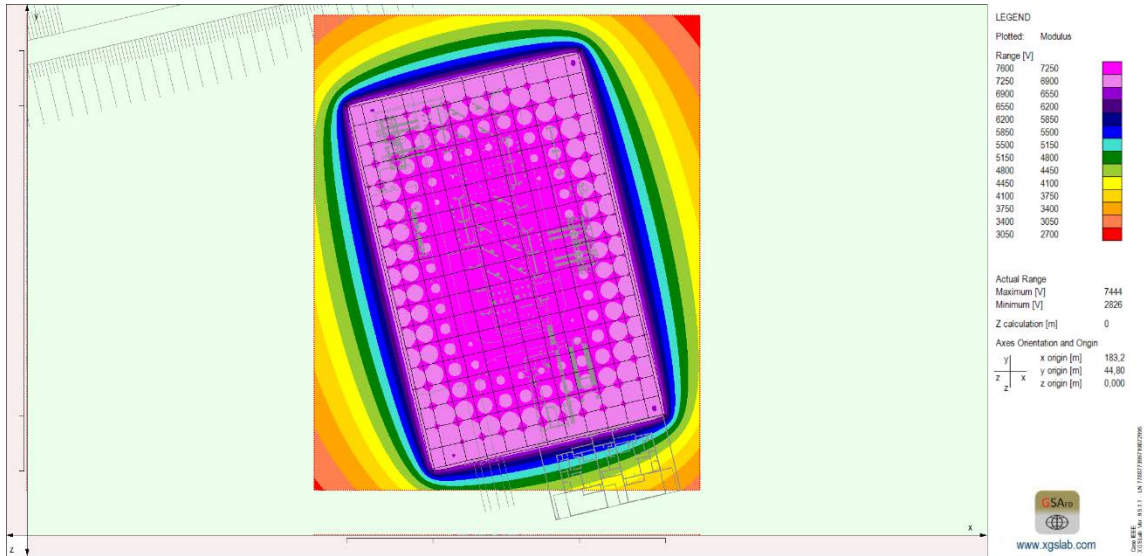


Figura 41: Distribuzione del potenziale di terra

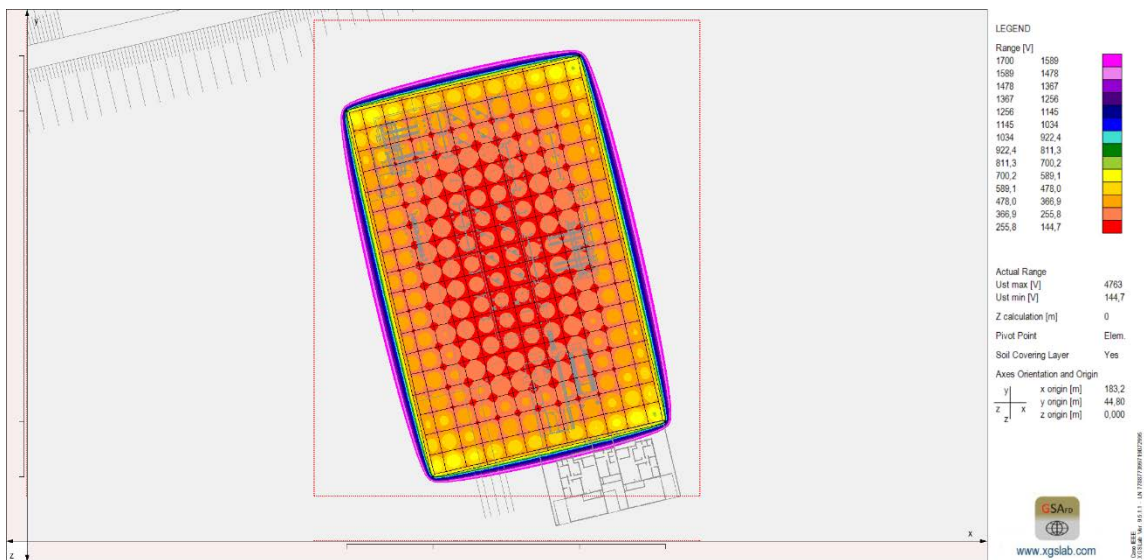


Figura 42: Distribuzione della tensione di contatto

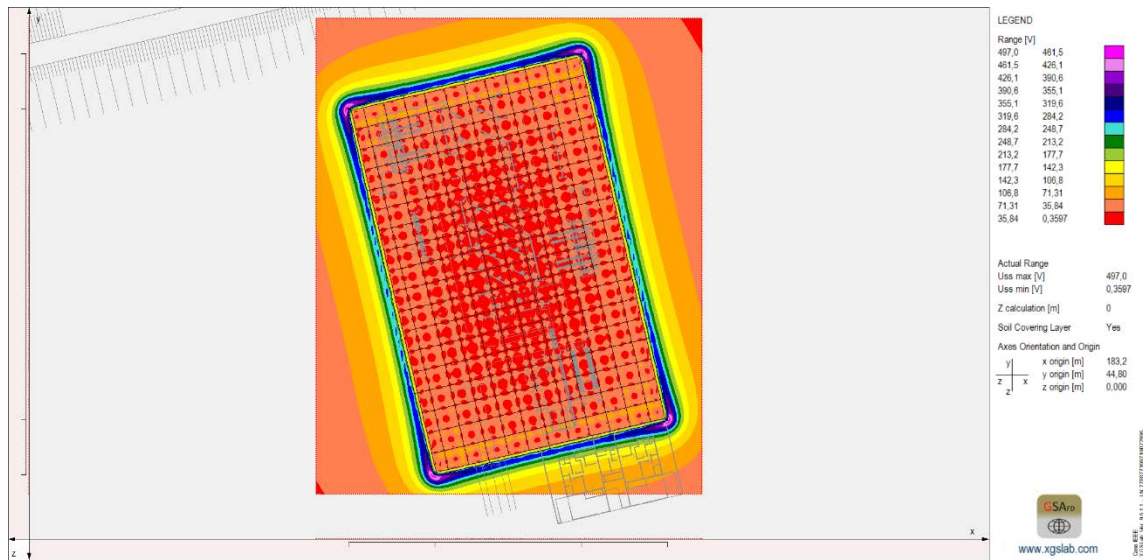


Figura 43: Distribuzione della tensione di passo

Le tensioni limite per gli standard IEEE senza lo strato di materiale superficiale e con uno strato di 0,1 m con resistività 5000 Ωm (lo stesso utilizzato nel progetto realizzato con l'approccio IEEE) sono:

$$U_{stp} = 289,6 \text{ V} \quad U_{ssp} = 666,4 \text{ V} \quad U_{stp+SCL} = 1087 \text{ V} \quad U_{ssp+SCL} = 3856 \text{ V}$$

Le aree sicure sono mostrate in Figura 44, senza e con l'SCL. Si vede come senza SCL la maggior parte dell'area della sottostazione non rispetta il limite della tensione di contatto, ed è quindi necessario l'SCL su tutta la superficie.

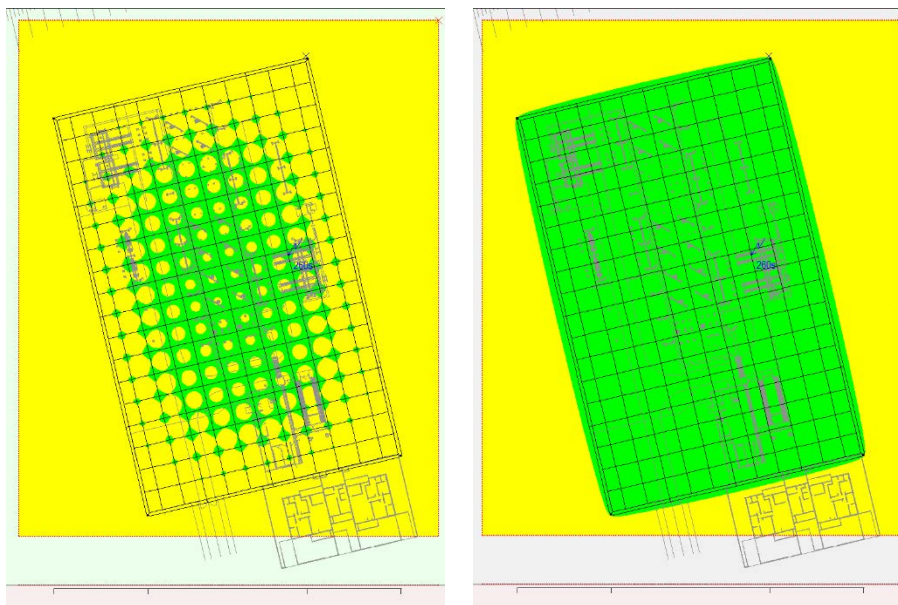


Figura 44: Aree sicure - Senza SCL - Con SCL

Nella Tabella 10 vengono confrontati i valori calcolati col metodo IEEE con quelli risultanti dal software GSA_FD.

Tabella 10: Confronto dei parametri calcolati con l'approccio analitico e simulazioni FEM

Parametro	IEEE	GSA_FD	Differenza [%]
$R_g [\Omega]$	2,028	2,103	+3,70
$GPR [V]$	7319,9	7590,4	+3,70
$E_m [V]$	999,7	897,1	-10,3
$E_s [V]$	526,4	425,4	-19,2

Si nota come la resistenza e il GPR calcolati col software siano leggermente superiori, perché la resistenza è riferita al punto di guasto e tiene conto della presenza dell'accoppiamento capacitivo, autoimpedenza e mutua impedenza. Per le tensioni di contatto e di passo, la normativa IEEE le sovrastima, questo perché, come già detto nel paragrafo precedente, la normativa considera solo forme regolari della rete con i conduttori equidistanti, mentre il software considera anche gli effetti del conduttore esterno al recinto per il controllo del potenziale.

Simulando col software il collegamento della rete di terra della sottostazione con l'impianto di terra della power house, le cose cambiano considerevolmente. Nella Tabella 11 sono mostrati i valori dei parametri calcolati e si può vedere come l'effetto del collegamento dei due impianti provochi una riduzione dei valori delle tensioni pericolose superiore al 60%.

Tabella 11: Confronto dei parametri calcolati con l'approccio analitico e simulazioni FEM

Parametro	IEEE	GSA_FD	Differenza [%]
$R_g [\Omega]$	2,028	1,138	-43,9
$GPR [V]$	7319,9	4109,4	-43,9
$E_m [V]$	999,7	385	-61,5
$E_s [V]$	526,4	175,8	-66,6

Dalle aree sicure in *Figura 45* e *Figura 46* si vede come quasi tutta l'area della sottostazione ora risulti sicura senza l'utilizzo dell' SCL , con esclusione di alcuni punti agli angoli della sottostazione dove è necessario l' SCL .

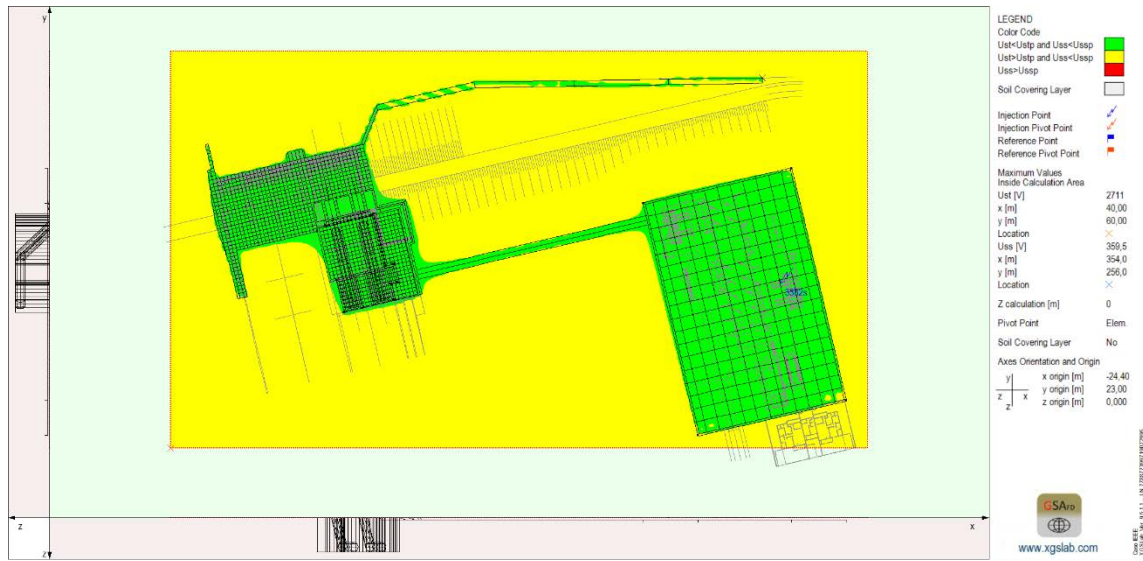


Figura 45: Aree sicure senza SCL

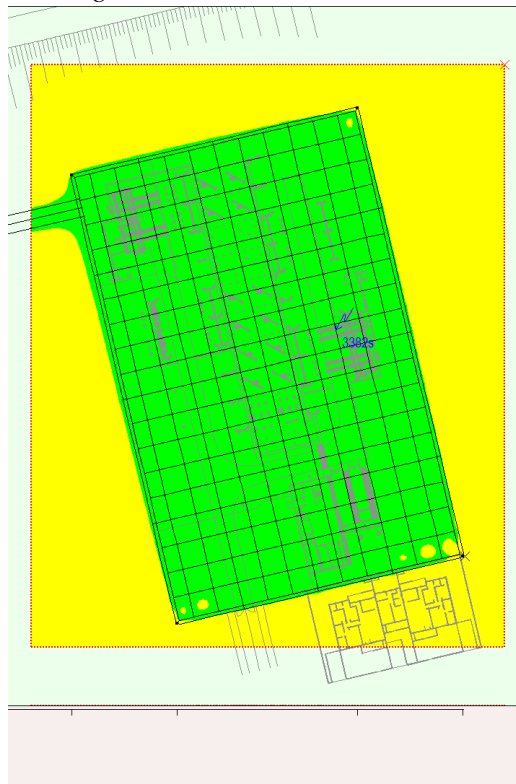


Figura 46: Aree sicure nella sottostazione

In conclusione per una rete di terra regolare con conduttori equidistanti, i risultati ottenuti dalle equazioni degli standard IEEE e dal software FEM, sono comparabili. Ma in caso di una non perfetta regolarità, che può essere causata come in questo caso dall'aggiunta del conduttore esterno

al recinto, i risultati ottenuti dagli standard IEEE sono sovrastimati. Inoltre col software è possibile considerare il collegamento dei due impianti di terra che come visto porta dei grossi vantaggi.

3.4 Simulazioni al variare della resistività del suolo

In questa sezione si ipotizzano alcuni modelli del suolo con caratteristiche particolari che si possono ritrovare misurando la resistività del terreno, e verranno eseguite delle simulazioni con il software XGSLab per individuare le il migliore approccio da utilizzare in fase di progettazione. Inizialmente il layout della rete viene mantenuto invariato, uguale a quello in Figura 16, lo stesso per la corrente di corto circuito che viene mantenuta a 3,61 kA. L'analisi sarà focalizzata principalmente sulla sottostazione che risente maggiormente degli effetti della resistività del suolo, mente la rete di terra della power house essendo collegata all'armatura dell'edificio e della diga, che è molto estesa e fitta, ne risente meno, ma svolge un ruolo fondamentale nella dispersione della corrente e sulla diminuzione della resistenza di terra. Se la sicurezza non è raggiunta verranno proposti diversi possibili interventi sulla maglia di terra, valutando quali sono più convenienti.

