

PONTE SULLO STRETTO DI MESSINA



PROGETTO DEFINITIVO

EUROLINK S.C.p.A.

IMPREGILO S.p.A. (MANDATARIA)
 SOCIETÀ ITALIANA PER CONDOTTE D'ACQUA S.p.A. (MANDANTE)
 COOPERATIVA MURATORI E CEMENTISTI - C.M.C. DI RAVENNA SOC. COOP. A.R.L. (MANDANTE)
 SACYR S.A.U. (MANDANTE)
 ISHIKAWAJIMA - HARIMA HEAVY INDUSTRIES CO. LTD (MANDANTE)
 A.C.I. S.C.P.A. - CONSORZIO STABILE (MANDANTE)

 <p>IL PROGETTISTA Dott. Ing. I. Barilli Ordine Ingegneri V.C.O. n° 122 Dott. Ing. E. Pagani Ordine Ingegneri Milano n° 15408</p> 	<p>IL CONTRAENTE GENERALE</p> <p>Project Manager (Ing. P.P. Marcheselli)</p>	<p>STRETTO DI MESSINA Direttore Generale e RUP Validazione (Ing. G. Fiammenghi)</p>	<p>STRETTO DI MESSINA Amministratore Delegato (Dott. P. Ciucci)</p>
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

<p><i>Unità Funzionale</i></p> <p><i>Tipo di sistema</i></p> <p><i>Raggruppamento di opere/attività</i></p> <p><i>Opera - tratto d'opera - parte d'opera</i></p> <p><i>Titolo del documento</i></p>	<p>COLLEGAMENTI CALABRIA</p> <p>INFRASTRUTTURE STRADALI - IMPIANTI TECNOLOGICI</p> <p>RAMO C</p> <p>GENERALE</p> <p>RELAZIONE DI CALCOLO IMPIANTO DI MESSA A TERRA</p>	<p>CS0997_F0</p>
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------

CODICE	C	G	0	7	0	0	P	4	R	D	C	S	I	C	1	G	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
--------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE DI CALCOLO IMPIANTO DI MESSA A TERRA		<i>Codice documento</i> CS0997.doc	<i>Rev</i> 0	<i>Data</i> 09/03/2011

INDICE

INDICE.....	3
1 Premessa.....	4
2 Leggi e norme di riferimento	4
3 Definizioni	4
4 Requisiti di progetto per l'impianto di terra disperdente.....	5
5 Verifica dell'impianto di terra disperdente	7
5.1 Verifica meccanica e termica dell'impianto di terra disperdente	7
5.2 Verifica nei confronti della sicurezza dell'impianto di terra disperdente	8
5.2.1 Descrizione del codice di calcolo utilizzato	8
5.2.1.1 Generalità	8
5.2.1.2 Limitazioni del programma GSA.....	10
5.2.1.3 Input richiesti dal software	10
5.2.1.4 Calcolo della resistenza.....	17
5.2.1.5 Calcolo del potenziale sul terreno	18
5.2.1.6 Output del software	20
6 Requisiti di progetto per l'impianto di terra interno cabina.....	26
7 Considerazioni aggiuntive.....	30
8 Allegati	31

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE DI CALCOLO IMPIANTO DI MESSA A TERRA		<i>Codice documento</i> CS0997.doc	<i>Rev</i> 0	<i>Data</i> 09/03/2011

1 Premessa

Il presente documento, relativamente agli impianti di terra previsti a servizio delle cabina asservita al tunnel del ramo C, intende evidenziare:

- la normativa tecnica utilizzata per il dimensionamento;
- i criteri di dimensionamento, tenendo conto dei vincoli impiantistici e della normativa vigente;
- i dati di input;
- le verifiche di calcolo necessarie.

Nel seguito si considerano sia la parte in MT sia la parte in BT collegate ad un unico impianto di terra (sistema TN).

I dati di progetto ed i risultati delle verifiche di impianto, ottenute con software dedicato e tramite fogli di calcolo, sono riportati nell'allegato 1.

Nel seguito si riportano alcune considerazioni aventi lo scopo di inquadrare il problema degli impianti di terra e di semplificare la comprensione di quanto evidenziato nell'allegato sopra menzionato.

2 Leggi e norme di riferimento

Nel seguito vengono elencati i principali riferimenti legislativi e normativi che sono stati considerati nello sviluppo del presente progetto:

- CEI 11-1 "Impianti elettrici con tensione superiore a 1kV in corrente alternata", 1999-01, Ediz. IX;
- Guida CEI 11-37 "Guida per l'esecuzione degli impianti di terra di stabilimenti industriali per sistemi di I, II e III categoria", 2003-07, Ediz. II;

3 Definizioni

Saranno utilizzati i seguenti termini:

Dispensore (o impianto di terra primario): insieme di conduttori in contatto elettrico con il terreno o annegati nel calcestruzzo.

Impianto di terra interno (o impianto di terra secondario):

Insieme di conduttori comprendente:

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE DI CALCOLO IMPIANTO DI MESSA A TERRA		<i>Codice documento</i> CS0997.doc	<i>Rev</i> 0	<i>Data</i> 09/03/2011

- conduttori di terra: conduttori che collegano parti dell'impianto (neutri dei sistemi elettrici, masse di apparecchiature e collettori di terra) direttamente al dispersore o che collegano tra loro due dispersori;
- conduttori di protezione: conduttori che collegano masse di apparecchiature ad un collettore di terra;
- collettori di terra: punti ai quali fanno capo i diversi conduttori di protezione di una parte dell'impianto. Ogni collettore di terra è collegato al dispersore con uno o più conduttori di terra;
- conduttori equipotenziali: conduttori che collegano le masse metalliche ai collettori di terra o direttamente al dispersore.

Altri termini utilizzati saranno in accordo con le normative.

4 Requisiti di progetto per l'impianto di terra disperdente

L'impianto di terra disperdente, nei confronti della sicurezza delle persone, è da considerarsi correttamente dimensionato se in caso di guasto, lato MT, si verificano una delle due seguenti condizioni:

- la tensione totale di terra U_E risulta inferiore al limite ammesso per le tensioni di contatto U_{tp}
- la condizione a) non è verificata ma le tensioni di contatto U_T e di passo U_S risultano inferiori ai rispettivi limiti ammessi U_{tp} e $U_{sp} = 3 U_{tp}$

Per quanto riguarda invece la resistenza meccanica, la resistenza alla corrosione ed alle sollecitazioni termiche dovute alla corrente di guasto a terra, la Norma CEI 11-1 raccomanda di adottare per il dispersore le dimensioni minime riportate nella tabella seguente:

Materiale	Tipo di dispersore	Dimensione minima					
		Corpo			Rivestimento/guaina		
		Diametro [mm]	Sezione trasversale [mm ²]	Spessore [mm]	Valori singoli [µm]	Valori medi [µm]	
Acciaio	zincato a caldo	Piattina ⁽²⁾		90	3	63	70
		Profilato (inclusi i piatti)		90 (250)	3 (5)	63	70
		Tubo	25		2	47	55
		Barra tonda per picchetto	16 (20)			63	70
		Tondo per dispersore orizzontale	10				50
	con guaina di piombo ⁽¹⁾	Tondo per dispersore orizzontale	8			1000	
	con guaina di rame estrusa	Barra tonda per picchetto	15			2000 (500)	
	con guaina di rame elettrolitico	Barra tonda per picchetto	14.2 (15)			90	100
Rame	nudo	Piattina		50	2		
		Tondo per dispersore orizzontale		25 ⁽³⁾			
		Corda	1,8 ^(*)	25			
		Tubo	20		2		
	stagnato	Corda	1,8 ^(*)	25		1	5
	zincato	Piattina		50	2	20	40
	con guaina di piombo ⁽¹⁾	Corda	1,8 ^(*)	25		1000	
		Filo tondo		25		1000	

(*) per cavetti singoli

(1) non idoneo per posa diretta in calcestruzzo

(2) piattina, arrotondata o tagliata con angoli arrotondati

(3) in condizioni eccezionali, dove l'esperienza mostra che il rischio di corrosione e di danno meccanico è estremamente basso, si può usare 16 mm².

Nota I valori riportati tra parentesi sono comunemente utilizzati in Italia.

Tabella 1 - Dimensioni minime degli elementi del dispersore (rif. Allegato A CEI 11-1)

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO	
RELAZIONE DI CALCOLO IMPIANTO DI MESSA A TERRA	<i>Codice documento</i> CS0997.doc	<i>Rev</i> 0	<i>Data</i> 09/03/2011

5 Verifica dell'impianto di terra disperdente

5.1 Verifica meccanica e termica dell'impianto di terra disperdente

Per quanto concerne il comportamento meccanico e termico del dispersore i requisiti di progetto sopra indicati risultano soddisfatti in quanto per le diverse cabine MT/BT si prevede un dispersore costituito da una corda di rame da 35 mm², posto lungo il perimetro esterno della cabina stessa, con ai vertici n.4 picchetti tondi o a croce di lunghezza 2 m (Fig. 1).

Inoltre, se la pianta rettangolare della cabina presenta due lati significativamente più lunghi rispetto ai due lati corti, si prevedono ulteriori due picchetti in corrispondenza della mezzeria di ciascun lato lungo.

Tali configurazioni risultano, con le normali correnti di guasto, più che sufficienti; ad esse pertanto si è fatto riferimento per le verifiche in allegato.

La profondità di posa dell'anello non dovrà essere inferiore a 0,5 m.