Scenario 1	Suolo a due strati	$\rho_1 = 1000 \Omega\text{m}, h = 2 \text{ m},$ $\rho_2 = 200 \Omega\text{m}$
Scenario 2	Suolo a due strati	$\rho_1 = 200 \Omega\text{m}, h = 2 \text{ m},$ $\rho_2 = 1000 \Omega\text{m}$
Scenario 3	Suolo a due strati	$\rho_1 = 500 \Omega\text{m}, h = 2 \text{ m},$ $\rho_2 = 100 \Omega\text{m}$
Scenario 4	Suolo uniforme	$\rho = 490 \Omega\text{m}$

3.4.1 Scenario 1

In questo scenario il suolo è formato da due layers dove il primo layer ha resistività 1000 Ωm con spessore 2 m, mentre il secondo layer ha resistività 200 Ωm . Considerando la rete del progetto base di Figura 16, la resistenza di terra e il *GPR* sono:

$$R_g = 0,642 \Omega$$

$$GPR = 2317,5 \text{ V}$$

La resistenza di terra ha un valore così basso grazie al collegamento della sottostazione con l'impianto della power house, ma la rete della sottostazione si trova nel layer con resistività più alta, quindi localmente sarà più difficile dissipare uniformemente verso terra la corrente di guasto. Le *Figura 47* mostra la distribuzione del potenziale di terra. Si può vedere che all'interno della sottostazione il potenziale non è uniforme quindi ci si aspettano tensioni di contatto elevate.

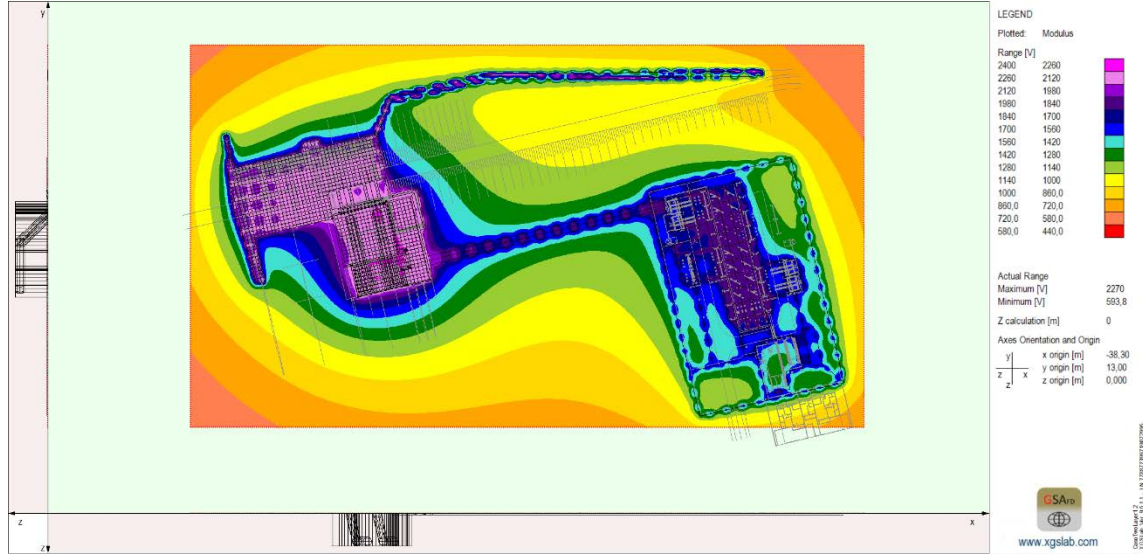


Figura 47: Distribuzione del potenziale di terra

Le tensioni limite per gli standard IEEE senza lo strato di materiale superficiale e con uno strato di 0,1 m con resistività 3000 Ωm sono:

$$U_{stp} = 420,4 \text{ V} \quad U_{ssp} = 1189 \text{ V} \quad U_{stp+SCL} = 773,9 \text{ V} \quad U_{ssp+SCL} = 2604 \text{ V}$$

a tensione di contatto e di passo dell'intera area sono rappresentate in *Figura 48* e *Figura 49*. dalla variazione del range di tensioni identificate con i colori, si può vedere che alcune aree superano la tensione di contatto limite senza SCL.

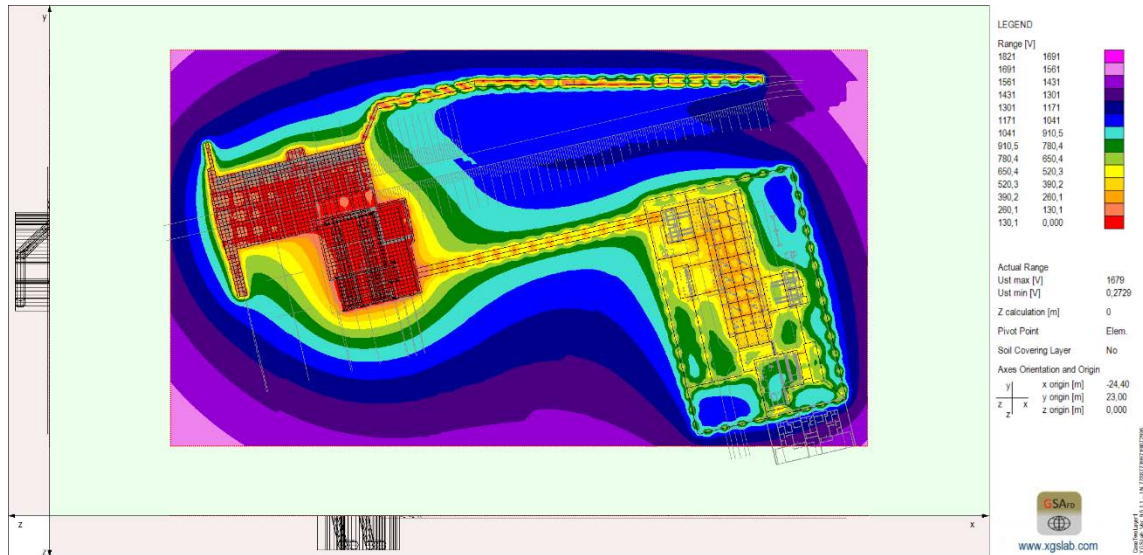


Figura 48: Distribuzione della tensione di contatto

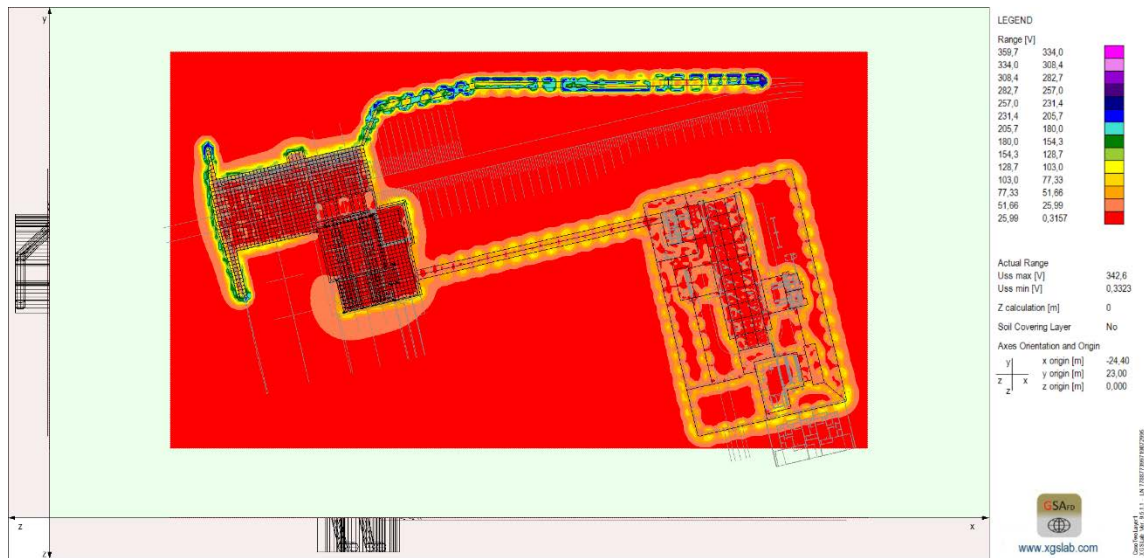


Figura 49: Distribuzione della tensione di passo

Le aree sicure sono mostrate nella Figura 50 e Figura 51, senza e con materiale superficiale.

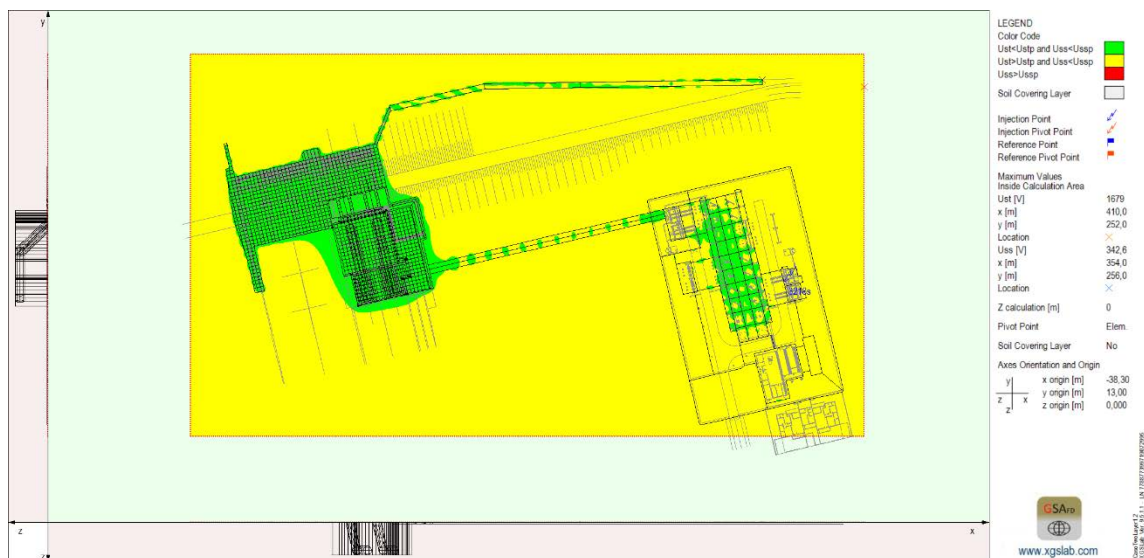


Figura 50: Aree sicure senza SCL

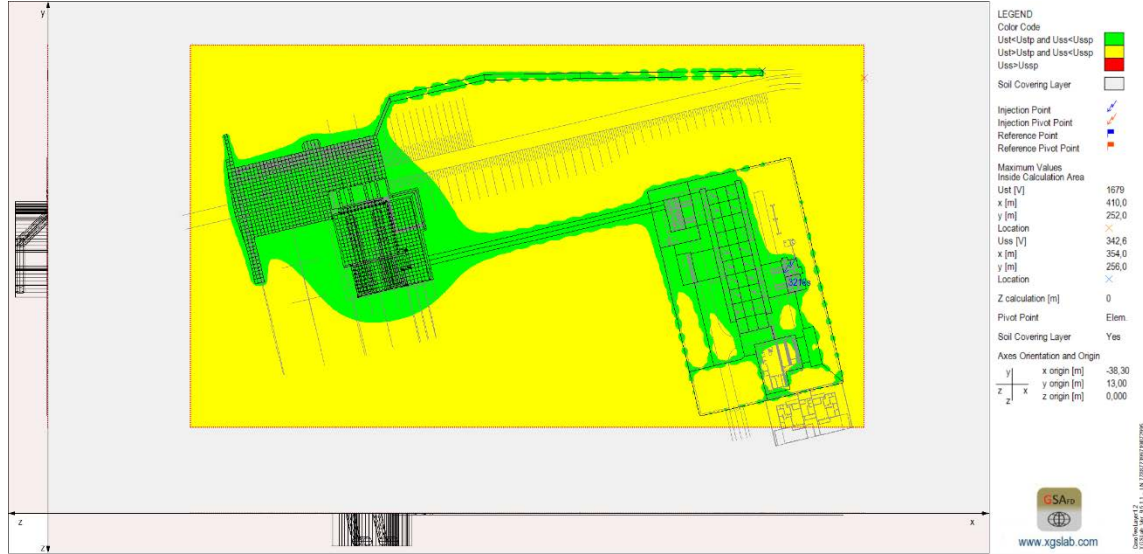


Figura 51: Aree sicure con SCL

Si può notare come senza materiale superficiale quasi tutta l'area della sottostazione ha la tensione di contatto superiore ai limiti (zone gialle), mentre con il SCL gran parte dell'area è sotto i limiti di tensione, ma ci sono ancora zone non sicure.

Per rendere sicura l'intera area, si possono aumentare i conduttori orizzontali, rendendo la maglia più fitta, oppure, dato che questo tipo di suolo ha il layer a bassa resistività nello strato inferiore, è conveniente utilizzare delle aste verticali per raggiungerlo.

Vengono studiate tre differenti modifiche della rete di terra, la prima aggiungendo delle aste lunghe 3 m nel perimetro e all'interno della sottostazione, la seconda aggiungendo una rete con conduttori distanti 15 m più l'aggiunta di aste verticali, e la terza aggiungendo una rete con conduttori distanti 10 m con l'aggiunta di aste verticali. Per la seconda rete viene simulato anche l'effetto di un rivestimento dei conduttori orizzontali con uno spessore di 100 mm di betonite. I layout delle tre reti sono mostrati rispettivamente nella Figura 52, Figura 53 e Figura 54.

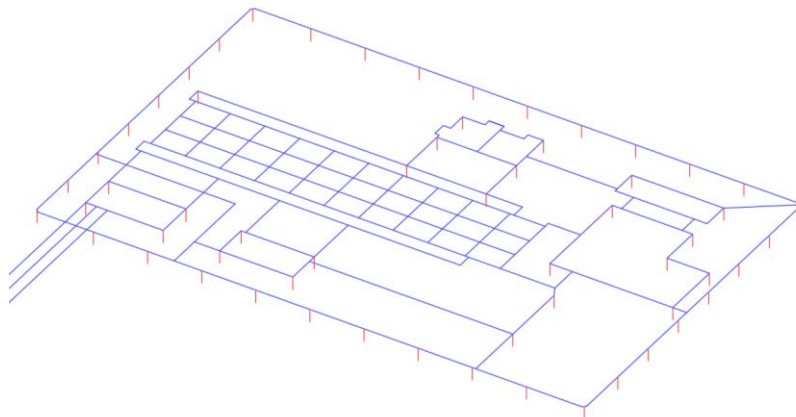


Figura 52: Layout rete di terra 1

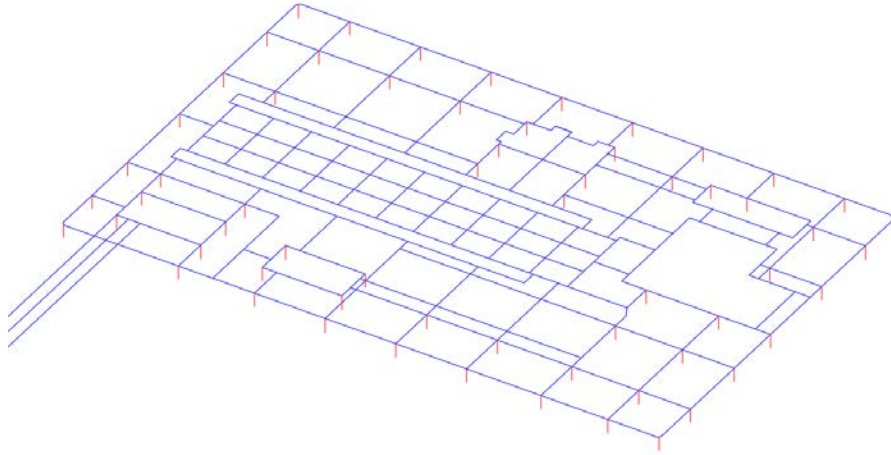


Figura 53: Layout rete di terra 2

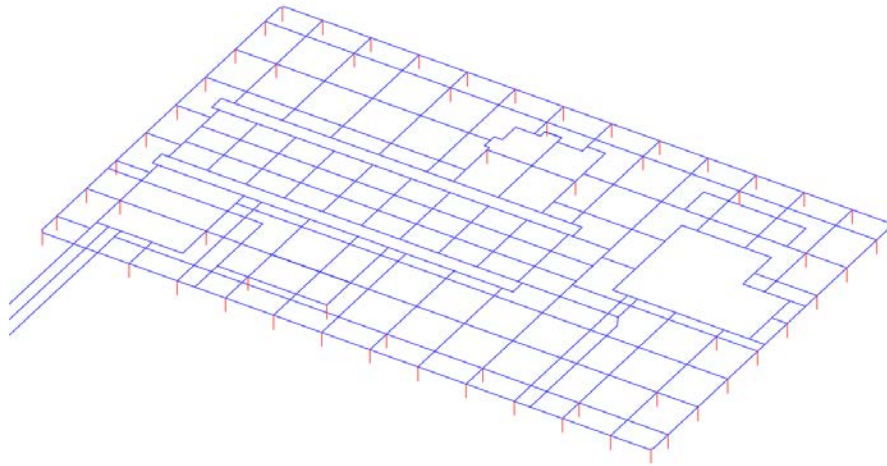


Figura 54: Layout rete di terra 3

I dati raccolti dalle simulazioni sono raccolti nella Tabella 12 sottostante. In particolare sono confrontati i valori della resistenza di terra, del potenziale di terra, della tensione di contatto e di passo, la lunghezza totale dei conduttori orizzontali e delle aste verticali.