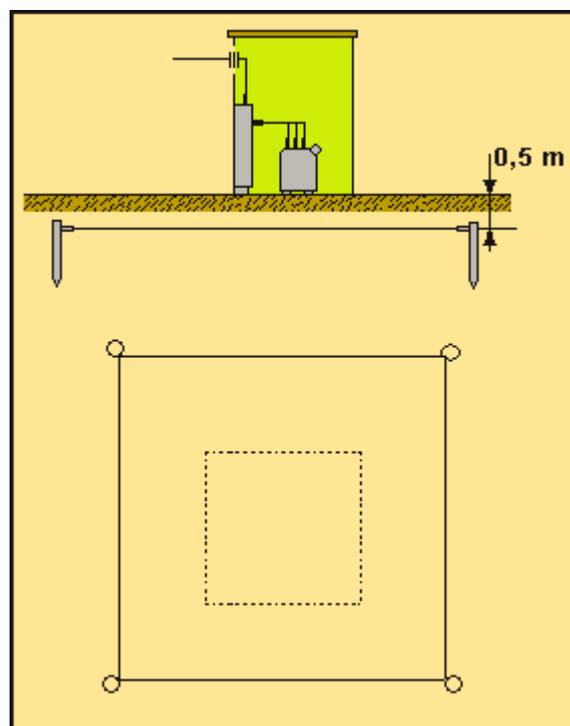


Figura 1 – Tipico impianto di terra con dispersore ad anello con quattro picchetti agli angoli

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE DI CALCOLO IMPIANTO DI MESSA A TERRA		<i>Codice documento</i> CS0997.doc	<i>Rev</i> 0	<i>Data</i> 09/03/2011

5.2 Verifica nei confronti della sicurezza dell'impianto di terra disperdente

La verifica dell'impianto di terra disperdente, nei confronti della sicurezza delle persone, è stata condotta utilizzando il software GSA® (Grounding System Analysis), versione 3.2.0.4, sviluppato da SINT Ingegneria Srl.

I dati di progetto ed i risultati delle verifiche di impianto, ottenute con software dedicato e tramite fogli di calcolo, sono riportati nell'allegato 1.

5.2.1 Descrizione del codice di calcolo utilizzato

5.2.1.1 Generalità

Di seguito viene descritto, sinteticamente, il programma GSA che consente lo studio degli impianti di terra di protezione, realizzati con gli usuali sistemi disperdenti intenzionali, in presenza o meno di corpi perturbanti interrati, in terreni omogenei o non omogenei a doppio strato.

Il programma GSA (di seguito indicato semplicemente con programma o software) consente in particolare di determinare:

- resistenza totale di terra di un dispersore di forma qualsiasi;
- tensioni di passo superficiali in assenza del corpo umano;
- tensioni di contatto superficiali in assenza del corpo umano;
- tensioni di passo superficiali con presenza del corpo umano;
- tensioni di contatto superficiali con presenza del corpo umano;
- tensioni trasferite dal dispersore ad eventuali corpi perturbanti interrati;
- correnti scambiate da ogni porzione del complesso disperdente;

Tali grandezze possono essere determinate nelle seguenti condizioni operative:

- terreno omogeneo;
- terreno non omogeneo a doppio strato;
- presenza di sottili strati di materiali superficiali con resistività elevata;
- presenza di corpi perturbanti interrati non disperdenti, di forma qualsiasi, non connessi al dispersore principale;
- presenza di corpi perturbanti interrati disperdenti, di forma qualsiasi, non connessi al dispersore principale;

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO	
RELAZIONE DI CALCOLO IMPIANTO DI MESSA A TERRA		<i>Codice documento</i> CS0997.doc	<i>Rev</i> <i>Data</i> 0 09/03/2011

Il programma è utilizzabile per sistemi di terra chiamati a disperdere nel terreno correnti continue o alternate a frequenza industriale.

Di seguito è riportato il diagramma di flusso del programma GSA:

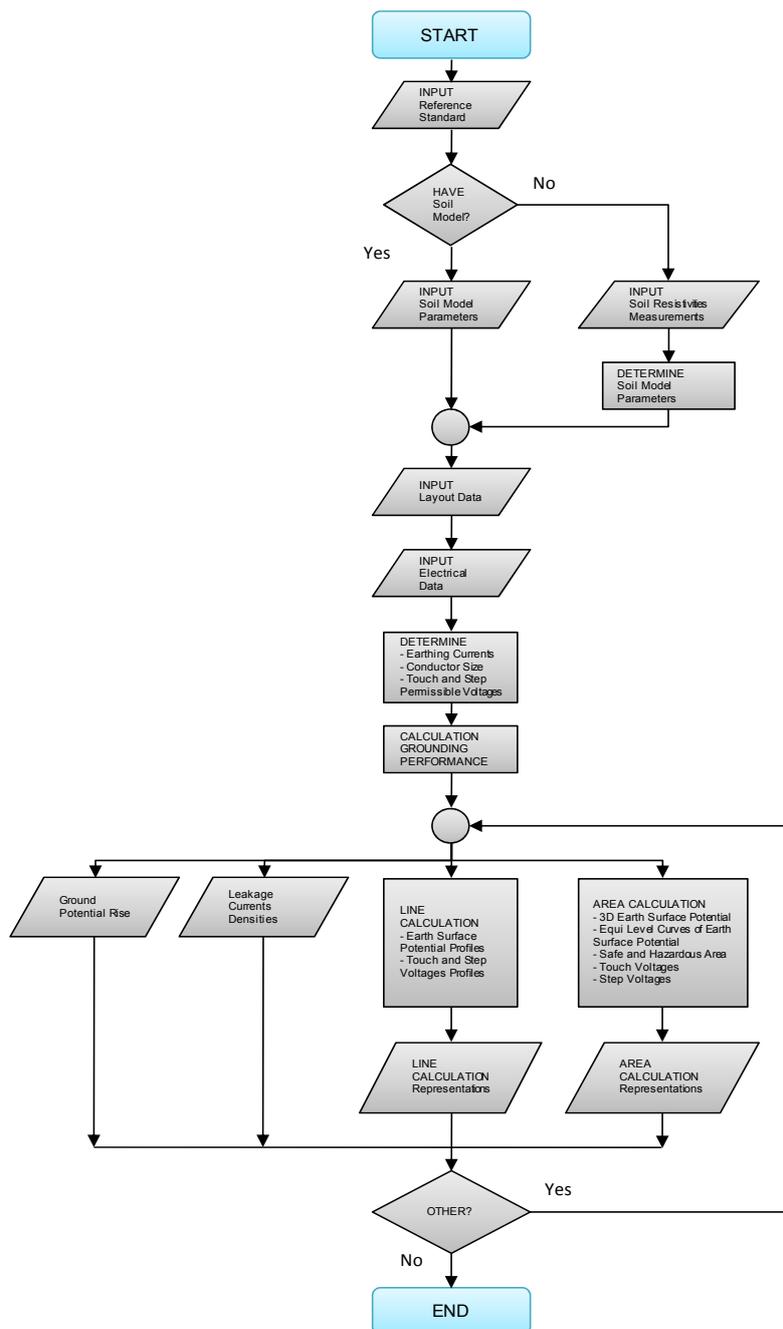


Figura 5-2: diagramma di flusso

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE DI CALCOLO IMPIANTO DI MESSA A TERRA		<i>Codice documento</i> CS0997.doc	<i>Rev</i> 0	<i>Data</i> 09/03/2011

5.2.1.2 Limitazioni del programma GSA

Il programma di simulazione può operare con le seguenti limitazioni:

- ogni dispersore deve essere rappresentato come insieme di elementi sottili.
- ogni dispersore si considera equipotenziale.
- possono essere considerati mezzi disperdenti (terreni) caratterizzati da un modello di resistività uniforme o a doppio strato, con un eventuale sottile strato superficiale ad elevata resistività.
- l'eventuale strato di materiale superficiale ad alta resistività deve essere necessariamente sottile, ovvero inferiore ai 150 mm.
- possono essere considerate correnti con frequenze nel range 15-100 Hz
- ogni elettrodo è assunto senza perdite ovvero la sua auto impedenza deve risultare molto più piccola della sua impedenza di dispersione. Riguardo a quest'ultimo punto:
 - l'impedenza di dispersione di un conduttore risulta proporzionale alla resistività del suolo ed inversamente proporzionale al diametro del conduttore $Z_L \propto \rho/D$.
 - l'auto impedenza del conduttore può essere approssimata come l'auto induttanza, che risulta proporzionale al diametro del conduttore stesso ed alla frequenza $Z_S \propto Df$. Se la condizione $Z_S \ll Z_L$ non può essere soddisfatta (in simbolo \ll può avere il significato di *meno della metà*), il potenziale totale di terra U_E calcolato dal programma GSA sarà minore rispetto al valore effettivo poiché, in questo caso, non viene considerato che la maggior parte della corrente sarà dispersa nelle vicinanze del punto di iniezione. In pratica deve essere rispettata la condizione $D < 1580\sqrt{\rho/f}$ dove:
 - D = dimensione massima dell'elettrodo (diagonale) [m];
 - ρ = resistività del suolo [Ω m];
 - f = frequenza [Hz].

Per esempio, considerando un suolo con una resistività ρ_E di 50 Ω m, la massima dimensione dell'elettrodo simulabile può essere di 1580 o 1440 m, rispettivamente con frequenza di 50 o 60 Hz.

5.2.1.3 Input richiesti dal software

I dati necessari per la verifica sono i seguenti:

- dati fisici: caratteristiche del mezzo disperdente (resistività del terreno);
- dati geometrici: geometria del dispersore (ovvero la geometria da verificare);

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE DI CALCOLO IMPIANTO DI MESSA A TERRA		<i>Codice documento</i> CS0997.doc	<i>Rev</i> 0	<i>Data</i> 09/03/2011

- dati elettrici: corrente di guasto monofase a terra (IE) e tempo di intervento delle protezioni (tf)
- valori massimi di tensioni di contatto e di passo ammessi dalla norma CEI 11.1.

Resistività del terreno

Le prestazioni di un impianto di terra dipendono in massima parte dalla resistività del mezzo disperdente (parametro all'aumentare del quale lo stesso dispersore può risultare sovradimensionato, idoneo oppure insufficiente).

In generale non è possibile assegnare al mezzo disperdente un solo valore di resistività: la resistività risulta solitamente variabile da punto a punto e pertanto esprimibile in modo compiuto solamente mediante una funzione puntuale. La determinazione di tale funzione all'atto pratico non risulta possibile.

A causa della sua natura elettrolitica, la resistività del suolo è ovviamente influenzata dal contenuto di umidità, dalla temperatura e dal contenuto di sali, acidi e basi.

E' evidente comunque che l'umidità, la temperatura e la composizione del suolo in superficie possono variare notevolmente a causa di eventi atmosferici e climatici o a causa di interventi umani.

Quindi, per evitare che modifiche superficiali delle caratteristiche del suolo influiscano macroscopicamente sulle caratteristiche del dispersore sottostante, è consigliabile un interrimento del dispersore a profondità non inferiore a 500 mm in località con clima temperato, fino a 1000 m ed oltre per climi più freddi.

Come ordini di grandezza si possono comunque avere:

- terreni organici: $\rho = 10$ [Ωm]
- terreni umidi: $\rho = 100$ [Ωm]
- terreni secchi: $\rho = 1.000$ [Ωm]
- terreni rocciosi: $\rho = 10.000$ [Ωm]

In particolare, qual dati di riferimento, si possono considerare i seguenti valori:

- argille leggere: $\rho = 5$ [Ωm]
- argille normali: $\rho = 10$ [Ωm]
- marne: $\rho = 20$ [Ωm]
- crete, calcari porosi: $\rho = 50$ [Ωm]

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE DI CALCOLO IMPIANTO DI MESSA A TERRA		<i>Codice documento</i> CS0997.doc	<i>Rev</i> 0	<i>Data</i> 09/03/2011

- terra vegetale mista pietre: $\rho = 50$ [Ωm]
- gres porosi, scisti porosi: $\rho = 100$ [Ωm]
- calcari compatti, marmi: $\rho = 350$ [Ωm]
- ardesie argillose: $\rho = 1.000$ [Ωm]
- sabbia, ciotoli: $\rho = 1.000$ [Ωm]
- graniti: $\rho = 2.000$ [Ωm]

Nei confronti delle correnti alternate a frequenza industriale più utilizzate (50 - 60 Hz) ed ovviamente nei confronti delle correnti continue, il terreno con ottima approssimazione può considerarsi come un mezzo puramente resistivo (tale approssimazione può estendersi fino a circa 1 kHz). In tale ambito pertanto, ogni fenomeno capacitivo ed induttivo legato agli eventi elettrici di un dispersore di terra può essere trascurato.

Inoltre, almeno fino a densità di corrente di 200 A/m² che perdurino per tempi inferiori ad 1 s, i fenomeni di evaporazione dell'umidità contenuta nel terreno possono essere ritenuti trascurabili e quindi, la resistività del terreno può essere ritenuta indipendente dalla densità di corrente stessa. Trattasi di densità di corrente in pratica difficilmente raggiungibili anche nelle immediate prossimità degli elementi disperdenti per cui, con ottima approssimazione, il terreno può essere ritenuto mezzo lineare anche nei confronti della densità di corrente.

Infine, la resistività del suolo, fino a limiti che sono ben al di sopra degli intervalli di interesse pratico nell'ambito dello studio degli impianti di terra, non viene influenzata dal gradiente del potenziale (limiti dell'ordine del [kV/cm]). Pertanto, nei confronti del gradiente di potenziale il suolo può essere considerato un mezzo lineare.

La determinazione della resistività del mezzo disperdente può essere condotta con diverse tecniche: la maggiormente utilizzata è quella proposta da Wenner (eventualmente nella variante di Schlumberger-Palmer).

Come già detto, il software supporta i seguenti modelli del suolo :

- Modello uniforme del suolo (Uniform Soil Model)
- Modello a doppio strato del suolo (Double Layer Soil Model)
- Modello uniforme o a doppio strato del suolo, con la presenza di un sottile strato superficiale con materiale di resistività elevata.

Nella presente fase progettuale si assume, per semplicità, il modello uniforme del suolo

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE DI CALCOLO IMPIANTO DI MESSA A TERRA		<i>Codice documento</i> CS0997.doc	<i>Rev</i> 0	<i>Data</i> 09/03/2011

considerando un valore cautelativo di resistività pari a 1.000 [Ωm]

Geometria dei dispersori

Il layout dei dispersori è definito a partire dai dati dimensionali dei diversi elettrodi presenti nel volume di suolo da analizzare.

A tal proposito si definiscono come:

- “Sistema disperdente”: insieme di più Elettrodi, indipendenti o tra loro elettricamente connessi.
- “Elettrodo”: insieme di Conduttori, tra loro equipotenziali, posti nel mezzo disperdente ovvero nel terreno.
- “Conduttore”: insieme di Elementi
- “Elemento”: costituito da un cilindro metallico, lungo e sottile, ovvero caratterizzato da dimensione longitudinale “l” nettamente maggiore della dimensione trasversale “D”.

Il programma di simulazione si basa sul metodo agli elementi finiti pertanto ogni “Sistema disperdente” dovrà essere partizionato in un numero opportuno di Elementi.

La dimensione di ogni singolo Elemento deve essere tale da permettere di considerare uniforme la distribuzione di corrente lungo la sua lunghezza.

L'Elemento dispersore è tipicamente realizzato con materiale (rame o ferro) avente resistività che si differenzia, da quella del mezzo in cui si trova immerso, di alcuni ordini di grandezza.

Si può pertanto ritenere che il potenziale elettrico u sia costante su tutta la superficie dell'Elemento stesso.

Se l'Elemento è massiccio, nelle condizioni di cui sopra il potenziale u è praticamente costante anche al suo interno, la componente resistiva del dispersore in sé è pertanto trascurabile.

La resistenza verso il mezzo disperdente di un Elemento con le suddette caratteristiche, dipende in definitiva oltre che dal fattore di mezzo (ovvero la resistività del suolo) solo dalla sua superficie esterna e dal suo fattore di forma (ovvero k_f che per elementi lineari cilindrici aventi lunghezza

l nettamente preponderante sul diametro D vale: $k_f = \frac{1}{2\pi} \left[\ln\left(\frac{4l}{D}\right) - 1 \right]$)

Con queste ipotesi, si può affermare che Elementi geometricamente uguali, anche se non pieni, sono caratterizzati dallo stesso fattore di forma.

Il fatto che il dispersore sia o meno massiccio interessa solo ai fini del suo dimensionamento termico e meccanico.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE DI CALCOLO IMPIANTO DI MESSA A TERRA		<i>Codice documento</i> CS0997.doc	<i>Rev</i> 0	<i>Data</i> 09/03/2011

Nella pratica impiantistica è usuale l'utilizzo, oltre che di Elementi disperdenti in corda o tondino, anche di piattine e cioè Elementi rettilinei aventi due delle dimensioni (lunghezza e larghezza), nettamente prevalenti sulla terza (e cioè sullo spessore).

In generale, ogni Elemento rettilineo avente una dimensione nettamente preponderante sulle altre due può essere ridotto ad un Elemento cilindrico, tramite la determinazione del suo diametro equivalente, e cioè di quel particolare diametro che, assegnato ad un Elemento cilindrico di pari lunghezza, ne rende la resistenza verso un mezzo omogeneo isotropo lineare indefinito uguale alla resistenza dell'Elemento rettilineo nelle stesse condizioni.

Il software GSA consente:

- la definizione di Sistemi disperdenti, composti da massimo n. 10 Elettrodi tra di loro connessi e/o indipendenti;
- la definizione di Elettrodi, composti da Conduttori disposti all'interno del terreno sia orizzontalmente, che verticalmente, che inclinati con qualsiasi angolazione. Tutti i Conduttori dell'Elettrodo sono considerati allo stesso potenziale. Per ogni Elettrodo è possibile definire:
 - una corrente di guasto verso terra;
 - le caratteristiche dimensionali dei Conduttori, il loro materiale e la tipologia (ovvero conduttori o picchetti);
 - la suddivisione automatica dei Conduttori in Elementi. A tal proposito, al fine di ottenere accuratezza nella simulazione, è opportuno che la lunghezza degli Elementi soddisfi la seguente condizione:
 - (5.1) $100 d < l < D/10$
dove:
 - d è il diametro dell'Elemento;
 - l la lunghezza dell'Elemento;
 - D la massima dimensione dell'Elettrodo (diagonale).
- l'imput grafico degli Elettrodi per mezzo dell'importazione di un file DXF (Drawing Exchange Format) generato a sua volata con software CAD ovvero di grafica vettoriale.
- l'imput numerico degli Elettrodi per mezzo di tabelle d'inserimento dei Conduttori associati agli Elettrodi. Tali Conduttori possono essere inseriti singolarmente, a gruppi disposti su superficie piana ed a gruppi disposti su di una superficie cilindrica.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE DI CALCOLO IMPIANTO DI MESSA A TERRA		<i>Codice documento</i> CS0997.doc	<i>Rev</i> 0	<i>Data</i> 09/03/2011