Tabella 12: Risultati delle simulazioni con i diversi layout della rete di terra

Parametro	Layout 1		Layout 2			Layout 3	
	Senza aste	Con aste	Senza aste	Betonite	Con aste	Senza aste	Con aste
R_g [Ω]	0,642	0,6065	0,614	0,5743	0,589	0,6005	0,5781
GPR [V]	2317,5	2189,2	2216,6	2073,3	2133,4	2167,9	2086,8
Em [V]	1127	869,9	889,2	606,5	688,3	728,4	568
Es [V]	252,8	179,5	205,6	164,8	163,0	105,2	88
Lunghezza dei conduttori [m]	2189,34		2838,98			3396,34	
Lunghezza delle aste [m]	177		156			183	

Come ci si aspettava, i valori dei parametri diminuiscono con l'aggiunta delle aste verticali che raggiungono il layer inferiore a resistività più bassa. Nonostante l'utilizzo delle aste, i valori massimi di tensione di contatto superano il limite di sicurezza, che senza SCL è di 420,4 V, mentre le massime tensioni di passo sono minori del limite, che senza SCL è 1189 V. Per avere una valutazione visiva del confronto tra le tensioni di passo e di contatto rispetto ai loro limiti, la Figura 55, Figura 56 e Figura 57 mostrano le aree sicure per i diversi layout della rete di terra.

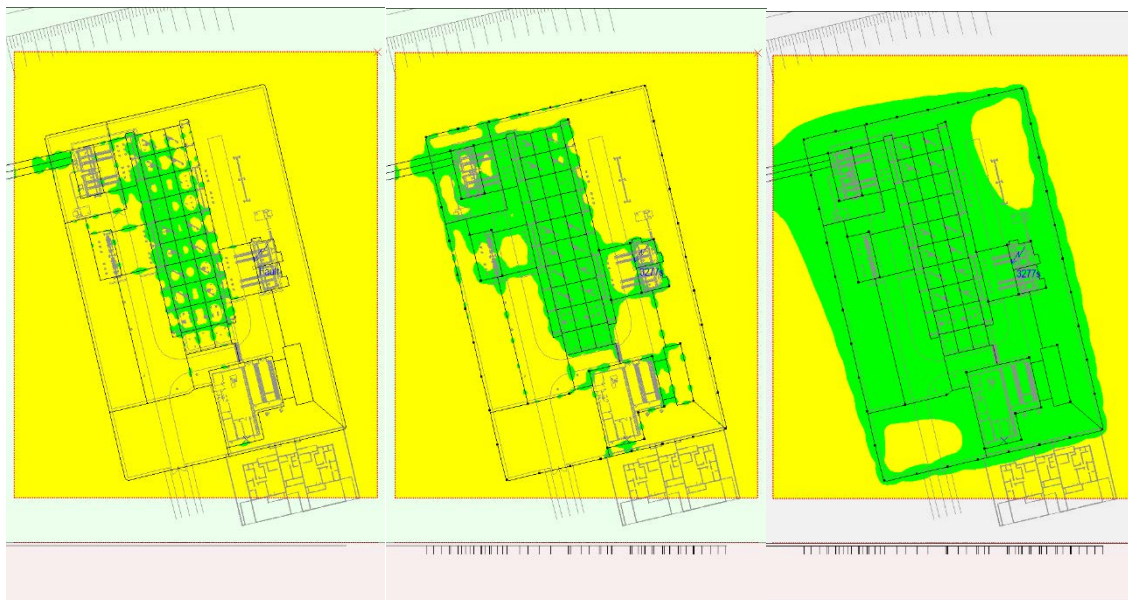


Figura 55: Aree sicure layout 1 - senza aste - con aste - con aste e SCL

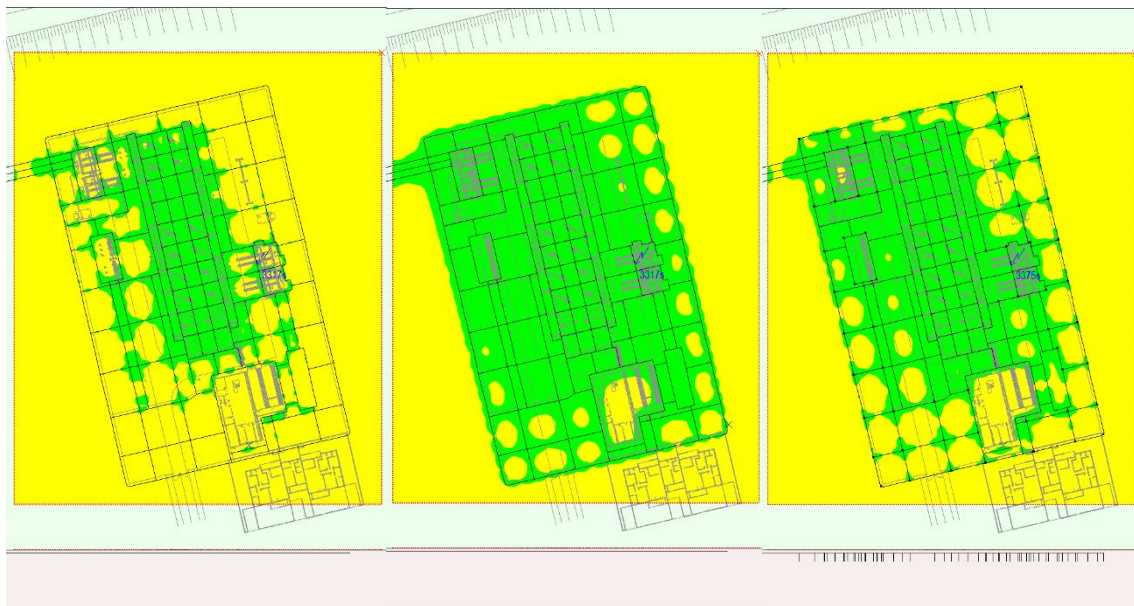


Figura 56: Aree sicure layout 2 - senza aste - conduttori coperti da betonite - con aste

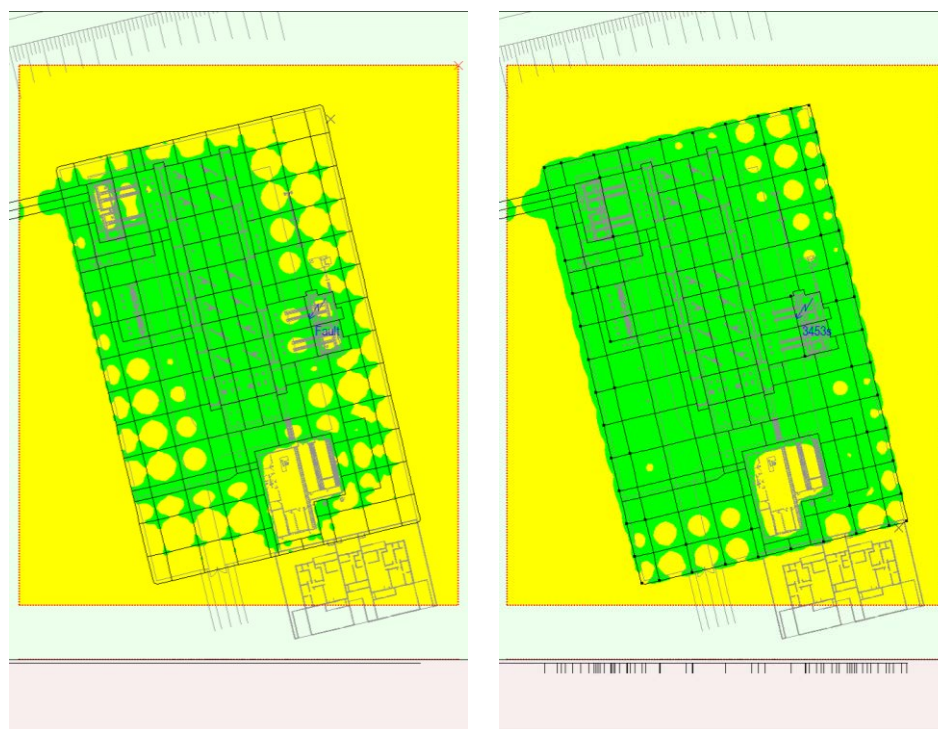


Figura 57: Aree sicure layout 3 - senza aste - con aste

In tutte e tre le figure si nota molto l'effetto dell'aggiunta delle aste verticali. In questo caso sono utili per limitare l'utilizzo del materiale superficiale quando l'area della sottostazione è molto vasta. Nell'ultima simulazione in Figura 55 è stato utilizzato uno strato di materiale superficiale

da 3000 Ωm ed alcune zone non raggiungono il limite di sicurezza, ma se si utilizzasse un materiale con resistività 5000 Ωm , il limite della tensione di contatto si alzerebbe a 4018 V e tutta l'area sarebbe al sicuro. Si può notare come la difficoltà principale sia raggiungere la sicurezza lungo il perimetro, e anche incrementando l'intensità della rete, sia necessario utilizzare un materiale di copertura superficiale, infatti i layout 2 e 3, hanno i valori massimi di tensione sotto i limiti con *SCL*. L'utilizzo della betonite che ricopre i conduttori nella seconda simulazione di Figura 56 ha un notevole impatto rendendo sicura quasi tutta l'area. La betonite è utilizzata quando il suolo ha un'alta resistività ed in questo modo si abbassa la resistività all'intorno del conduttore. Utilizzare una rete più fitta del layout 3 non è conveniente in termini economici per la quantità di conduttori necessari. Avendo una tipologia di suolo dove con la profondità la resistività diminuisce è conveniente utilizzare delle aste verticali che sono più economiche, e un layer di materiale superficiale ad alta resistività per raggiungere la sicurezza in tutta l'area.

In questo scenario è interessante analizzare come variano le tensioni pericolose al variare della lunghezza delle aste verticali. Infatti uno dei metodi per ridurre le tensioni pericolose e ridurre la resistenza di terra, quando si ha un suolo dove lo strato inferiore ha resistività più bassa, è quello di utilizzare aste di profondità. In queste simulazioni si considera il layout 2 di Figura 53 e le aste verticali vengono fatte variare da una lunghezza di 3 m fino a 10 m. In Tabella 13 sono indicate le variazioni di resistenza di terra, tensione di contatto e di passo per le diverse lunghezze delle aste, mentre la Figura 58 e la Figura 59 mostrano i relativi grafici della variazione dei parametri in esame.

Tabella 13: Variazione dei principali parametri al variare della lunghezza delle aste verticali

<i>Lunghezza aste "l" [m]</i>	<i>R_g [Ω]</i>	<i>Tensione di contatto [V]</i>	<i>Tensione di passo [V]</i>
3	0,589	688,3	163
4	0,5803	622	148,7
6	0,5652	518,9	124,7
8	0,5527	444,1	106,4
10	0,5416	387,2	91,9

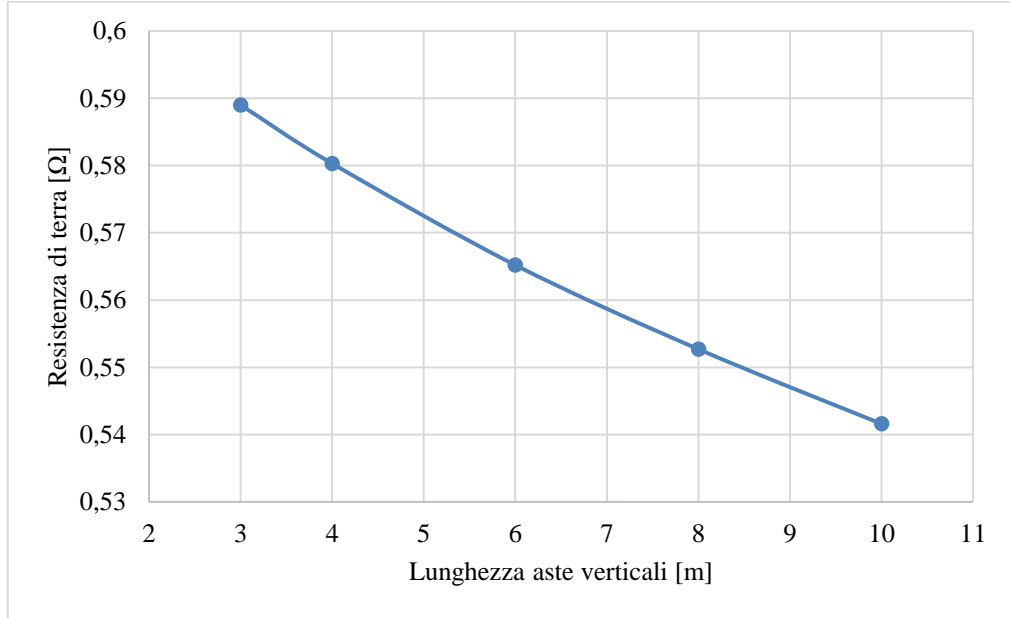


Figura 58: Variazione della resistenza di terra al variare della lunghezza delle aste verticali

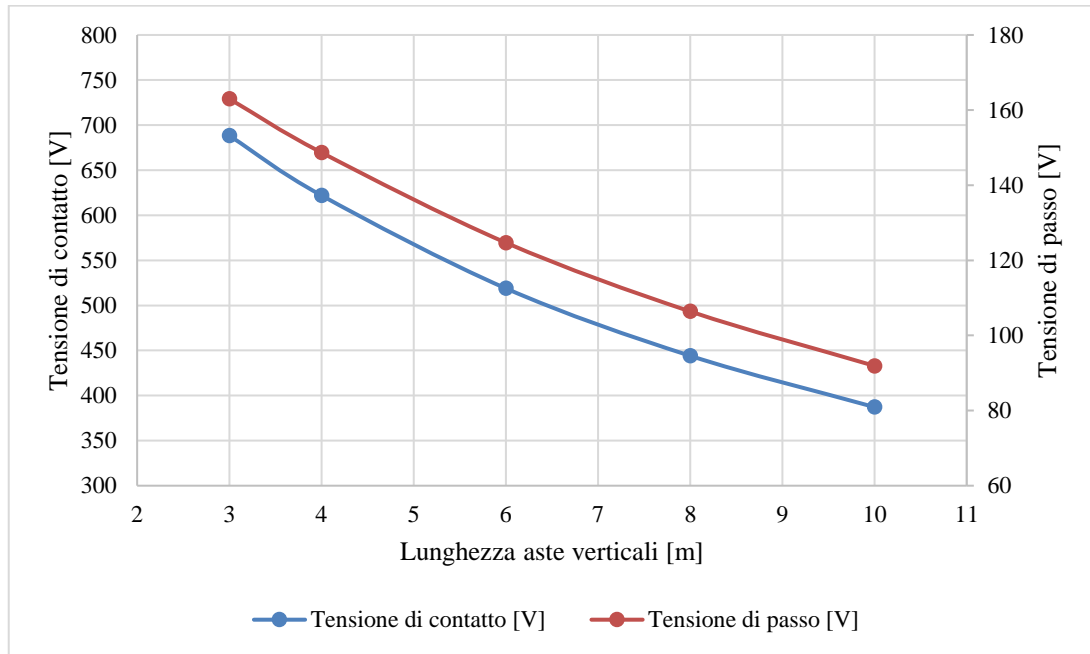


Figura 59: Variazione della tensione di contatto e di passo al variare della lunghezza delle aste verticali

Come si vede dalla tabella e dai grafici, le tensioni pericolose diminuiscono notevolmente all'aumentare della lunghezza delle aste. Per esempio da una lunghezza di 3 m ad una di 10 m, la

tensione di contatto diminuisce del 43,7% mentre la tensione di passo del 43,6%. Con la diminuzione delle tensioni pericolose, aumenta l'area sicura nella sottostazione, fino a rendere tutta l'area sicura con le aste da 10 m, come si vede dalla Figura 60.

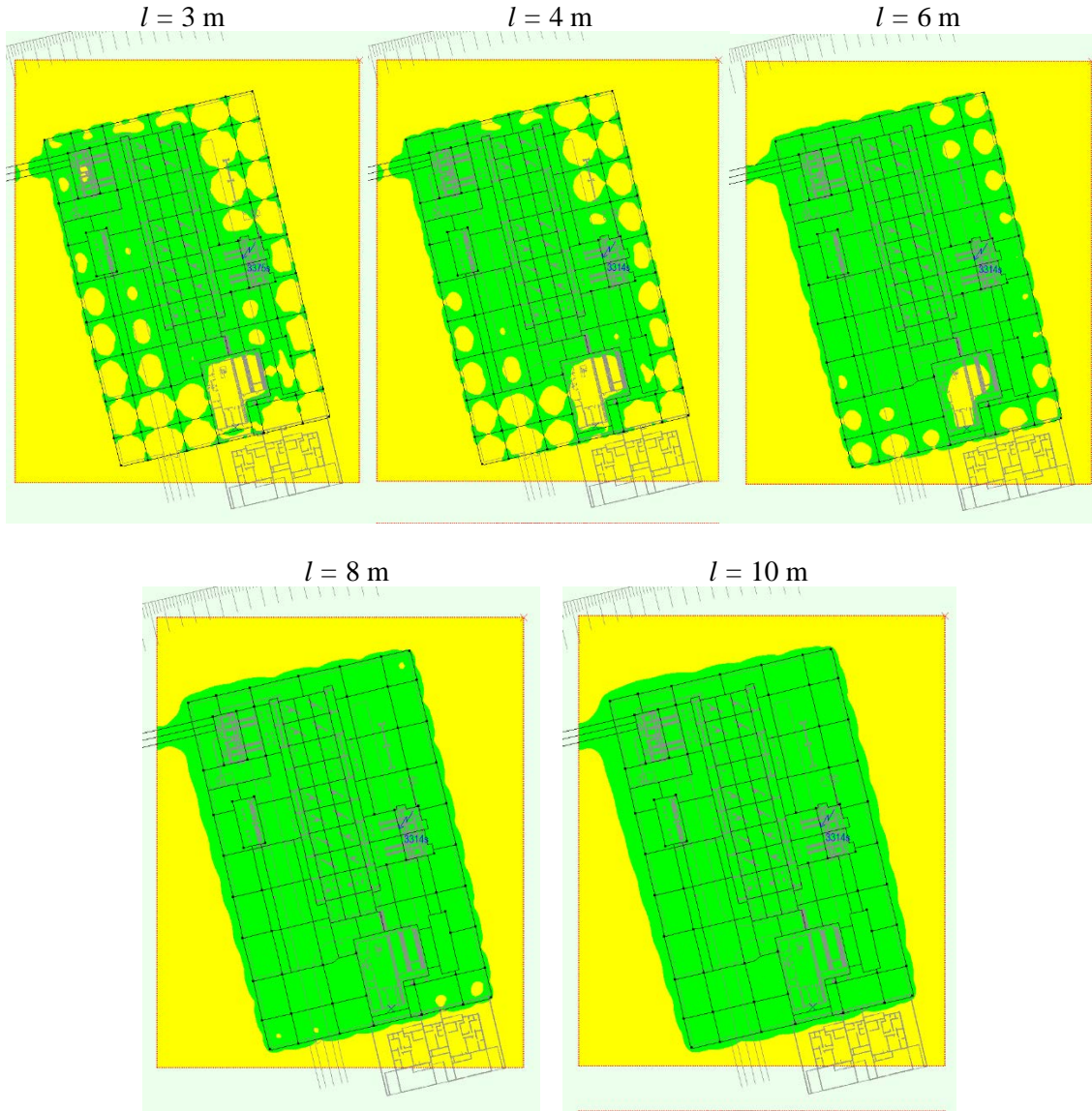


Figura 60: Aree sicure al variare della lunghezza delle aste verticali

3.4.2 Scenario 2

In questo scenario il suolo è formato da due layers dove il primo layer ha resistività 200 Ωm con spessore 2 m, mentre il secondo layer ha resistività 1000 Ωm . Considerando la rete del progetto base di Figura 16, la resistenza di terra e il *GPR* sono:

$$R_g = 1,888 \Omega$$

$$GPR = 6815.4 \text{ V}$$

Rispetto al caso precedente, la rete di terra si trova interrata nello strato con resistività minore, ma presenta una resistenza ed un potenziale di terra maggiore. Questo perché nel caso precedente c'è il contributo delle armature della power house che sono interrate a profondità più elevata nello strato a resistività minore. La Figura 61 mostra la distribuzione del potenziale di terra dell'intera area dell'impianto.

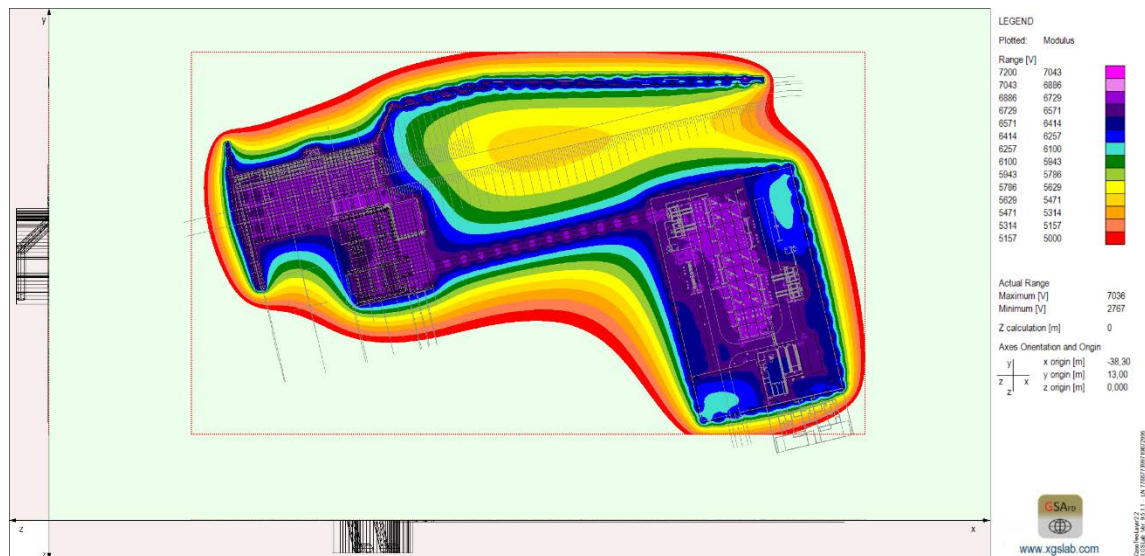


Figura 61: Distribuzione del potenziale di terra

Le tensioni limite per gli standard IEEE senza lo strato di materiale superficiale e con uno strato di 0,1 m con resistività 3000 Ωm sono:

$$U_{stp} = 215,3 \text{ V} \quad U_{ssp} = 369,1 \text{ V} \quad U_{stp+SCL} = 710,3 \text{ V} \quad U_{ssp+SCL} = 2349 \text{ V}$$

La tensione di contatto e di passo dell'intera area sono rappresentate in Figura 62 e Figura 63.

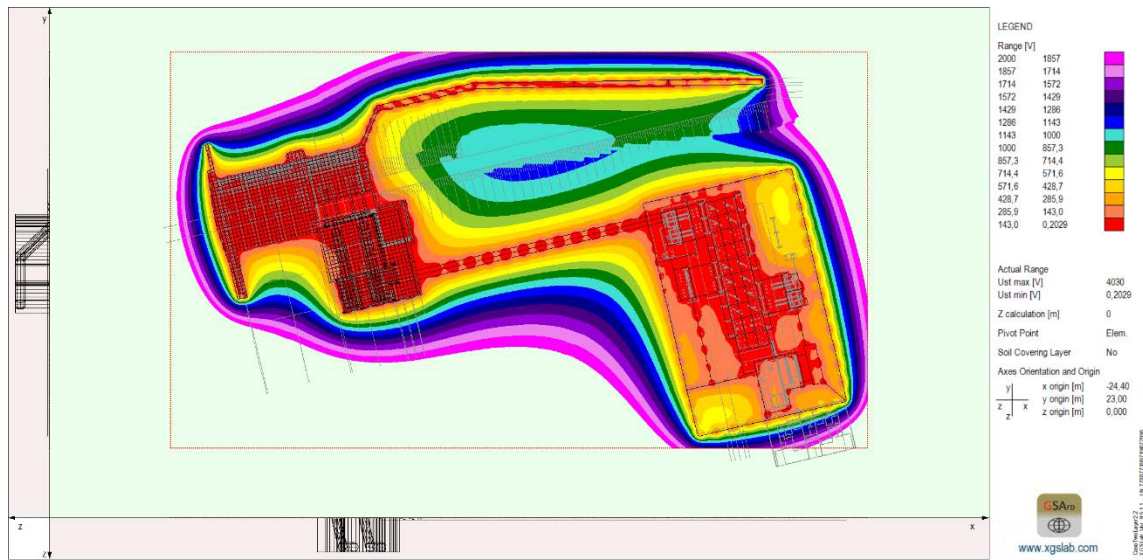


Figura 62: Distribuzione della tensione di contatto

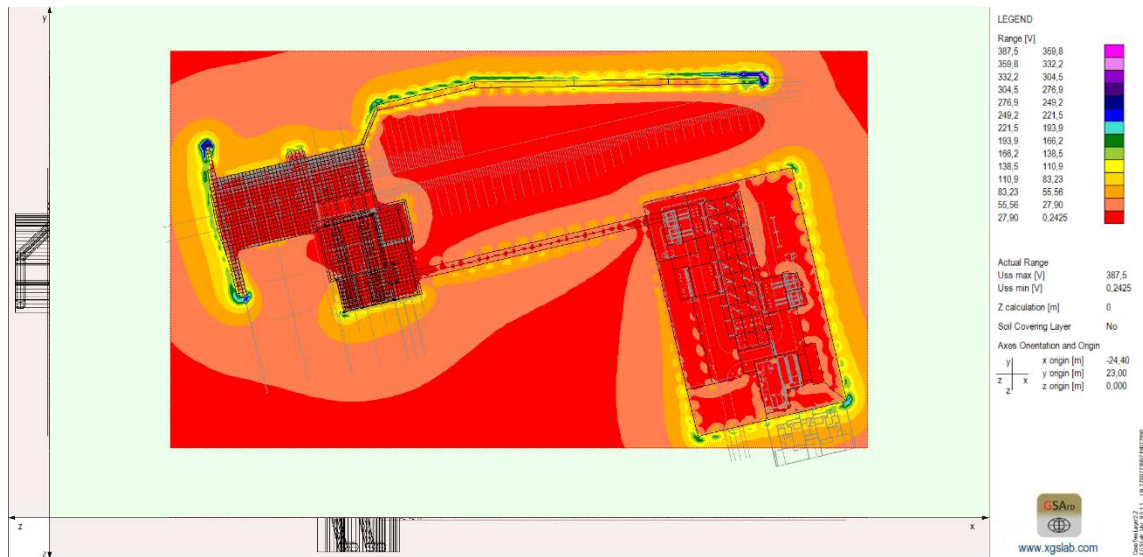


Figura 63: Distribuzione della tensione di passo

Le aree sicure sono mostrate nella Figura 64 e Figura 65, senza e con materiale superficiale.