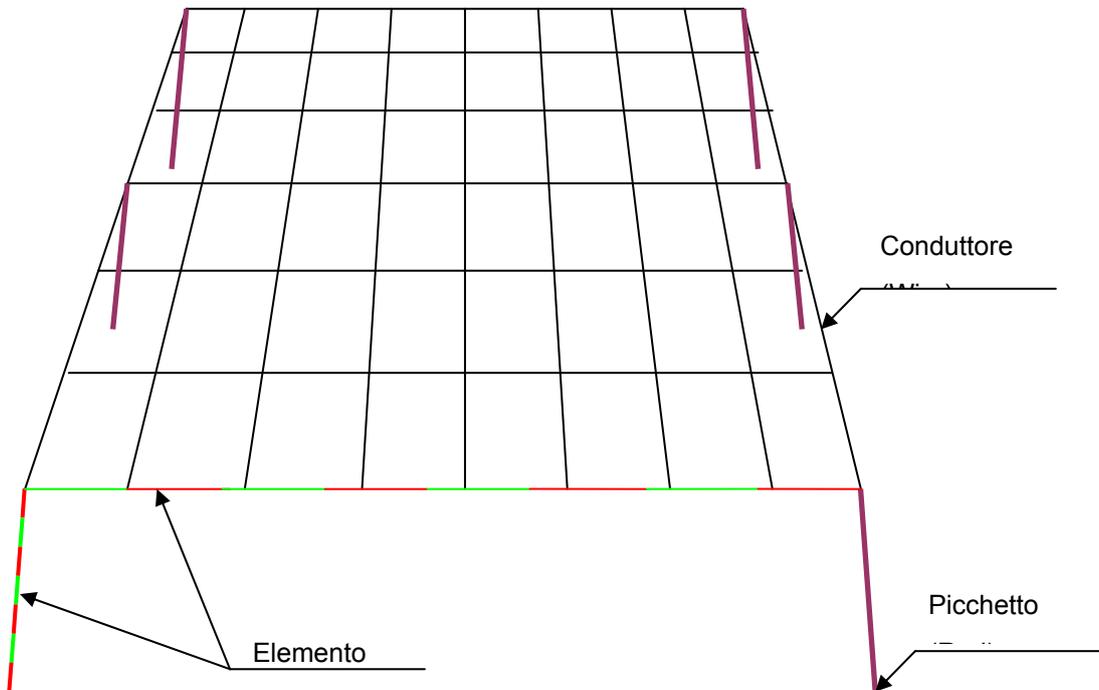


Figura: Schematizzazione di un Elettrodo

Corrente di guasto e tempo di intervento delle protezioni

Il dimensionamento di un impianto di terra richiede, tra i dati di ingresso, il valore della massima corrente che l'impianto è chiamato a disperdere, in caso di guasto, e la durata del guasto stesso. I valori tipici per le correnti di guasto monofase a terra (I_E) e le tarature tipiche delle protezioni MT (rif. CEI 0-16), assumono i seguenti valori:

	I_E [A]	t_f [ms]
neutro compensato	50	450
neutro isolato	150	170

Il tempo di intervento (t_f) indicato nella tabella si intende comprensivo del tempo di apertura dell'interruttore, fino alla completa estinzione della corrente di guasto.

Tensioni limite di passo e di contatto

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO					
RELAZIONE DI CALCOLO IMPIANTO DI MESSA A TERRA		<i>Codice documento</i> CS0997.doc	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;"><i>Rev</i></th> <th style="text-align: left;"><i>Data</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">0</td> <td style="text-align: center;">09/03/2011</td> </tr> </tbody> </table>	<i>Rev</i>	<i>Data</i>	0	09/03/2011
<i>Rev</i>	<i>Data</i>						
0	09/03/2011						

Gli effetti della corrente attraverso il corpo umano dipendono dalla sua durata, ampiezza e frequenza.

Le conseguenze più temute della corrente attraverso il corpo umano riguardano il cuore ed in particolare la fibrillazione ventricolare ed il conseguente arresto della circolazione sanguigna.

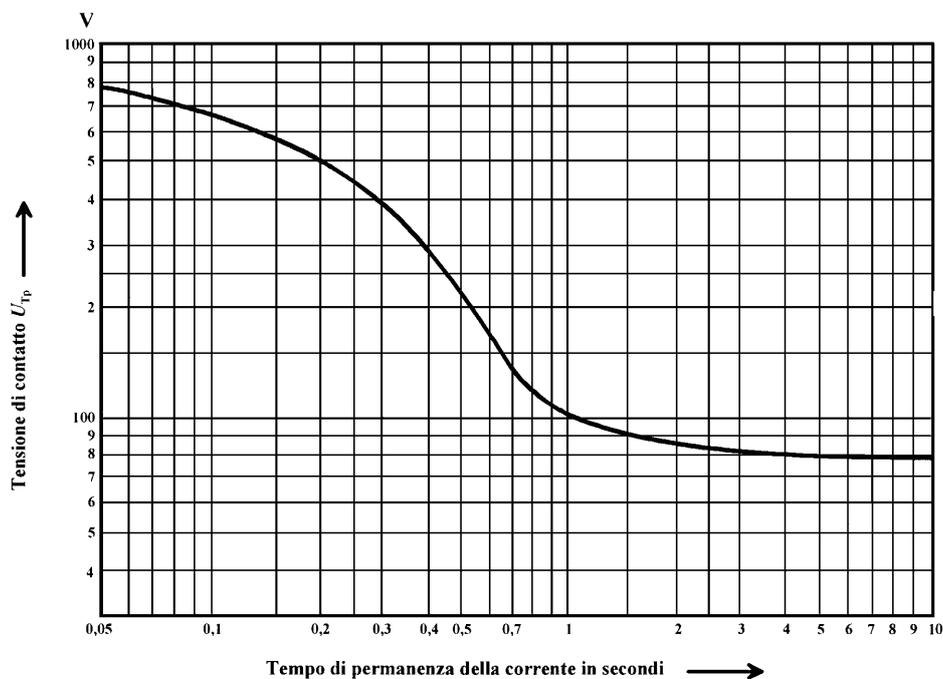
Sfortunatamente, la frequenza più pericolosa per il corpo umano è proprio la più utilizzata (50 o 60 [Hz]).

Le correnti continue o a bassa frequenza hanno minore possibilità di innescare fibrillazione ventricolare.

Le correnti ad alta frequenza tendono a passare sulla superficie del corpo umano senza interessare la regione cardiaca.

La capacità di tollerare correnti attraverso il corpo umano è tanto maggiore quanto minore è la durata della corrente.

La Norma CEI 11.1 definisce il valore di U_{TP} (massima tensione di contatto ammessa) in funzione del tempo di intervento delle protezioni. I valori di tensione di contatto limite sono riportati nel seguente grafico, in funzione del tempo di durata del guasto:



		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE DI CALCOLO IMPIANTO DI MESSA A TERRA		<i>Codice documento</i> CS0997.doc	<i>Rev</i> 0	<i>Data</i> 09/03/2011

I valori di tensione di passo limite U_{SP} non sono considerati dallo Standard poiché si assume che, se nel sistema disperdente le tensioni di contatto risultano inferiori ai suddetti limiti, non risulta presente alcuna tensione di passo pericolosa.

Nelle normative proprie di alcuni paesi europei viene comunque specificata una modalità per determinare le tensioni limite di passo ovvero $U_{SP} = 3U_{TP}$.

Con riferimento ai valori tipici delle tarature tipiche delle protezioni MT (rif. CEI 0-16), i limiti delle tensioni di contatto e di passo assumono i seguenti valori:

	Utp [V]	Usp [V]
neutro compensato	≈ 248	≈ 744
neutro isolato	≈ 546	≈ 1639

5.2.1.4 Calcolo della resistenza

Successivamente, alla fase di inserimento dei dati, il programma consente l'esecuzione di una prima fase di calcolo, nella quale vengono determinate le caratteristiche elettriche dei diversi Elettrodi.

Come già indicato il programma necessita la suddivisione del sistema disperdente in n Elementi, di cui calcola la auto resistenza e la mutua resistenza tra coppie, al fine di comporre il seguente sistema lineare:

$$(1) \begin{bmatrix} r_{1,1} & r_{1,2} & \cdots & r_{1,n} \\ r_{2,1} & r_{2,2} & \cdots & r_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n,1} & r_{n,2} & \cdots & r_{n,n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ \vdots \\ i_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_n \end{bmatrix}$$

Dove:

- La matrice quadrata $[r_{n,n}]$ contiene i valori delle resistenze dei singoli Elementi
- il vettore colonna $[i_n]$ contiene i valori di corrente dispersa dai singoli Elementi
- il vettore colonna $[u_n]$ contiene i valori del potenziale dei singoli Elementi

Questi valori possono essere determinati come soluzione dello stesso sistema lineare, a partire dalle seguenti condizioni:

- la sommatoria delle correnti disperse da ogni Elemento di un Elettrodo e pari alla corrente di guasto iniettata nell'Elettrodo stesso:

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO					
RELAZIONE DI CALCOLO IMPIANTO DI MESSA A TERRA		<i>Codice documento</i> CS0997.doc	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;"><i>Rev</i></th> <th style="text-align: left;"><i>Data</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">0</td> <td style="text-align: center;">09/03/2011</td> </tr> </tbody> </table>	<i>Rev</i>	<i>Data</i>	0	09/03/2011
<i>Rev</i>	<i>Data</i>						
0	09/03/2011						

$$\sum_{i=1}^{n1} i_i = I_{E1}; \quad \sum_{i=n1+1}^{n2} i_i = I_{E2} \dots \quad \sum_{i=nx+1}^n i_i = I_{Ex}$$

- i diversi Elementi di un Elettrodo sono tutti allo stesso potenziale:
 $u_i = U_{E1} \quad (i = 1 \dots n1); \quad u_i = U_{E2} \quad (i = n1 + 1 \dots n2) \dots \quad u_i = U_{Ex} \quad (i = nx + 1 \dots n)$
- gli Elettrodi con corrente iniettata pari a zero sono caratterizzati dal un potenziale flottante

L'auto resistenza, ovviamente verso terra, di un Elemento (lungo e sottile ovvero con $l \gg d$) posizionato in un terreno uniforme può essere calcolata con la seguente formula (H. B. Dwight):

$$r_{i,i} = \frac{\rho}{2\pi l_i} \left[\ln \left(\frac{4l_i}{d_i} \right) - 1 \right]$$

dove:

- $r_{i,i}$ = resistenza di terra dell'Elemento i [Ω] ovvero Elemento diagonale della matrice delle resistenza
- l_i = lunghezza dell'Elemento i [m]
- d_i = diametro dell'Elemento i [m]

La mutua resistenza tra coppie di Elementi posizionati in un terreno uniforme può essere calcolata con la seguente formula:

$$r_{i,j} = \frac{u_i}{i_j}$$

Il potenziale u_i corrispondente al potenziale medio dell'Elemento i , rispetto alla distribuzione del potenziale elettrico nel suolo, quando l'Elemento j inietta una corrente i .