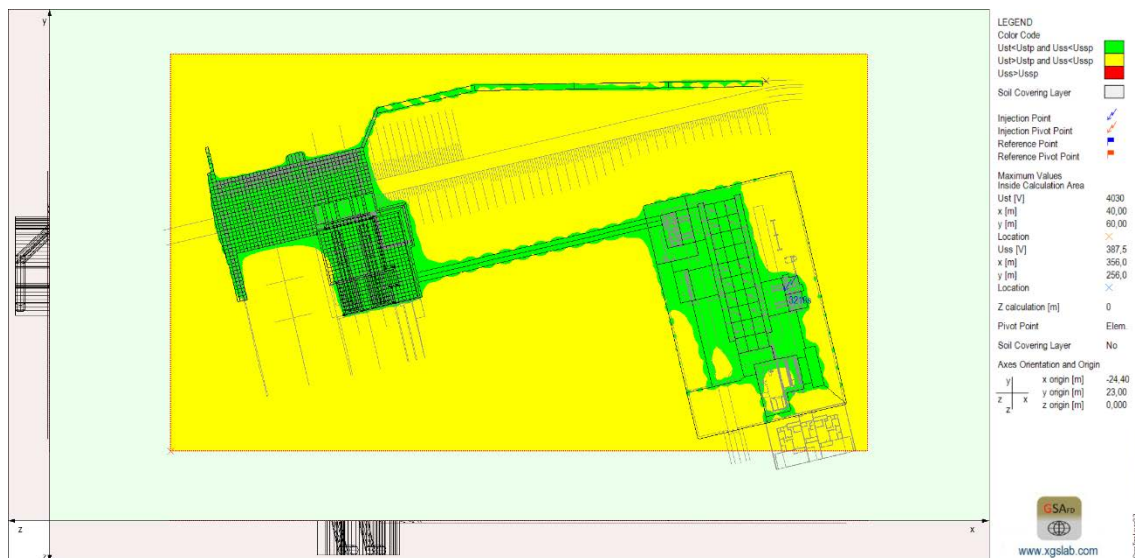


Figura 64: Aree sicure senza SCL

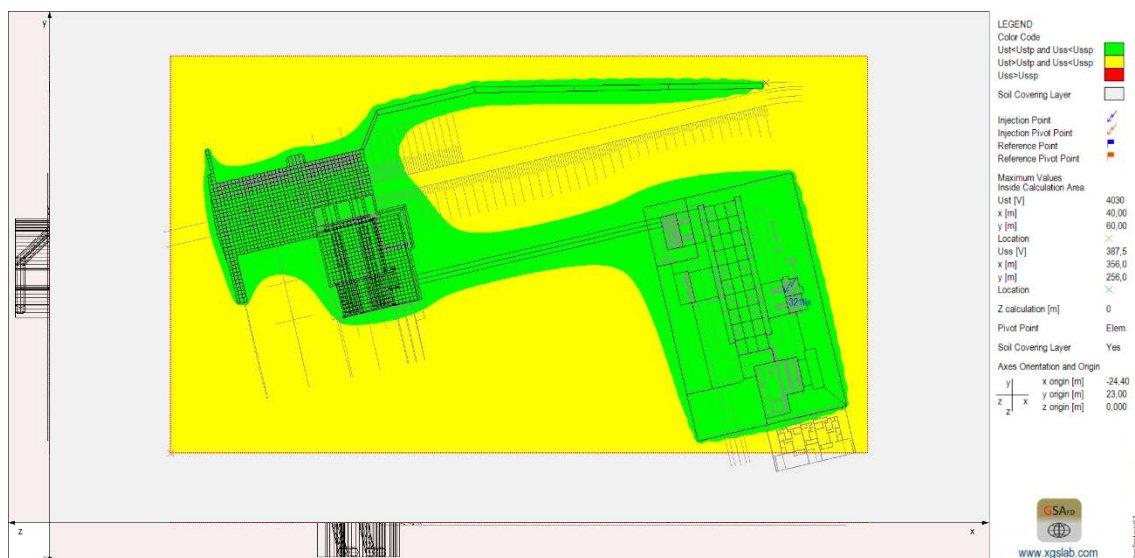


Figura 65: Aree sicure con SCL

Le aree non sicure sono solamente lungo il perimetro della recinzione dove la tensione di contatto è superiore al limite consentito ed è sufficiente aggiungere un layer di materiale superficiale per soddisfare i criteri di sicurezza. Questo scenario ha i layer invertiti rispetto al primo e nonostante abbia una resistenza di terra maggiore, è più facile raggiungere i limiti di sicurezza proprio perché la rete si trova nel layer a resistività minore quindi localmente si ha una distribuzione più uniforme delle tensioni.

Anche se i criteri di sicurezza sono stati raggiunti, per scopo di studio si analizzano i layout di Figura 52 e Figura 53, riassumendo e confrontando i parametri nella tabella seguente.

Tabella 14: Risultati delle simulazioni con i diversi layout della rete di terra

<i>Parametro</i>	<i>Layout 1</i>		<i>Layout 2</i>	
	<i>Senza aste</i>	<i>Con aste</i>	<i>Senza aste</i>	<i>Con aste</i>
<i>Rg [Ω]</i>	1,888	1,883	1,878	1,875
<i>GPR [V]</i>	6815,4	6799	6778,6	6770
<i>Em [V]</i>	615	567,4	513,9	463,1
<i>Es [V]</i>	163,7	130	137,8	126,3
<i>Lunghezza totale dei conduttori [m]</i>	2189,34		2838,98	
<i>Lunghezza totale delle aste [m]</i>	177		186	

Il valore della resistenza di terra non varia molto con l'aggiunta delle aste verticali, per le tensioni di contatto invece si nota un leggero abbassamento, intorno all'8%. In questo caso essendo il layer inferiore con una resistività più alta l'utilizzo delle aste non causa miglioramenti consistenti, a differenza di un aumento dei conduttori orizzontali che causa una diminuzione del 16% della tensione di contatto. Per avere una valutazione visiva del confronto tra le tensioni di

passo e di contatto rispetto ai loro limiti, la

Figura 66 e

Figura 67 mostrano le aree sicure per i diversi layout della rete di terra.

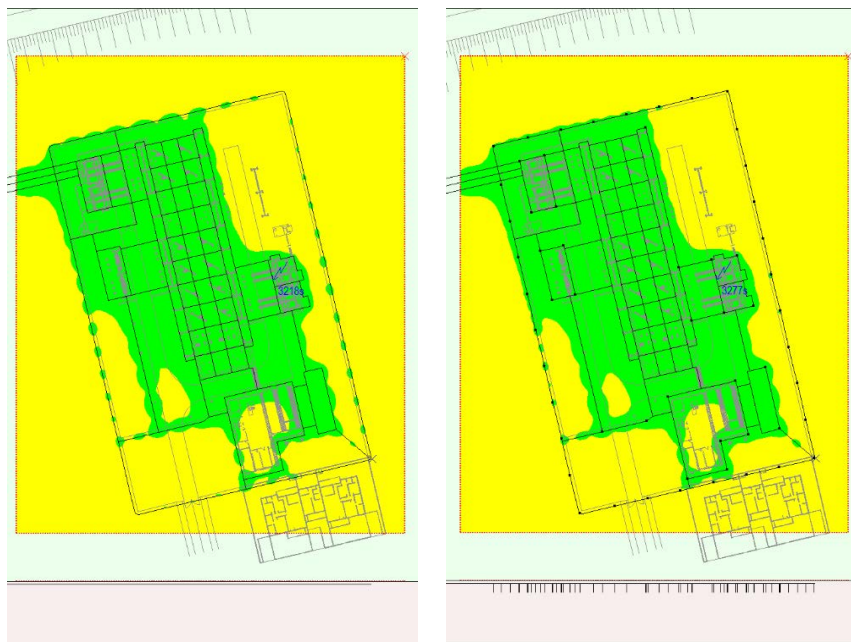


Figura 66: Aree sicure layout 1 - Senza aste - Con aste

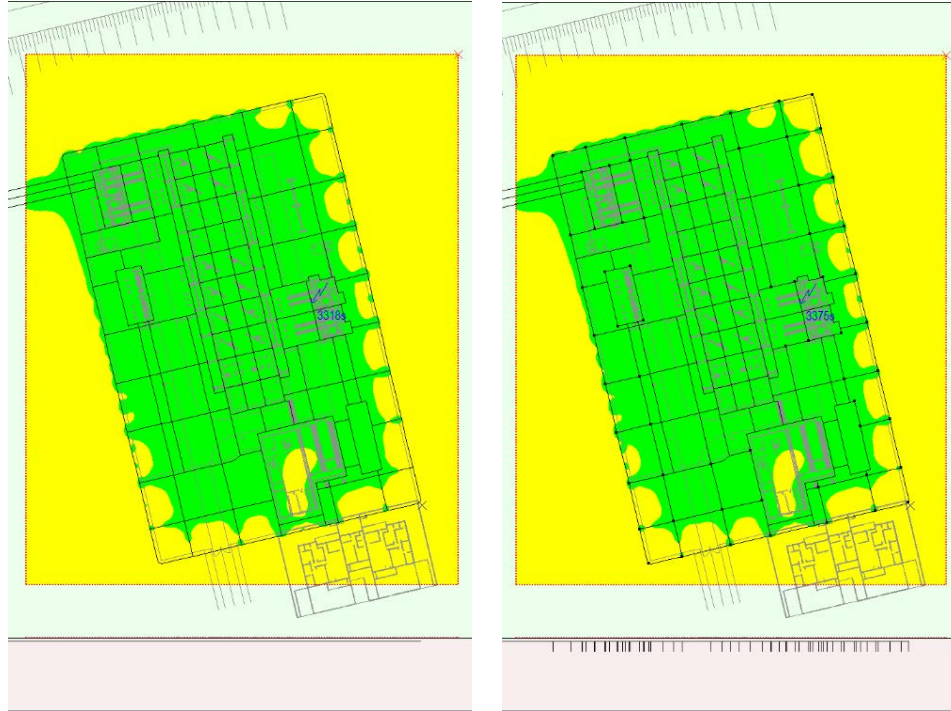


Figura 67: Aree sicure layout 2 - Senza aste - Con aste

Le due immagini che rappresentano le aree sicure senza e con le aste verticali, per i due diversi layout, sono molto simili, ciò significa che l'effetto delle aste è minimo. Per vedere meglio la variazione di tensione di contatto e di passo, si possono calcolare lungo una direttrice, in questo caso la diagonale della sottostazione di Figura 26. I grafici risultanti sono mostrati nelle Figure seguenti.



*Figura 69: Tensione di contatto e di passo lungo la diagonale layout 2
- Alto senza aste - Basso con aste*

3.4.3 Scenario 3

In questo scenario il suolo è formato da due layers dove il primo layer ha resistività 500 Ωm con spessore 2 m, mentre il secondo layer ha resistività 200 Ωm . È un caso simile allo scenario 1 ma con resistività dei layer più comuni. Considerando la rete del progetto base di Figura 16, la resistenza di terra e il *GPR* sono:

$$R_g = 0,2671 \Omega$$

$$GPR = 964,2 \text{ V}$$

In Figura 70 è rappresentata la distribuzione del potenziale di terra.

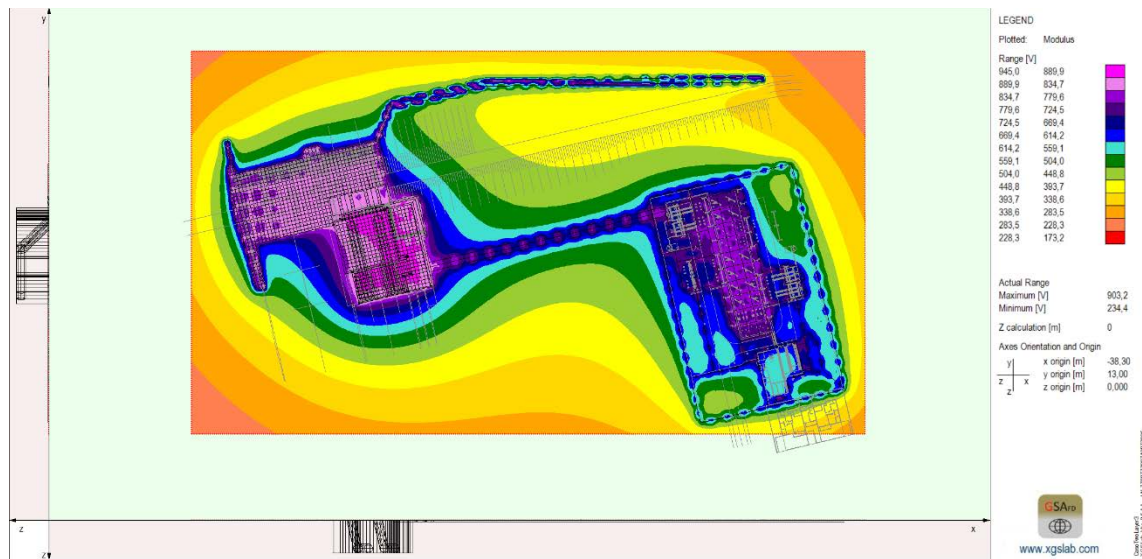


Figura 70: Distribuzione del potenziale di terra

Le tensioni limite per gli standard IEEE senza lo strato di materiale superficiale e con uno strato di 0,1 m con resistività 3000 Ωm sono:

$$U_{stp} = 266,58 \text{ V} \quad U_{ssp} = 574,17 \text{ V} \quad U_{stp+SCL} = 726,2 \text{ V} \quad U_{ssp+SCL} = 2412,7 \text{ V}$$

La tensione di contatto e di passo dell'intera area sono rappresentate in Figura 71 e Figura 72.

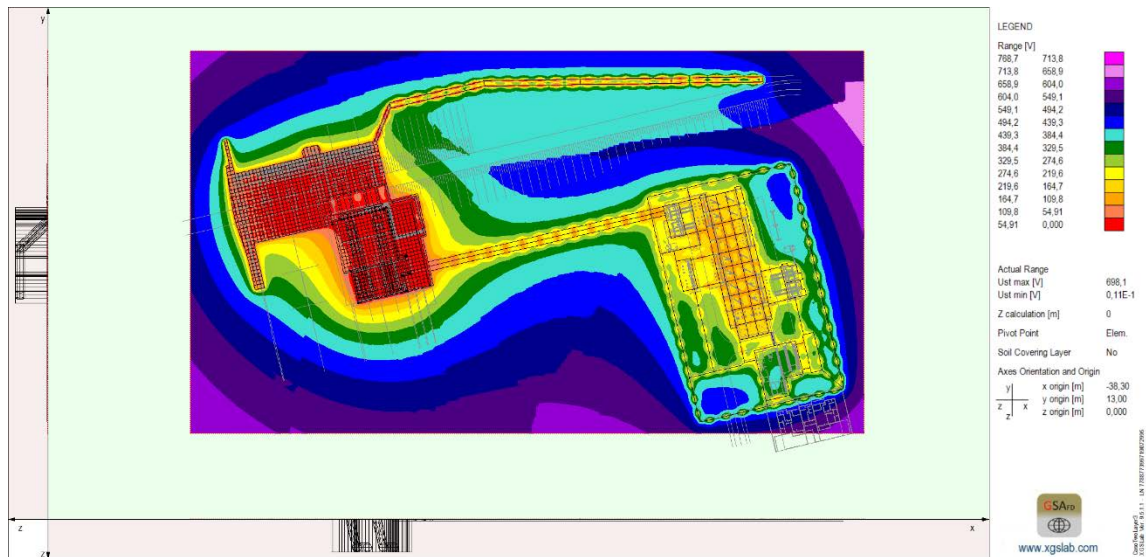


Figura 71: Distribuzione della tensione di contatto

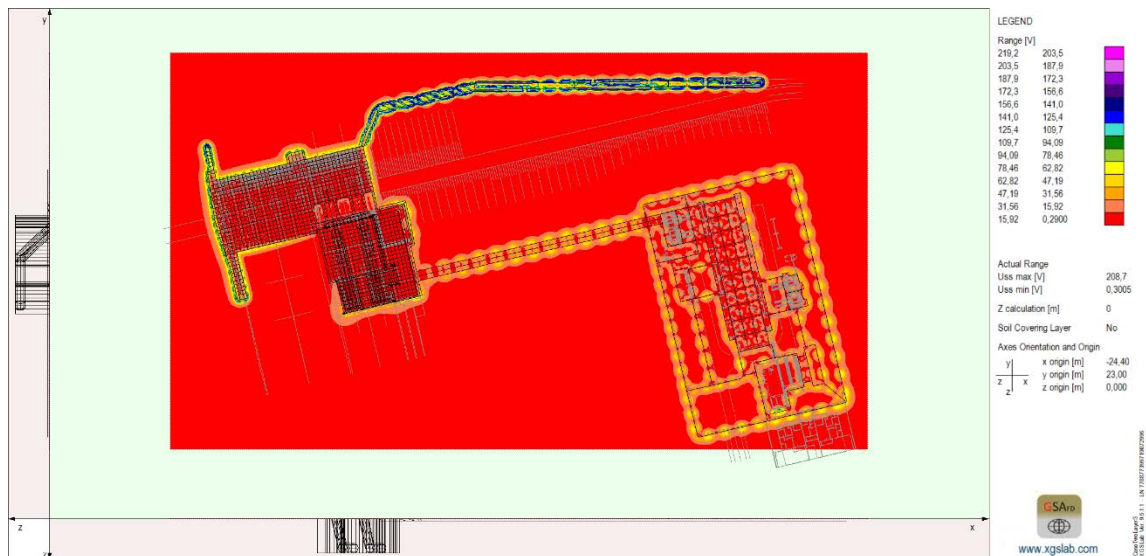


Figura 72: Distribuzione della tensione di passo

Le aree sicure sono mostrate nella Figura 73 senza l'utilizzo dello strato di materiale superficiale, mentre la Figura 74 mostra il dettaglio della sottostazione senza e con lo strato di materiale superficiale.

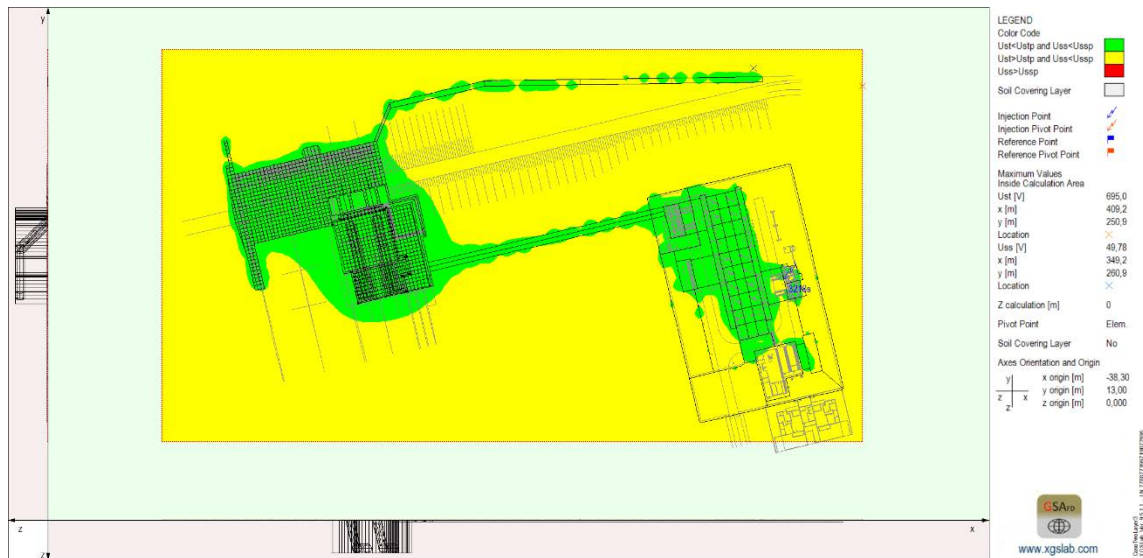


Figura 73: Aree sicure senza SCL

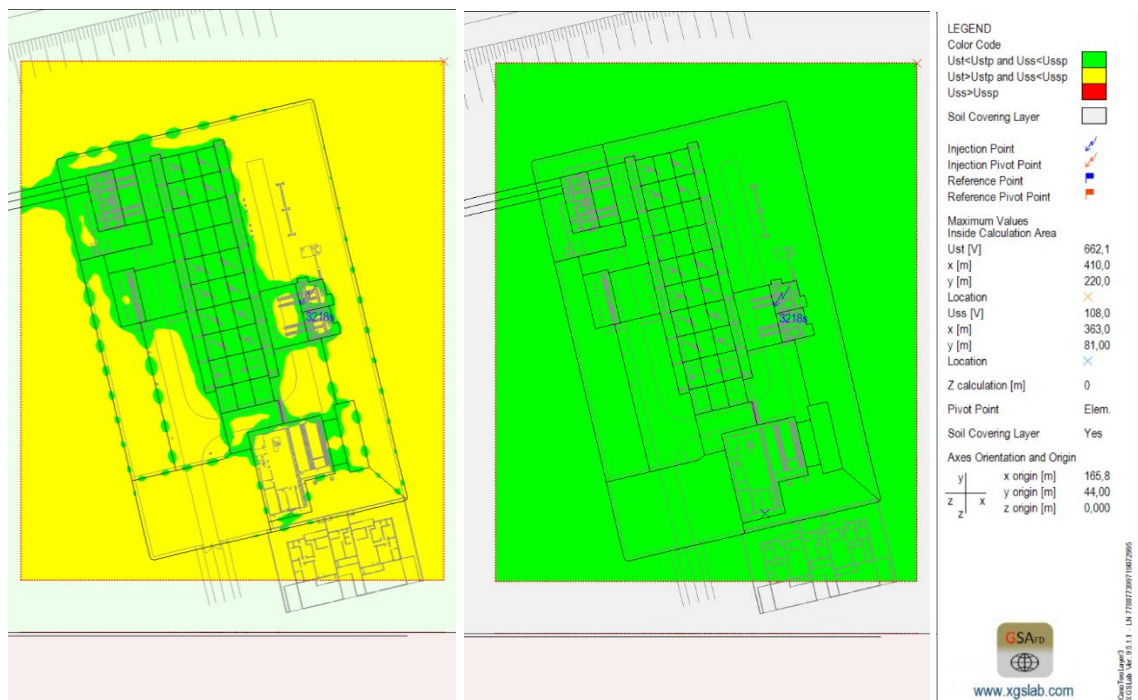


Figura 74: Aree sicure nella sottostazione senza e con SCL

Come si può notare con l'aggiunta di un layer di materiale superficiale ad alta resistenza di raggiunge facilmente la condizione di sicurezza. In questo caso la corrente di guasto a terra è relativamente bassa, e con una resistività del suolo non troppo elevata, i limiti di sicurezza si

raggiungono aggiungendo un SCL. Si possono studiare altre possibili soluzioni, per esempio utilizzando il layout 1 e 2 della rete di terra, rispettivamente Figura 52 e Figura 53. I dati raccolti dalle simulazioni sono raccolti nella Tabella 15 dove vengono confrontati i valori della resistenza di terra, del potenziale di terra, della tensione di contatto e di passo, la lunghezza totale dei conduttori orizzontali e delle aste verticali.

Tabella 15: Risultati delle simulazioni con i diversi layout della rete di terra

Parametro	Layout 1		Layout 2	
	<i>Senza aste</i>	<i>Con aste</i>	<i>Senza aste</i>	<i>Con aste perimetrali</i>
<i>R_g [Ω]</i>	0,2671	0,2518	0,2539	0,2469
<i>GPR [V]</i>	964,2	909	916,7	891,3
<i>E_m [V]</i>	662,1	361,4	370,6	305,6
<i>E_s [V]</i>	108	74,7	85,6	75,2
<i>Lunghezza totale dei conduttori [m]</i>	2189,34		2838,98	
<i>Lunghezza totale delle aste [m]</i>	177		87	

In questo scenario l'aggiunta delle aste che raggiungono il layer a bassa resistività del suolo, ha un alto impatto sulla tensione di contatto, infatti nel layout 1 si ha una riduzione della tensione del 45,4 % mentre nel layout 2 con le sole aste perimetrali, la riduzione è del 17,5 %. Per avere una valutazione visiva del confronto tra le tensioni di passo e di contatto rispetto ai loro limiti, la Figura 75 e Figura 76 mostrano le aree sicure per i diversi layout della rete di terra.



Figura 75: Aree sicure layout 1 - Senza aste - Con aste

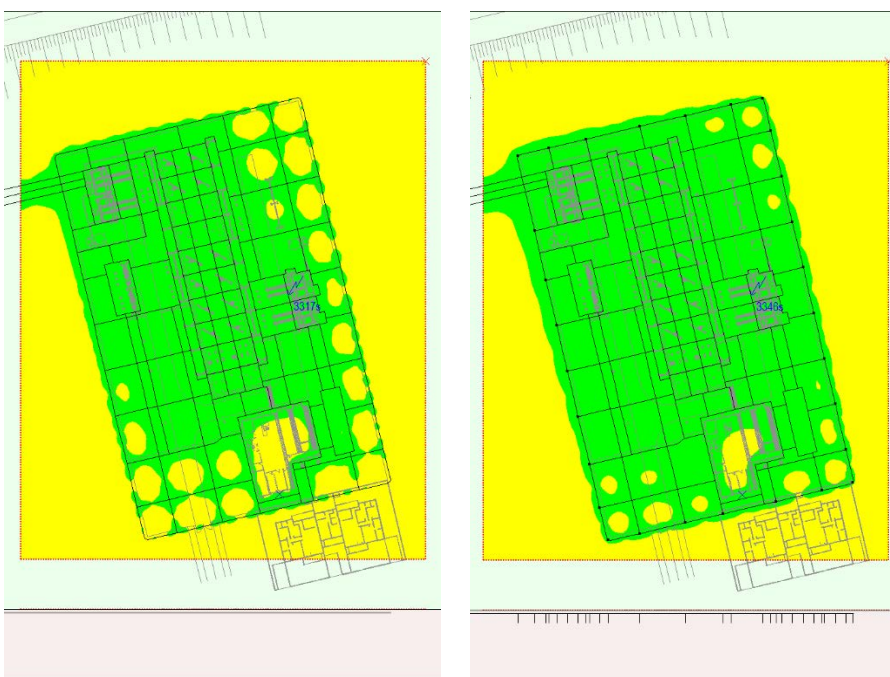


Figura 76: Aree sicure layout 2 - Senza aste - Con aste

Il layout 2 utilizza un numero di conduttori orizzontali molto più elevato, e necessita ugualmente del materiale superficiale in alcuni punti. Il layout 1 con le aste verticali raggiunge risultati molto simili, in termini di tensione massima di contatto e di passo, utilizzando meno materiale, risultando quindi più economico.

3.4.4 Scenario 4

In questo scenario si considera il modello del suolo uniforme con resistività 490 Ωm , questo scenario è interessante per analizzare ulteriormente le differenze con gli standard IEEE, dato che ha lo stesso modello del suolo. Si differenzi da quello del paragrafo 3.3.1 dal fatto che in questo caso la geometria della rete di terra è libera, in modo da poter scegliere la configurazione migliore, inoltre viene preso in considerazione il collegamento con l'impianto di terra della power house. Considerando la rete del progetto base di Figura 16, la resistenza di terra e il *GPR* sono:

$$R_g = 1,178 \Omega$$

$$GPR = 4252,8 \text{ V}$$

Le Figura 77 mostra la distribuzione del potenziale di terra.

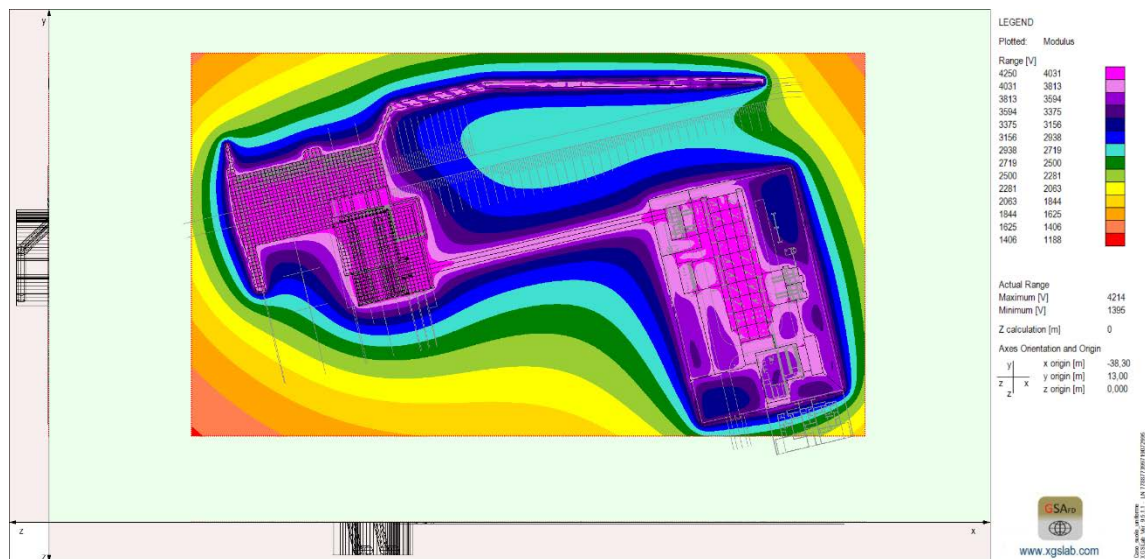


Figura 77: Distribuzione del potenziale di terra

Le tensioni limite per gli standard IEEE senza lo strato di materiale superficiale e con uno strato di 0,1 m con resistività 3000 Ωm sono:

$$U_{stp} = 289,6 \text{ V}$$

$$U_{ssp} = 666,4 \text{ V}$$

$$U_{stp+SCL} = 733,4 \text{ V}$$

$$U_{ssp+SCL} = 2441 \text{ V}$$

La tensione di contatto e di passo dell'intera area sono rappresentate in Figura 78 e Figura 79.

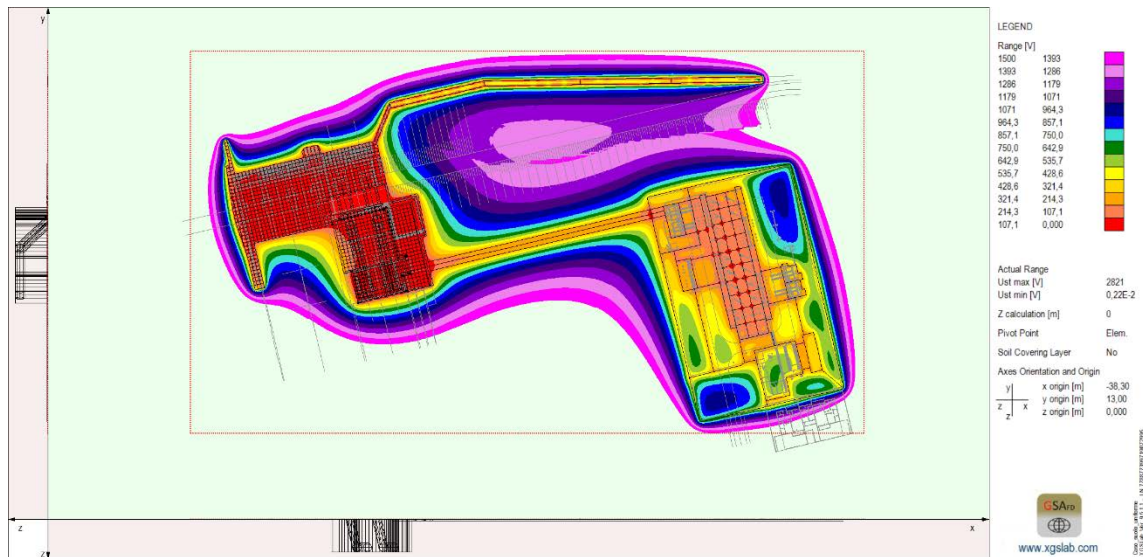


Figura 78: Distribuzione della tensione di contatto

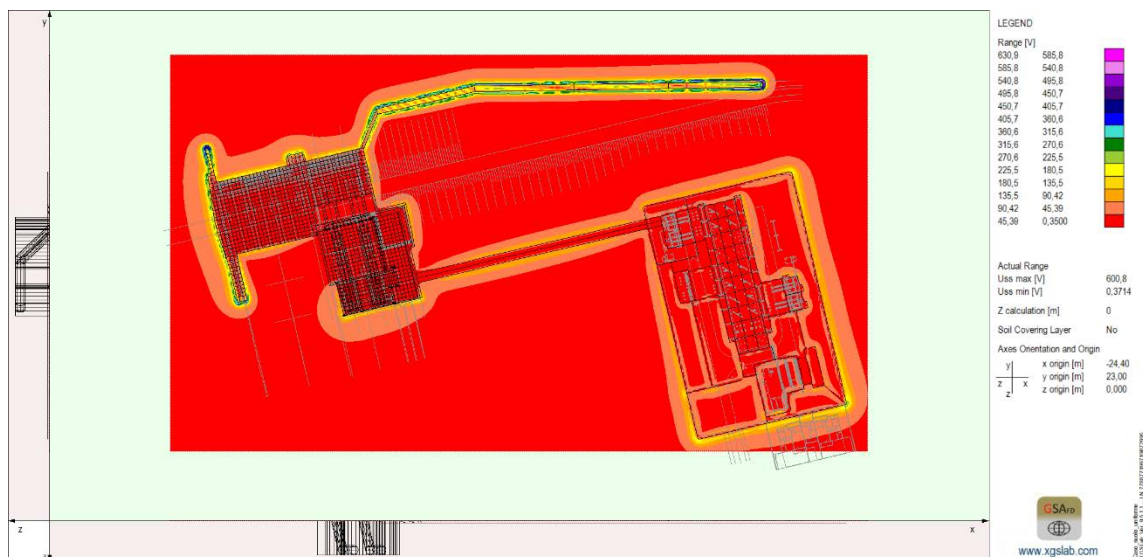


Figura 79: Distribuzione della tensione di passo

Le aree sicure sono mostrate nella Figura 80 senza l'utilizzo dello strato di materiale superficiale, mentre la Figura 81 mostra il dettaglio della sottostazione senza e con lo strato di materiale superficiale.