Quindi:

$$r_{i,j} = \frac{\rho}{4\pi l_j} \ln \left(\frac{r_1 + r_2 + l_j}{r_1 + r_2 - l_j} \right)$$

5.2.1.5 Calcolo del potenziale sul terreno

Il potenziale di terra, conseguente dalla presenza di un Elemento disperdente interrato, considerando un suolo uniforme (all'infinito), può essere determinato con la seguente equazione:

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO					
RELAZIONE DI CALCOLO IMPIANTO DI MESSA A TERRA		<i>Codice documento</i> CS0997.doc	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;"><i>Rev</i></th> <th style="text-align: left;"><i>Data</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">0</td> <td style="text-align: center;">09/03/2011</td> </tr> </tbody> </table>	<i>Rev</i>	<i>Data</i>	0	09/03/2011
<i>Rev</i>	<i>Data</i>						
0	09/03/2011						

$$u = \frac{\rho i}{4\pi l} \left[\ln \left(\frac{r_1 + r_2 + l}{r_1 + r_2 - l} \right) \right]$$

Questa espressione considera ovviamente un Elemento disperdente lungo e sottile come una distribuzione uniforme, sull'Elemento, della corrente dispersa.

Per il calcolo di un sistema disperdente con un modello del suolo uniforme è necessario utilizzare il metodo delle immagini elettriche per considerare la disuniformità introdotta dalla presenza dell'aria e quindi dello strato di separazione tra suolo ed aria.

Considerando il valore della resistività dell'aria ρ_{air} infinito, rispetto al valore della resistività del suolo ρ_{earth} , otteniamo:

$$v = \frac{\rho_{air} - \rho_{earth}}{\rho_{air} + \rho_{earth}} = 1$$

Dove v rappresenta il coefficiente riflessione tra terreno ed aria.

Quindi, il potenziale sul terreno, determinato dalla presenza di un Elemento disperdente interrato, può essere calcolato considerando un suolo uniforme (all'infinito) e due sorgenti elettriche, l'Elemento stesso e la sua immagine rispetto alla superficie di separazione tra aria e suolo. Inoltre le due sorgenti iniettano nel suolo la stessa corrente.

Con questi presupposti il potenziale di terra può essere determinato con la seguente equazione:

$$u = \frac{\rho i}{4\pi l} \left[\ln \left(\frac{r_1 + r_2 + l}{r_1 + r_2 - l} \right) + \ln \left(\frac{r'_1 + r'_2 + l}{r'_1 + r'_2 - l} \right) \right], \text{ rispetto alla seguente figura:}$$

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO	
RELAZIONE DI CALCOLO IMPIANTO DI MESSA A TERRA	<i>Codice documento</i> CS0997.doc	<i>Rev</i> 0	<i>Data</i> 09/03/2011

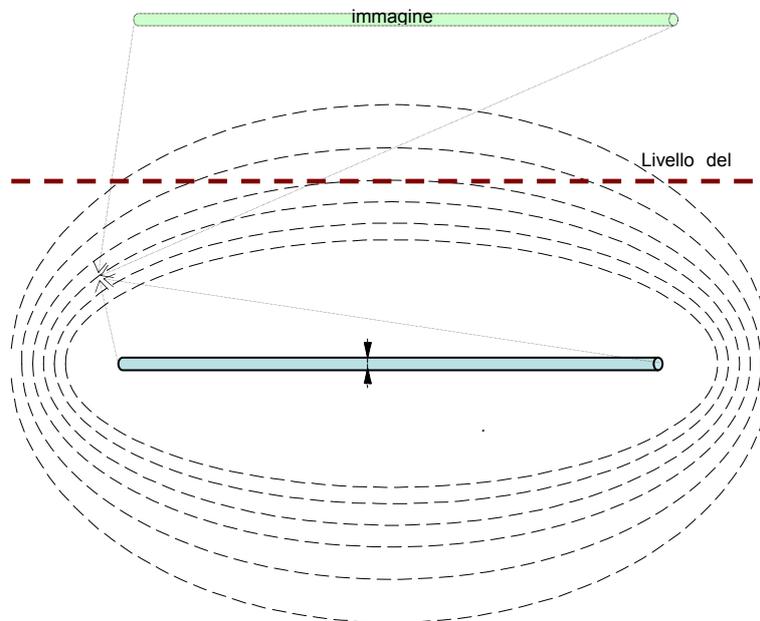


Figura: Immagine elettrica

5.2.1.6 Output del software

Successivamente alla fase di calcolo, sono direttamente disponibili alcune informazioni sul sistema disperdente quali la resistenza dei diversi Elettrodi, il potenziale totale di terra e la distribuzione della densità di corrente disperse dai diversi Elementi.

Per quanto riguarda la determinazione del potenziale sul terreno e le tensioni di passo e contatto il programma necessita di una ulteriore fase di calcolo, in riferimento alla superficie di calcolo o alla direttrice di calcolo selezionata.

Resistenza di terra degli elettrodi e potenziale totale di terra

La soluzione del sistema lineare (1) consente l'immediata determinazione della resistenza di terra dell'Elettrodo i , ovvero R_{Ei} , come il rapporto tra il potenziale e la corrente dispersa dall'Elettrodo stesso:

$$R_{Ei} = U_{Ei} / I_{Ei}.$$

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO					
RELAZIONE DI CALCOLO IMPIANTO DI MESSA A TERRA		<i>Codice documento</i> CS0997.doc	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;"><i>Rev</i></th> <th style="text-align: left;"><i>Data</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">0</td> <td style="text-align: center;">09/03/2011</td> </tr> </tbody> </table>	<i>Rev</i>	<i>Data</i>	0	09/03/2011
<i>Rev</i>	<i>Data</i>						
0	09/03/2011						

Per quanto riguarda Elettrodi a potenziale flottante, ovvero non soggetti ad iniezione di corrente di guasto come ad esempio masse estranee interrate, il programma GSA determina il valore del potenziale trasferito ma non ne determina la resistenza mutua.

La mutua resistenza tra una coppia di Elettrodi, di cui uno a potenziale flottante, può essere semplicemente determinata come il rapporto tra il potenziale dell'Elettrodo a potenziale flottante i e la corrente dispersa dall'Elettrodo j :

$$R_{Ei,j} = U_{Ei} / I_{Ej} \quad (I_{Ej} \neq 0)$$

Potenziale sul terreno

Una ulteriore fase di calcolo è necessaria per determinate il potenziale del terreno su di una serie di punti, con passo regolare, definiti lungo una direttrice o una superficie.

Il programma, per mezzo del principio di sovrapposizione degli effetti, derivanti dal calcolo del potenziale di terra generato da ogni Elemento del sistema disperdente, ottiene la distribuzione complessiva del potenziale di terra.

La seguente figura riporta un esempio della distribuzione del potenziale lungo una direttrice di calcolo (in colore verde è rappresentato il potenziale di terra):

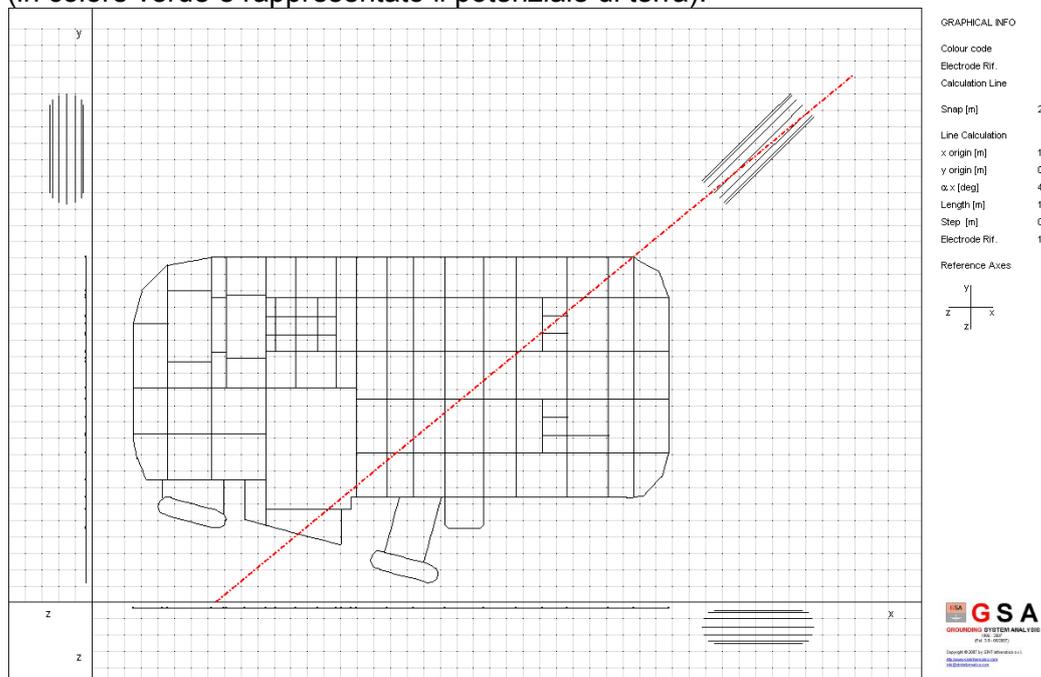


Figura 5-3: Direttrice di calcolo

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO					
RELAZIONE DI CALCOLO IMPIANTO DI MESSA A TERRA		<i>Codice documento</i> CS0997.doc	<table border="1"> <tr> <td><i>Rev</i></td> <td><i>Data</i></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">0</td> <td style="text-align: center;">09/03/2011</td> </tr> </table>	<i>Rev</i>	<i>Data</i>	0	09/03/2011
<i>Rev</i>	<i>Data</i>						
0	09/03/2011						