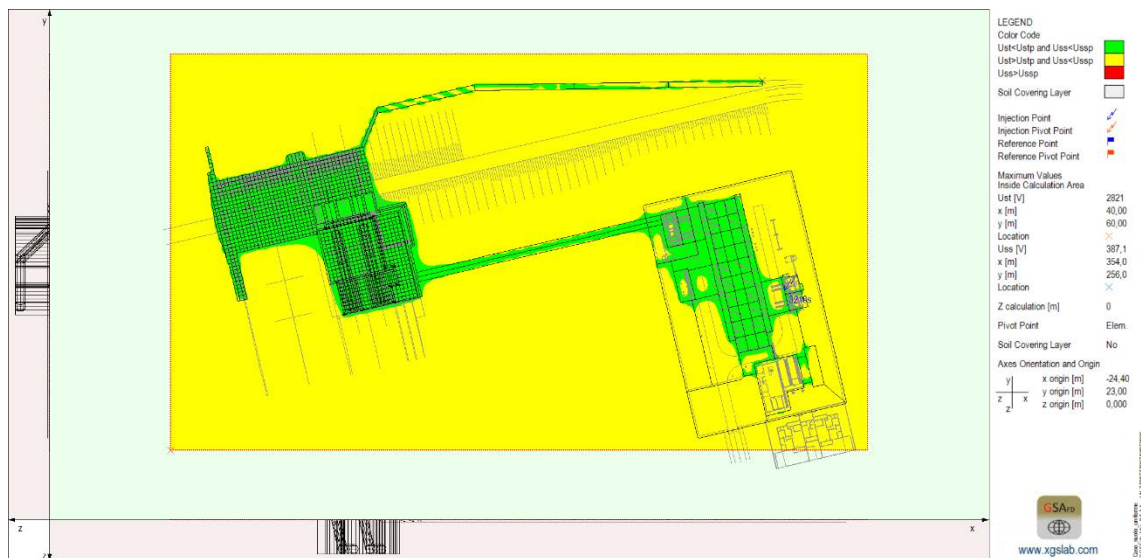


Figura 80: Aree sicure senza SCL

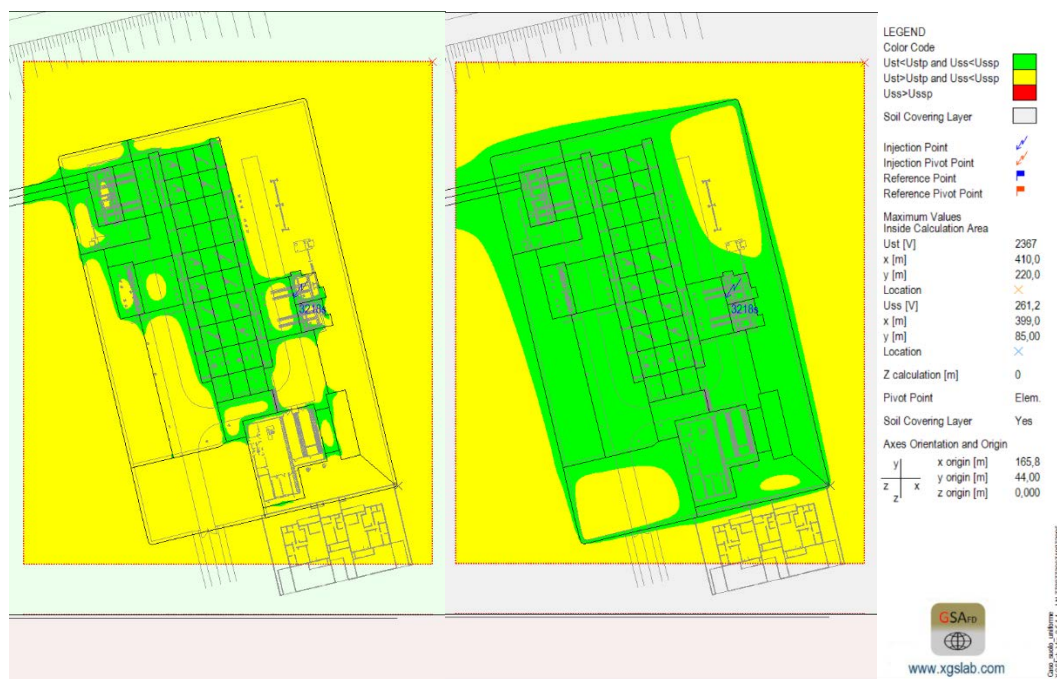


Figura 81: Aree sicure nella sottostazione senza e con SCL

Con l'aggiunta di un SCL si raggiunge la sicurezza in quasi tutta l'area della sottostazione, alcune zone agli angoli del recinto però possono essere pericolose, come l'utilizzo di dispositivi nelle zone gialle collegati allo stesso impianto di terra della sottostazione. Si sono studiate quindi le diverse configurazioni della rete per raggiungere i limiti di sicurezza dei layout in Figura 52, Figura 53 e Figura 54 per individuare i parametri più influenti.

I dati raccolti dalle simulazioni sono raccolti nella Tabella 16 dove vengono confrontati i valori della resistenza di terra, del potenziale di terra, della tensione di contatto e di passo, la lunghezza totale dei conduttori orizzontali e delle aste verticali.

Tabella 16: Risultati delle simulazioni con i diversi layout della rete di terra

Parametro	Layout 1		Layout 2		Layout 3	
	<i>Senza aste</i>	<i>Con aste</i>	<i>Senza aste</i>	<i>Con aste</i>	<i>Senza aste</i>	<i>Con aste</i>
$R_g [\Omega]$	1,178	1,168	1,157	1,150	1,149	1,142
$GPR [V]$	4252,8	4216,1	4176,5	4152,9	4146,1	4122,8
$Em [V]$	1028	931,3	709,9	634,9	587,5	475,5
$Es [V]$	151,9	133,4	133,6	118,3	135,1	121,1
<i>Lunghezza totale dei conduttori [m]</i>	2189,34		2838,98		3396,34	
<i>Lunghezza totale delle aste [m]</i>	177		186		221	

Dalla tabella si vede che una rete più fitta, aumentando i conduttori orizzontali, ha una notevole diminuzione della tensione massima di contatto, dal layout 1 al layout 3 si ha una riduzione del 42,9%. Per contro si ha una notevole quantità di rame in più, il 55,1% in più. L'utilizzo di aste verticali ricuce lievemente la tensione di contatto, circa del 10% nei primi due layout e del 20% nel terzo. Guardando i massimi valori di tensione di passo e contatto, nei layout 2 e 3 risultano inferiori rispetto al limite con *SCL*, mentre per il layout 1 la tensione di contatto è superiore. Per avere una valutazione visiva del confronto tra le tensioni di passo e di contatto rispetto ai loro limiti, la Figura 82, Figura 83 e Figura 84 mostrano le aree sicure per i diversi layout della rete di terra

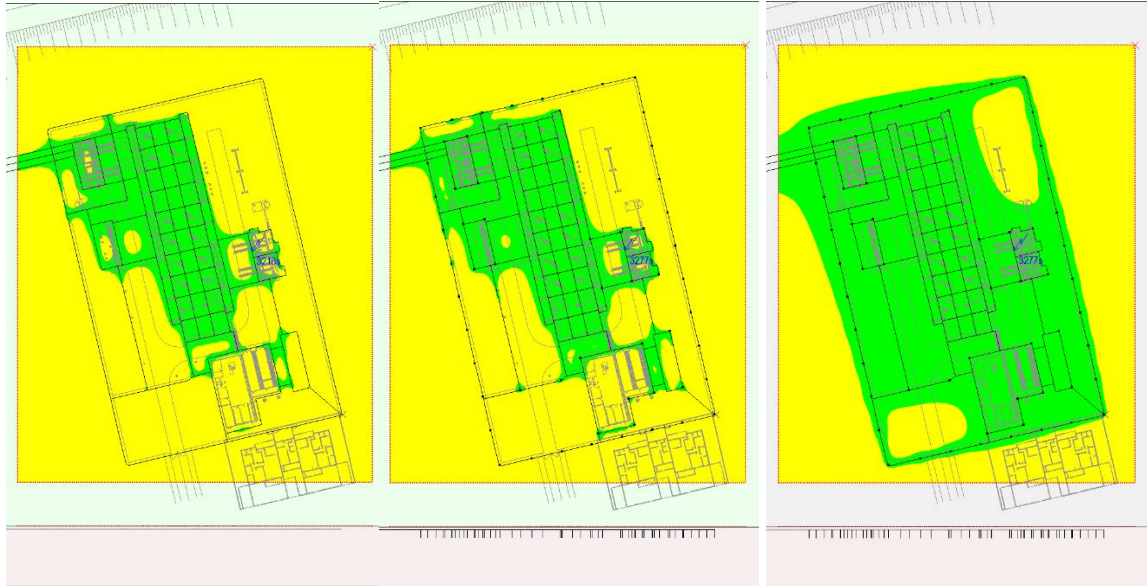


Figura 82: Aree sicure layout 1 - Senza aste - Con aste – Con aste e SCL

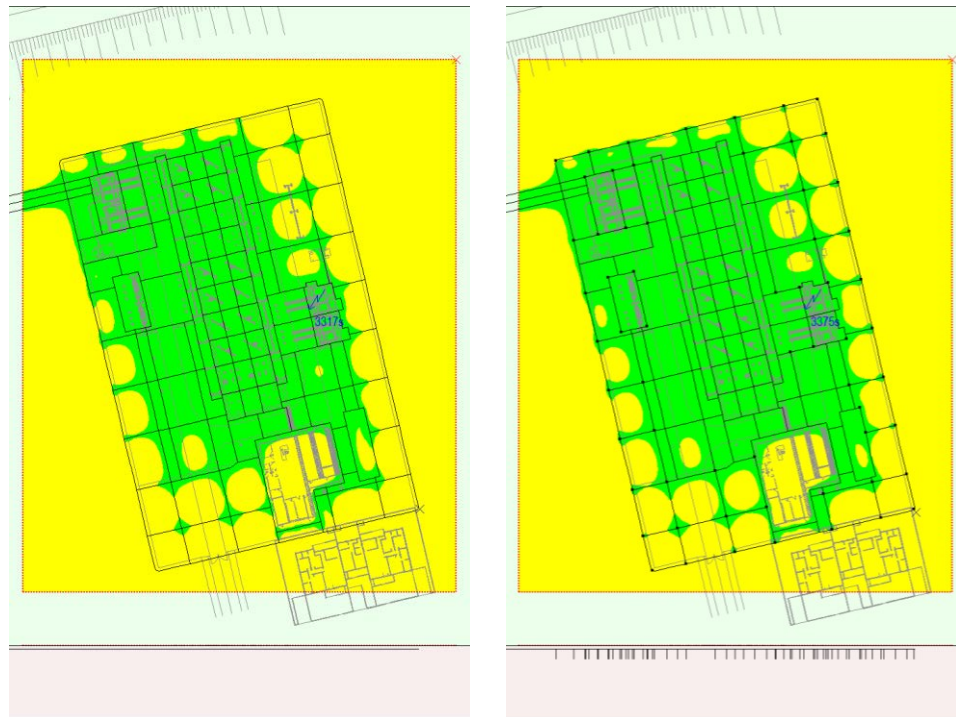


Figura 83: Aree sicure layout 2 - Senza aste - Con aste

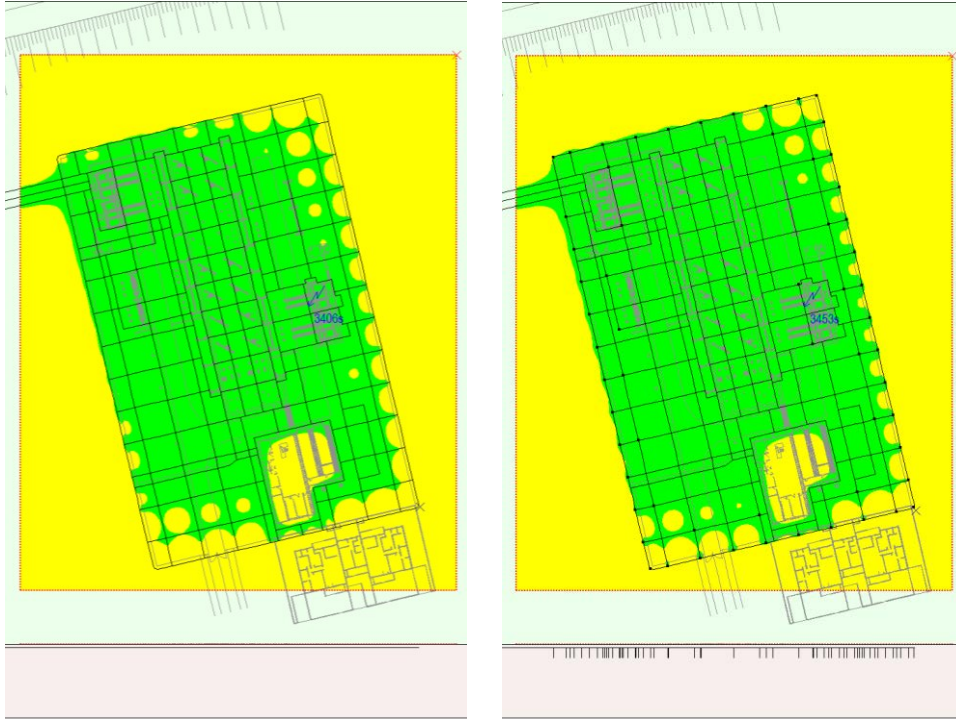


Figura 84: Aree sicure layout 3 - Senza aste - Con aste

Nessuno dei layout soddisfa i limiti di sicurezza senza *SCL*. Il layout 1 non li soddisfa nemmeno con l'*SCL*, ma può raggiungere la sicurezza con un materiale a resistività $5000 \Omega\text{m}$ che comparta i limiti $U_{stp}+SCL = 1087 \text{ V}$ e $U_{ssp}+SCL = 3856 \text{ V}$.

In caso di suolo uniforme aumentare la quantità di conduttori orizzontali porta ad un calo dei valori di tensione di contatto ma utilizza un'eccessiva quantità di materiale, inoltre nelle zone perimetrali la sicurezza è difficile da raggiungere senza l'utilizzo dell'*SCL*. L'utilizzo di rods anche se ha un lieve effetto nella diminuzione delle tensioni pericolose è una soluzione più economica, ed anch'essa deve essere associata all'utilizzo di un *SCL*.

Con il tipo di suolo uniforme, è interessante osservare la variazione dei parametri al variare della profondità della rete. Per queste simulazioni si considera il layout due di Figura 53 senza le aste verticali. La variazione dei parametri principali, ovvero la resistenza di terra, la tensione massima di contatto e di passo, sono mostrati in Tabella 17 al variare della profondità di interrimento, mentre la Figura 85 e la Figura 86 mostrano i relativi grafici della variazione dei parametri in esame.

Tabella 17: Variazione dei parametri al variare della profondità di interrimento

Profondità "p" [m]	Rg [Ω]	Tensione di contatto [V]	Tensione di passo [V]
0,2	1,17	834,2	354,8
0,4	1,166	784,4	244,4
0,6	1,162	750,6	197,1
0,8	1,159	726,9	159
1	1,157	709,9	133,6
1,2	1,154	696,5	124,6
1,4	1,152	696,7	116,9
1,5	1,151	710,9	113,5
1,6	1,15	724,1	110,3
1,8	1,148	748,7	104,5

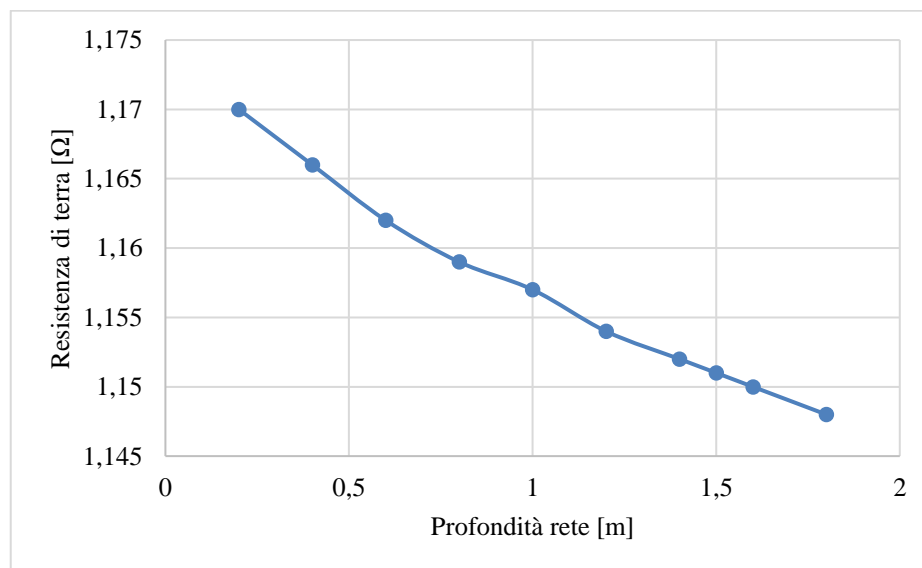


Figura 85: Grafico della resistenza al variare della profondità della rete di terra

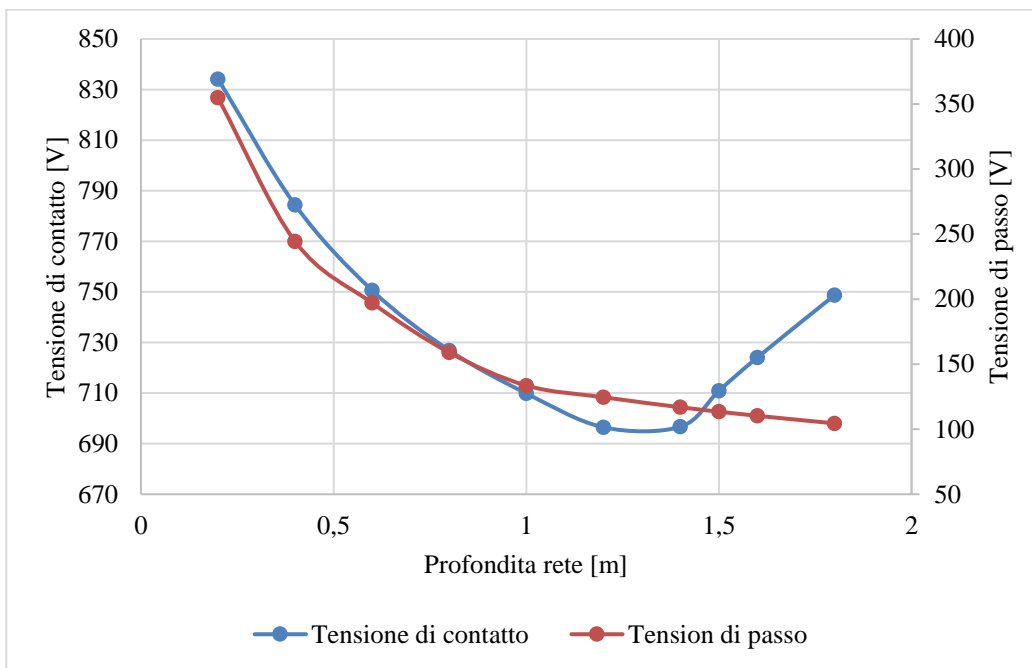


Figura 86: Variazione della tensione di contatto e di passo al variare della profondità della rete di terra

Si nota come all'aumentare della profondità la resistenza di terra e la tensione massima di passo diminuiscano quasi linearmente. La tensione massima di contatto invece diminuisce fino ad una certa profondità, poi inizia a crescere nuovamente. Nonostante la tensione massima di contatto ad un certo punto aumenta con la profondità, l'area interna alla sottostazione che risulta sicura è maggiore perché si ha una generale diminuzione della tensione di contatto all'interno della sottostazione, ma aumenta nelle zone periferiche. Questo si può vedere dalla Figura 87 che mostra le aree sicure per alcune profondità, e si vede come l'area verde aumenta via via che la rete è più profonda.

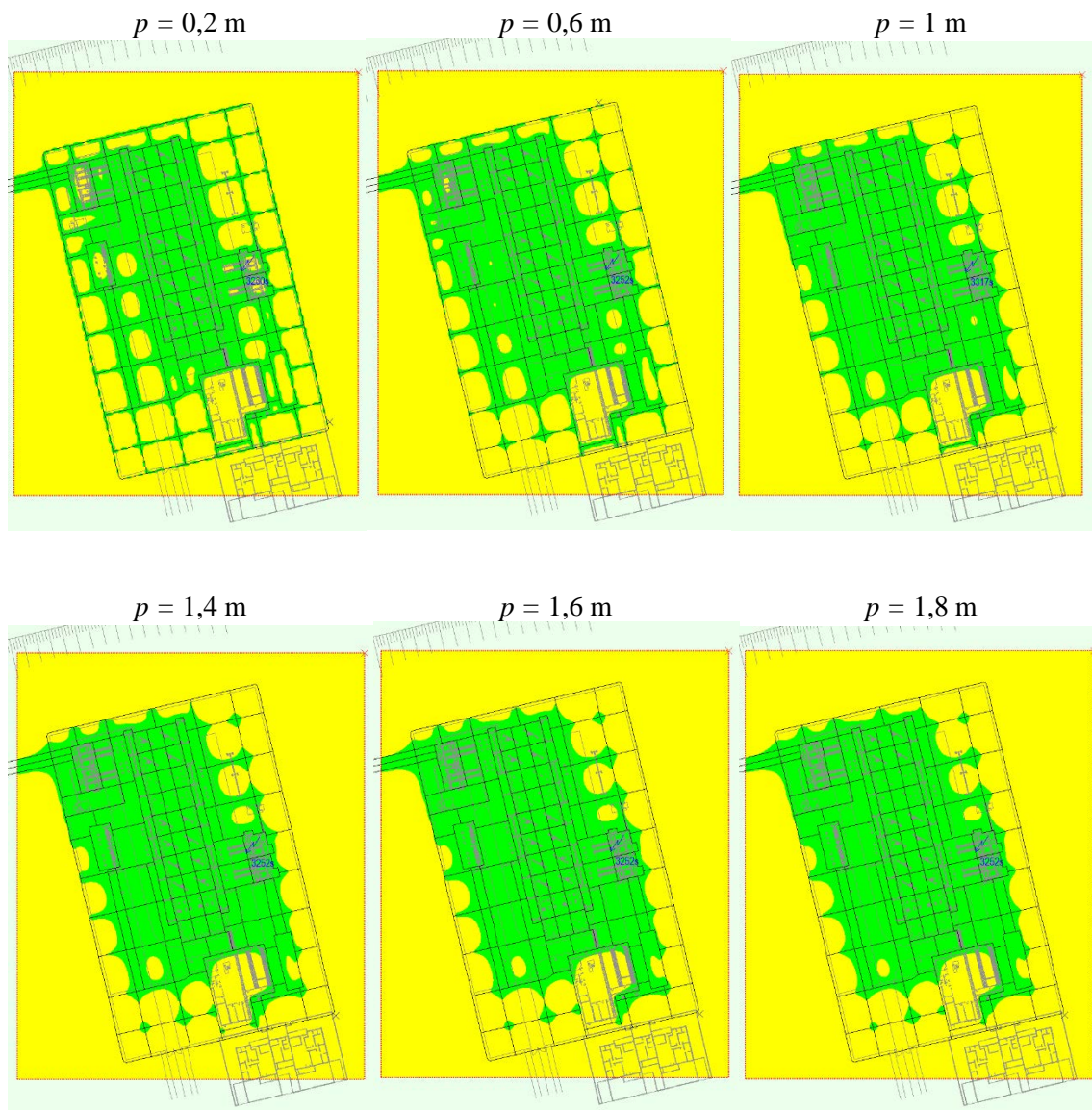


Figura 87: Aree sicure al variare della profondità di interramento della rete di terra

Conclusioni

Questo lavoro di tesi mette in luce i vantaggi dell'acquisto di un software FEM per il dimensionamento delle reti di terra piuttosto dei limitati metodi degli standard IEEE 80-2013. Dal capitolo tre si è visto come gli standard IEEE presentino diverse limitazioni, quali: modello del suolo uniforme, geometria della rete limitata alla forma quadrata, rettangolare ed a L, distanze uguali tra i conduttori che formano le maglie della rete, impossibilità di considerare l'armatura in ferro degli edifici, impossibilità di considerare un collegamento con impianti di terra diversi nelle vicinanze, impossibilità di valutare gli effetti di eventuali oggetti conduttori interrati non facenti parte dell'impianto di terra. Dall'altra parte invece il software FEM supera tutti questi limiti, e permette di simulare anche eventuali anomalie, come si è visto nel paragrafo 3.2.1, come l'interruzione del collegamento tra due impianti di terra e l'aumento della corrente di guasto. Infatti si è potuto simulare il caso in cui i tre cavi di collegamento degli impianti di terra della sottostazione e della power house, venissero tranciati e questo ha mostrato come alcune aree non risultassero più entro i limiti di sicurezza, per questo l'utilizzo di tre cavi fornisce una buona ridondanza. Inoltre si è individuata la corrente massima che l'impianto di terra può dissipare e verificato che tutte le aree di interesse rispettassero i requisiti di sicurezza.

Avere una maggiore libertà nella progettazione del layout della rete di terra e strumenti validi per la modellizzazione multistrato del suolo e la mappatura delle aree sicure, permette un notevole risparmio in termini di materiale e quindi sul costo totale dell'intera opera.

La resistività del suolo è uno dei parametri che più incide sul progetto. Nel capitolo quattro si sono simulati diversi scenari con resistività del suolo variabile e dai risultati ottenuti si può concludere che:

- Quando la resistività dello strato superiore è maggiore di quella dello strato inferiore, invece di utilizzare una rete più fitta, che porterebbe ad un eccessivo consumo di materiale senza risultati soddisfacenti, è conveniente utilizzare aste verticali per raggiungere lo strato a resistività minore, inoltre è possibile utilizzare aste di profondità più lunghe per avere ulteriori benefici;
- Quando la resistività dello strato superiore è minore di quella dello strato inferiore, l'utilizzo di aste verticali non comporta buoni miglioramenti, e conviene utilizzare una rete più fitta e un layer di materiale superficiale ad alta resistenza;
- Quando il suolo è uniforme ad alta resistività, conviene diminuire la distanza dei conduttori orizzontali e utilizzare un SCL, l'utilizzo di aste verticali possono essere utilizzate per il controllo delle tensioni di contatto e di passo, ma non comportano grandi cambiamenti.
- In caso di terreni ad elevata resistività l'utilizzo della betonite che ricopre i conduttori è una valida soluzione perché diminuisce la resistività all'intorno dei conduttori.

L'utilizzo di software convalidati per il dimensionamento delle reti di terra è giustificato anche dagli standard IEEE perché, come cita anche la norma [3], superano tutti i limiti delle equazioni e

permettono un'analisi più accurata dell'intero impianto. Il software XGSLab è uno strumento potente e semplice da usare, in grado di fornire una notevole quantità di dati in uscita per una corretta progettazione dell'impianto di terra.

Bibliografia

- [1] M. C. A. B. M. U. A. Muhammad Usman Cheem, «A COMPARISON OF GROUND GRID MESH DESIGN AND OPTIMIZATION FOR 500KV SUBSTATION USING IEEE 80-2000 AND FINITE ELEMENT METHODS,» *Electrical and Electronics Engineering: An International Journal (ELELIJ) Vol 4, No 1*, 2015.
- [2] M. A. Anwar, «HV SUBTATIONS GROUNDING NETWORK DESIGN,» *School of Industrial and Information Engineering* .
- [3] I. S. Association, «IEEE Guide for Safety in AC Substation, IEEE Std 80™-2013».
- [4] D. Quinci, «<https://www.elettronews.com/messa-a-terra-resistivita-del-suolo-resistenza-di-terra-negli-impianti/>,» 26 agosto 2019. [Online].
- [5] A. Morstad, «Grounding of Outdoor High Voltage,» *Norwegian University of Science and Technology*, June 2012.
- [6] SINT srl, «XGSLab, THE STATE OF THE ART OF THE ELECTROMAGNETIC SIMULATION FOR POWER, GROUNDING AND LIGHTNING PROTECTION SYSTEMS,» *GENERAL BROCHURE*, June 2020.
- [7] M. G. AYDINER, «GROUNDING DESIGN ANALYSIS,» *Master of Science in Electrical and Electronics Engineering Department, Middle East Technical University*, FEBRUARY 2009.
- [8] SINT srl , «XGSLab USER’S GUIDE,» 07/2020.
- [9] G. G. Roberto Andolfato, «Progettazione di impianti di terra,» *Powertechnology*, maggio 2008.
- [10] American National Standard, «ANSI/IEEE Std 81-1983 IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System».
- [11] S. S. a. T. K. A. Phayomhom, «Safety Design of Ground Grid in Distribution Substation: Case Study of Metropolitan Electricity Authority’s System,» *GMSARN International Journal 4 (2010) 67 - 74*.
- [12] A. Patil, «Substation Earthing Design,» *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering (IOSR-JEEE)*, Jan. – Feb. 2017.

- [13] Y. N. B. M. T. A. M. B. Alik, «Optimization of Grounding System of 60/30 kV Substation of Ain El-Melh using GAO,» *Laboratoire de Recherche en Electrotechnique, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger.*

Ringraziamenti

Ringrazio STE Energy che mi ha accolto nell'azienda per questo lavoro di tesi, in particolare l'Ing. Riccardo Clementi sempre disponibile e presente per qualsiasi chiarimento e confronto.

Ringrazio il Prof. Fabio Bignucolo per avermi indirizzato e seguito in questo percorso di tesi.

Ringrazio la mia famiglia, sempre presente. Mio papà, per i sacrifici fatti e per avermi dato la possibilità di fare le mie scelte. Mia sorella e mio fratello, che rendono le giornate più leggere.

Un particolare pensiero a mia mamma che credeva in me più di tutti, e che da lassù continuerà a seguirmi e sostenermi sempre.

Ringrazio i miei amici, una compagnia che mai cambierei! Amici veri, che nei momenti del bisogno ci sono sempre stati, con cui ho condiviso giornate e avventure pazzesche.

Ringrazio i miei compagni di corso con cui ho condiviso questi studi e con alcuni dei quali ho stretto legami unici.