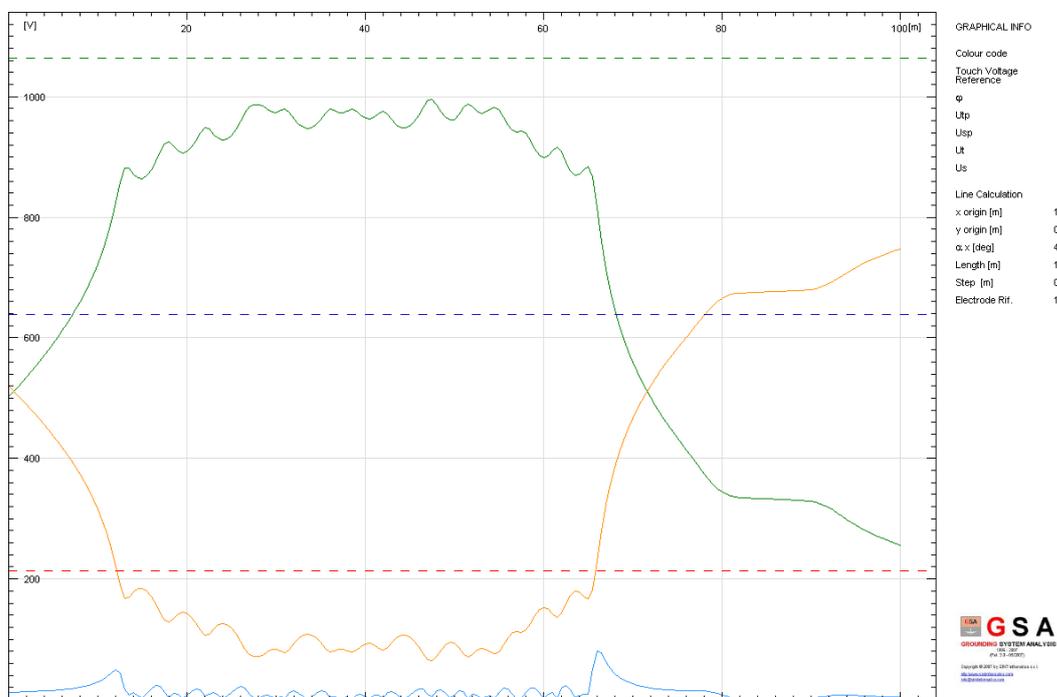


Figura 5-4: Rappresentazione dei valori di potenziale di terra e delle tensioni di passo e contatto

La seguente figura riporta un esempio della distribuzione del potenziale su di una superficie di calcolo:

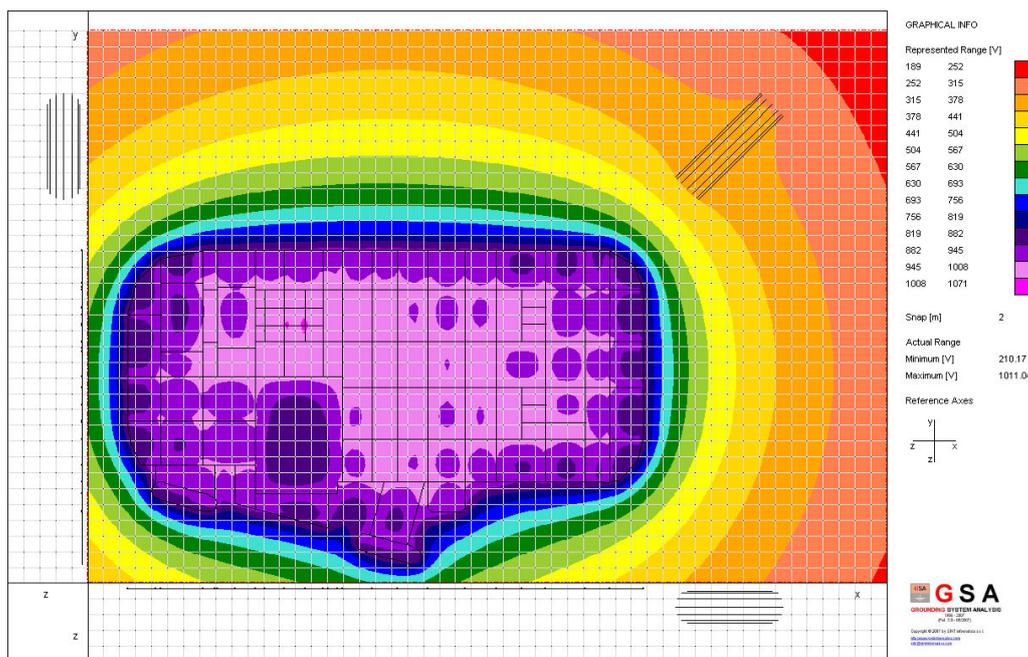


Figura 5-5: Curve equilivello dei valori di potenziale di terra

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE DI CALCOLO IMPIANTO DI MESSA A TERRA		<i>Codice documento</i> CS0997.doc	<i>Rev</i> 0	<i>Data</i> 09/03/2011

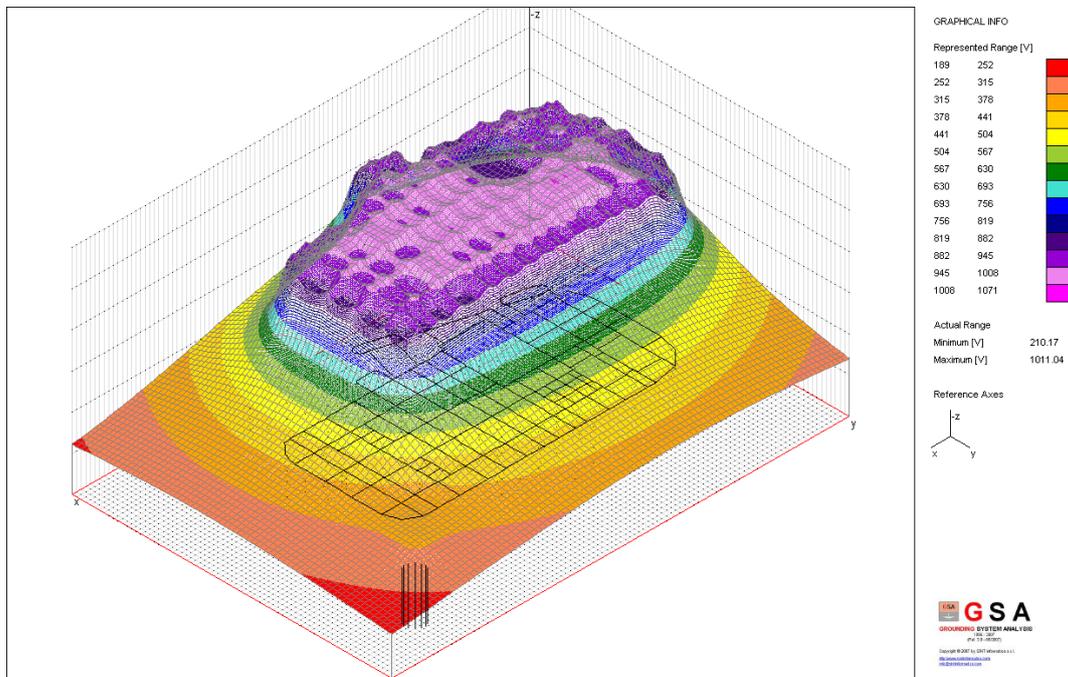


Figura 5-6: Rappresentazione 3D dei valori di potenziale di terra

Tensioni di passo e contatto

Determinato il potenziale sul terreno è quindi possibile ottenere le distribuzioni delle tensioni di passo e contatto lungo una direttrice di calcolo e/o su di una superficie di calcolo.

Il programma permette la determinazione delle tensioni di passo e contatto, con riferimento ad un particolare Elettrodo, ovvero al dispersore a cui afferiscono le eventuali masse / masse estranee che possono essere toccate da una persona e quindi sono oggetto di verifica delle tensioni di contatto.

Sulla superficie di calcolo, il programma determina le zone ove le tensioni di passo e contatto superano i valori limite, definite dalle specifiche normative.

Tali zone di pericolo sono evidenziate dal programma con differenti colorazioni.

- rosso = zone con tensioni di passo superiori ai limiti normativi ($U_t > U_{tp}$ e $U_s > U_{sp}$);
- giallo = zone con tensioni di contatto superiori ai limiti normativi ($U_t < U_{tp}$ e $U_s < U_{sp}$);
- verde = zone con tensioni di contatto e di passo inferiori ai limiti normativi ($U_t < U_{tp}$ e $U_s < U_{sp}$).

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE DI CALCOLO IMPIANTO DI MESSA A TERRA		<i>Codice documento</i> CS0997.doc	<i>Rev</i> 0	<i>Data</i> 09/03/2011

Le seguenti figure riportano un esempio della distribuzione della tensione di contatto, su di una superficie di calcolo, e la rappresentazione delle suddette zone di pericolo.

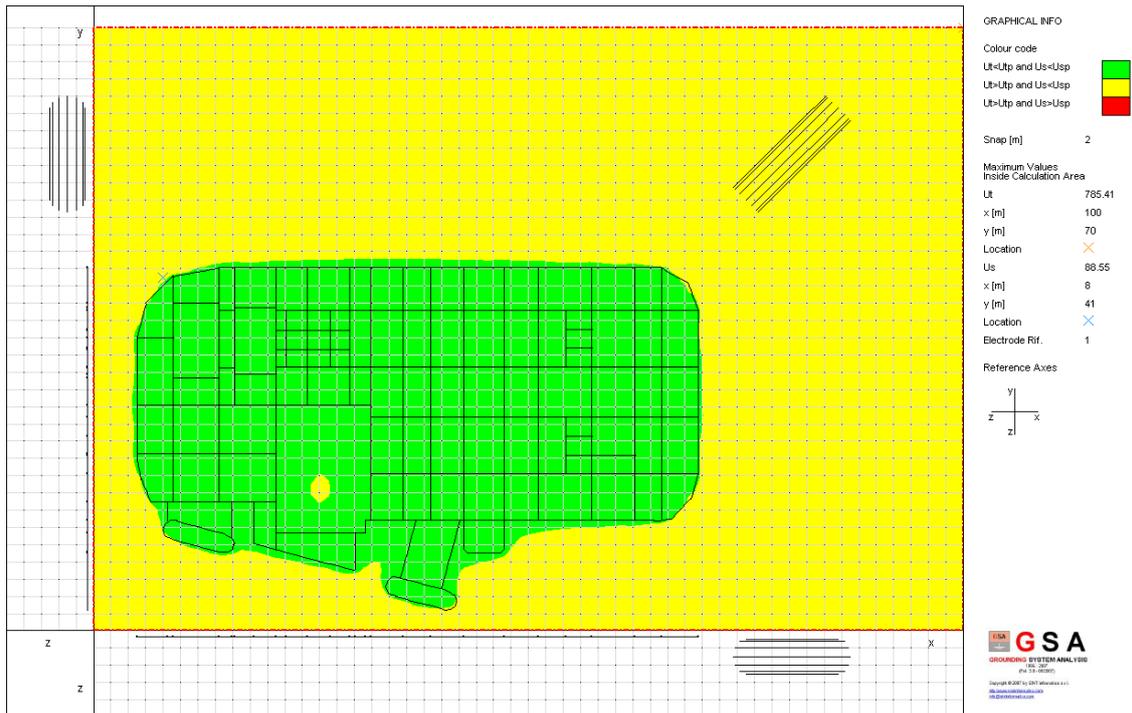


Figura 5-7: Rappresentazione delle zone pericolose rispetto alle tensioni di passo e contatto

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE DI CALCOLO IMPIANTO DI MESSA A TERRA		<i>Codice documento</i> CS0997.doc	<i>Rev</i> 0	<i>Data</i> 09/03/2011

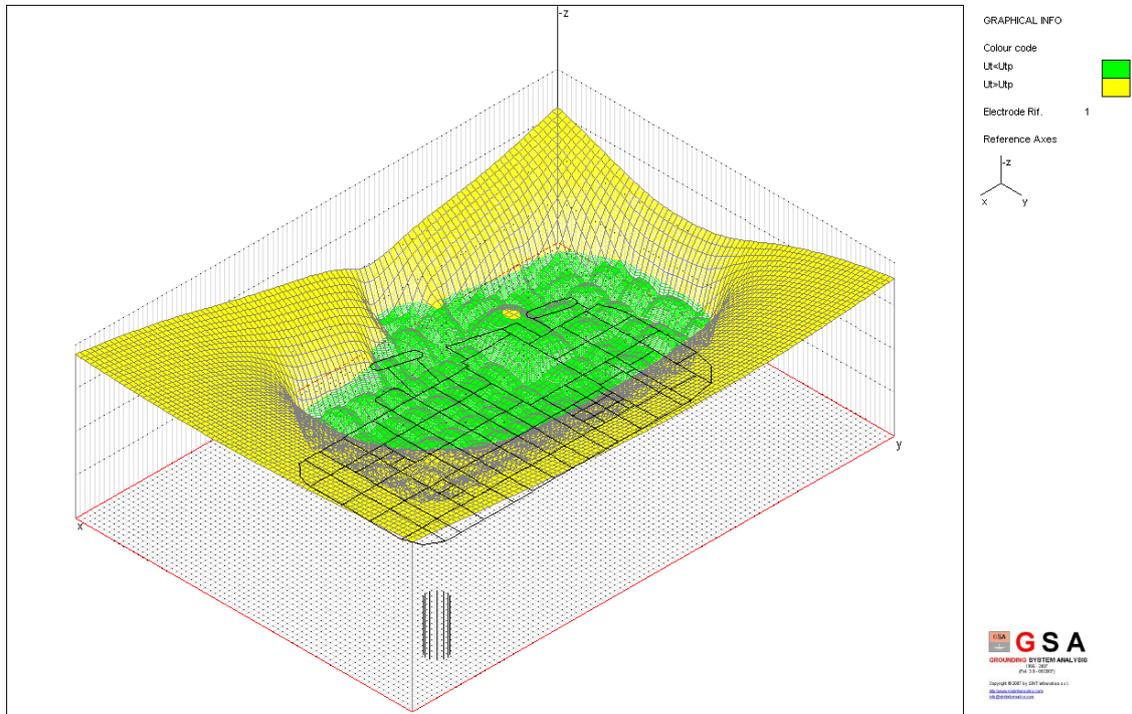


Figura 5-8: Rappresentazione 3D dei valori di tensione di contatto

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO					
RELAZIONE DI CALCOLO IMPIANTO DI MESSA A TERRA		<i>Codice documento</i> CS0997.doc	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;"><i>Rev</i></th> <th style="text-align: left;"><i>Data</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">0</td> <td style="text-align: center;">09/03/2011</td> </tr> </tbody> </table>	<i>Rev</i>	<i>Data</i>	0	09/03/2011
<i>Rev</i>	<i>Data</i>						
0	09/03/2011						

6 Requisiti di progetto per l'impianto di terra interno cabina

All'interno della cabina, tutte le parti metalliche accessibili delle macchine, delle apparecchiature e della struttura, suscettibili di entrare in contatto con elementi in tensione in seguito a guasti o di introdurre il potenziale di terra, devono essere collegate al dispersore o al collettore di terra, normalmente per mezzo di conduttori di terra. A queste connessioni realizzate ai fini della sicurezza, si aggiungono i collegamenti di tipo funzionale quale, ad esempio, la messa a terra del neutro sul lato BT dei trasformatori.

Il nodo di terra (collettore) può essere sostituito da un anello equipotenziale montato sulle pareti interne di cabina, con la funzione di agevolare il collegamento a terra delle apparecchiature.

La figura seguente rappresenta alcuni esempi tipici di collegamenti al collettore.

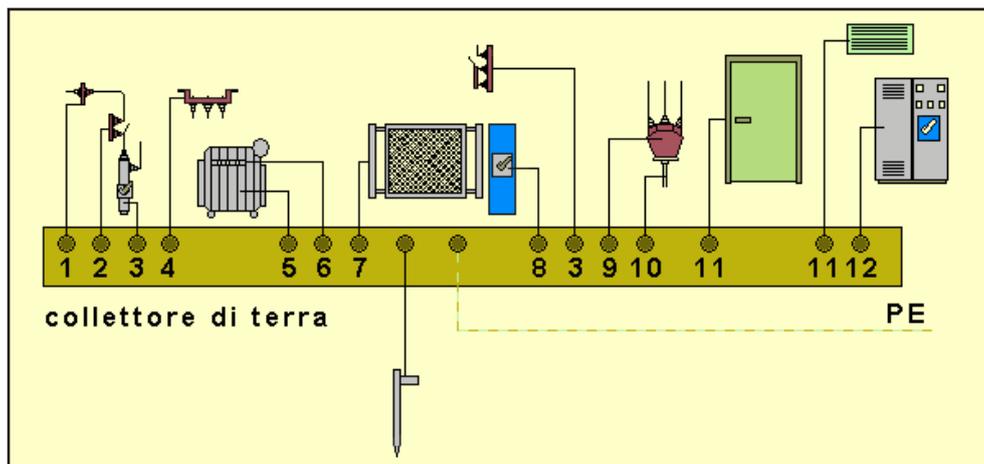


Figura 9 – Esempi di collegamenti a terra in cabina

- 1) Cornici, telai e flange degli isolatori passanti
- 2) Intelaiature e supporti di ogni tipo di isolatore
- 3) Intelaiature dei sezionatori, dei portafusibili e degli interruttori
- 4) Involucri e supporti metallici dell'interruttore automatico MT e di ogni altro apparecchio di controllo e misura
- 5) La massa del trasformatore (da dimensionare in funzione della corrente di guasto sul lato BT)
- 6) Il morsetto del neutro del lato BT del trasformatore (da dimensionare in funzione della corrente di guasto sul lato BT)
- 7) I ripari metallici e le relative incastellature
- 8) Gli organi di comando manuale di interruttori e sezionatori
- 9) Le muffole metalliche
- 10) L'armatura metallica dei cavi MT
- 11) Le intelaiature metalliche di porte, finestre e griglie di aerazione
- 12) Gli armadi metallici delle cabine prefabbricate o altri involucri contenenti apparecchiature MT o BT (per gli armadi contenenti apparecchiature in BT dimensionare in funzione della corrente di guasto in BT)

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE DI CALCOLO IMPIANTO DI MESSA A TERRA		<i>Codice documento</i> CS0997.doc	<i>Rev</i> 0	<i>Data</i> 09/03/2011

Con riferimento alla figura seguente e alle definizioni di cui al par.3 (conduttori di terra, conduttori di protezione e conduttori equipotenziali), i conduttori principali, oggetto di dimensionamento, sono i seguenti:

- CT1: conduttore di collegamento della carcassa del trasformatore MT/BT al nodo di terra;
- CT2: conduttore di collegamento del nodo di terra al dispersore;
- PE1: conduttore di collegamento a terra del centro stella del trasformatore MT/BT;
- PE2: conduttore di collegamento della carpenteria del quadro generale di bassa tensione al nodo di terra.

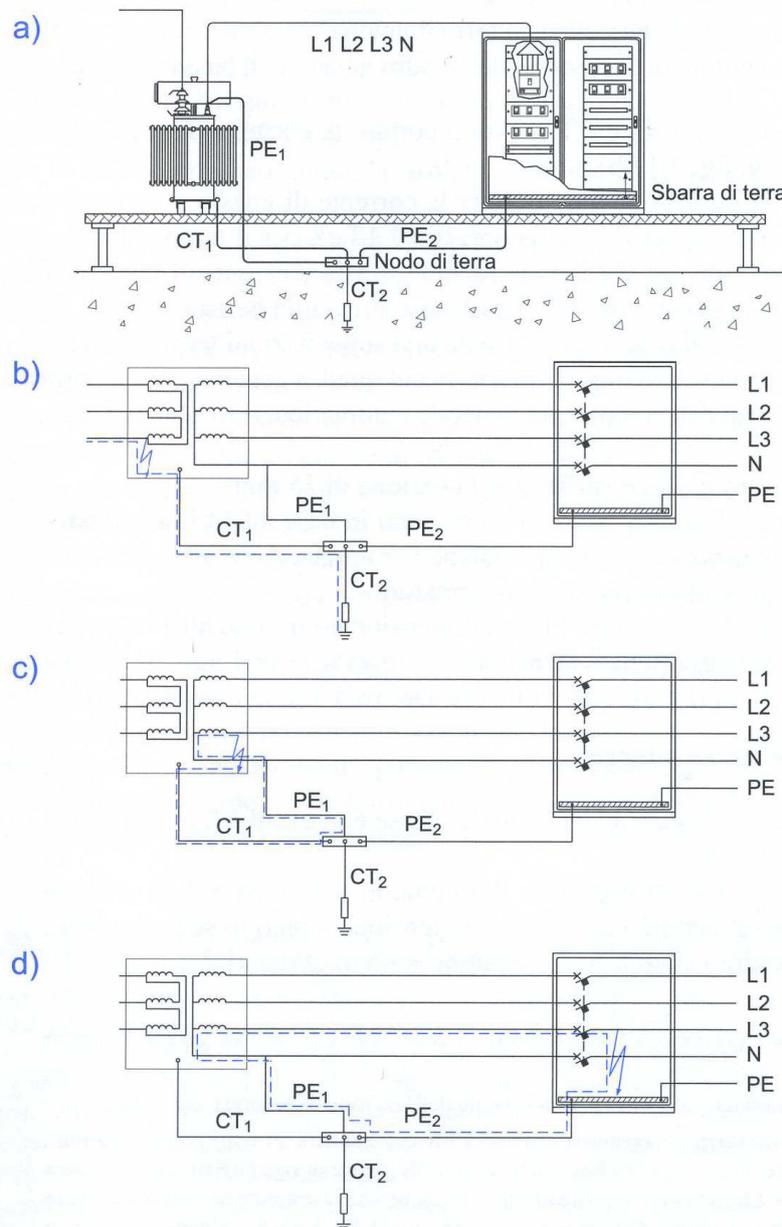


Figura 10 - Collegamenti a terra in cabina

Tali conduttori vanno dimensionati verificando la loro “tenuta termica” nei confronti della corrente di guasto a terra che sono chiamati a condurre verso l’impianto disperdente.

La verifica termica prevede che la sezione del conduttore sia superiore a quella calcolata con la formula seguente (formula dell’integrale di Joule):

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE DI CALCOLO IMPIANTO DI MESSA A TERRA		<i>Codice documento</i> CS0997.doc	<i>Rev</i> 0	<i>Data</i> 09/03/2011

$$A = \frac{I}{K} \sqrt{\frac{t}{\ln \frac{\theta_f + \beta}{\theta_i + \beta}}} \quad (\text{IEC 60724:1984 Equazione F1})$$

dove:

- A: è la sezione minima del conduttore (mm²)
- I: è il valore efficace della corrente di guasto che fluisce nel conduttore (A)
- t: è la durata della corrente di guasto (s)
- K: è una costante dello specifico materiale conduttore usato (As^{1/2}/mm²)
- β: è una costante dello specifico materiale conduttore usato (°C)
- θ_i: è la temperatura ambiente o iniziale del conduttore (°C)
- θ_f: è la massima temperatura ammessa per il conduttore (°C)

Per le costanti dei materiali si può fare riferimento ai seguenti valori indicati nelle norme:

- rame: K = 226 (As^{1/2}/mm²), β = 234,5 (°C)
- acciaio: K = 78 (As^{1/2}/mm²), β = 202 (°C)

Per la temperatura massima si considerano i seguenti valori:

- conduttori interrati: θ_f = 300 (°C)
- conduttori nudi fuori terra in condizioni ordinarie: θ_f = 200 (°C)
- conduttori nudi fuori terra in locali con pericolo di incendio: θ_f = 150 (°C)
- conduttori nudi fuori terra in locali con pericolo di esplosione: θ_f dipende dalla temperatura di accensione
- conduttori isolati in PVC: θ_f = 160 (°C)
- conduttori isolati in EPR/XLPE: θ_f = 250 (°C)

La formula precedente può essere così semplificata: $A = \frac{I}{Kt} \sqrt{t}$, in cui Kt è calcolato con riferimento al tipo di materiale e alle temperature iniziali e finali del conduttore.

A seconda delle tipologie di guasto che interessano i diversi tipi di conduttori, i parametri I e t assumono i valori nel seguito descritti e illustrati in figura:

- CT1 e CT2 sono interessati dalla corrente di guasto a terra in media tensione (fig. 3b): I corrisponde al valore massimo riscontrabile (generalmente doppio guasto a terra su rete a neutro compensato), mentre t corrisponde al tempo di intervento della protezione MT;
- CT1 e PE1 sono interessati da un guasto sull'avvolgimento BT del trasformatore (fig. 3c): I è

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE DI CALCOLO IMPIANTO DI MESSA A TERRA		<i>Codice documento</i> CS0997.doc	<i>Rev</i> 0	<i>Data</i> 09/03/2011

la corrente di guasto fase-terra lato BT, mentre t è il tempo di intervento della protezione MT in corrispondenza della corrente di guasto rilevata sul lato MT;

- PE1 e PE2 sono interessati da un guasto a valle del quadro generale di bassa tensione (fig. 3d): I è la massima corrente di guasto fase terra a valle del quadro, mentre t è il tempo di intervento per corto circuito della protezione generale.

Ciascun conduttore deve essere verificato nella condizione più gravosa.

Il conduttore di collegamento a terra degli schermi dei cavi MT può essere dimensionato sulla base della sezione degli schermi stessi. Tuttavia si assume, prudenzialmente, una sezione pari a 25 mm².

Il conduttore PE1, può anche essere scelto sulla base della regola convenzionale indicata dalla CEI 64-8, che prevede una sezione pari alla metà della sezione del conduttore di fase (se di sezione maggiore a 35 mm²). Tuttavia, specialmente quando le potenze (e quindi le sezioni) in gioco sono elevate, è preferibile ricorrere al dimensionamento in base all'integrale di Joule.

Si ricorda infine che per i conduttori di terra la sezione minima non deve comunque essere mai inferiore a 16 mm² se in rame, a 35 mm² se in alluminio e a 50 mm² se in acciaio.

Per i collegamenti equipotenziali, la Norma CEI 11-1 prevede le medesime sezioni minime.

7 Considerazioni aggiuntive

La resistività del terreno può assumere nel tempo valori anche molto diversi essendo questa fortemente influenzata dall'umidità e dalla temperatura.

Inoltre la resistività è solitamente una caratteristica tutt'altro che omogenea e varia da punto a punto sulla superficie ed in profondità.

Di conseguenza le ipotesi di progetto adottate ed i calcoli eseguiti nel presente progetto dovranno essere verificati in corso d'opera mediante misure di resistenza di terra e, qualora necessario, di tensioni di contatto e di passo.

		<p align="center">Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO</p>		
<p align="center">RELAZIONE DI CALCOLO IMPIANTO DI MESSA A TERRA</p>		<p><i>Codice documento</i> CS0997.doc</p>	<p><i>Rev</i> 0</p>	<p><i>Data</i> 09/03/2011</p>

8 Allegati

Gli allegati sono organizzati nei seguenti documenti:

- Allegato 1: Dimensionamento e verifica dell'impianto di terra

ALLEGATO 1
DIMENSIONAMENTO E VERIFICA IMPIANTO DI TERRA

GENERALITA'

Nella presente sezione vengono illustrati i calcoli di verifica dell'impianto di terra di cabina, secondo le modalità descritte nella relazione di calcolo.

In particolare i calcoli eseguiti riguardano:

- Verifica del dispersore: calcolo della tensione totale di terra UE e confronto con il limite ammesso per le tensioni di contatto U_{tp} . Qualora necessario sarà effettuata la verifica delle tensioni di contatto e passo;
- Impianto di terra interno: dimensionamento termico dei principali conduttori.

VERIFICA DISPERSORE

L'ipotesi di partenza per la verifica del dispersore di cabina è l'utilizzo di un conduttore di rame di sezione 35 mm^2 , posto lungo il perimetro della singola cabina ad una distanza di 1 m rispetto al sedime esterno del fabbricato tecnologico.

La profondità di interramento prevista è di 0.5 m.

Il dispersore è composto inoltre da n°6 picchetti, di lunghezza 2 m, posti sui 4 angoli e in corrispondenza della mezzeria del lato lungo della cabina stessa.

Le cabine oggetto di verifica sono suddivise nelle seguenti tipologie:

	Dimensioni	
	A [m]	B [m]
Tipo "A"	35	7
Tipo "B"	26.5	7
Tipo "C"	13	6.5

Nel caso specifico la cabina, a servizio del tunnel di cui trattasi, è di tipo A

In assenza di dati specifici, si assume un valore di resistività del terreno ρ_E pari a $1000 \Omega \text{ m}$ (valore cautelativo).

Per le diverse cabine sono stati esaminati i seguenti casi di studio:

- rete MT a neutro compensato;
- rete MT a neutro isolato.

I valori tipici per le correnti di guasto monofase a terra (I_E) e le tarature tipiche delle protezioni MT

(rif. CEI 0-16), assumono i seguenti valori:

	I_E [A]	t_f [ms]
neutro compensato	50	450
neutro isolato	150	170

Il tempo di intervento (t_f) indicato nella tabella si intende comprensivo del tempo di apertura dell'interruttore, fino alla completa estinzione della corrente di guasto.

Con riferimento ai valori di taratura sopra riportati, i limiti delle tensioni di contatto e di passo ammessi dalla Norma CEI11.1 assumono i seguenti valori:

	U_{tp} [V]	U_{sp} [V]
neutro compensato	≈ 248	≈ 744
neutro isolato	≈ 546	≈ 1639

All'impianto di terra in cabina, saranno inoltre connessi dei conduttori di protezione per il collegamento delle utenze in campo (gallerie e/o svincoli), alimentate dalla cabina stessa, costituiti da conduttori in rame nudo aventi sezione minima di 95 mm² posati lungo i percorsi dei cavidotti. Al fine di rappresentare nel modo più fedele la rete, tali conduttori saranno modellizzati con due elettrodi aventi lo stesso potenziale del dispersore di cabina, una lunghezza di circa 600 m (valore minimo di estensione lineare riscontrabile nel presente progetto) ed una interdistanza di circa 30m. Inoltre si segnala che, nel calcolo della resistenza dell'impianto, non sono stati considerati, cautelativamente, tutti quei dispersori di fatto (rete elettrosaldati di fondazione, ecc..) aventi effetti migliorativi, ovvero nel senso della sicurezza.

CABINA TIPO "A"

Il modello implementato è il seguente:

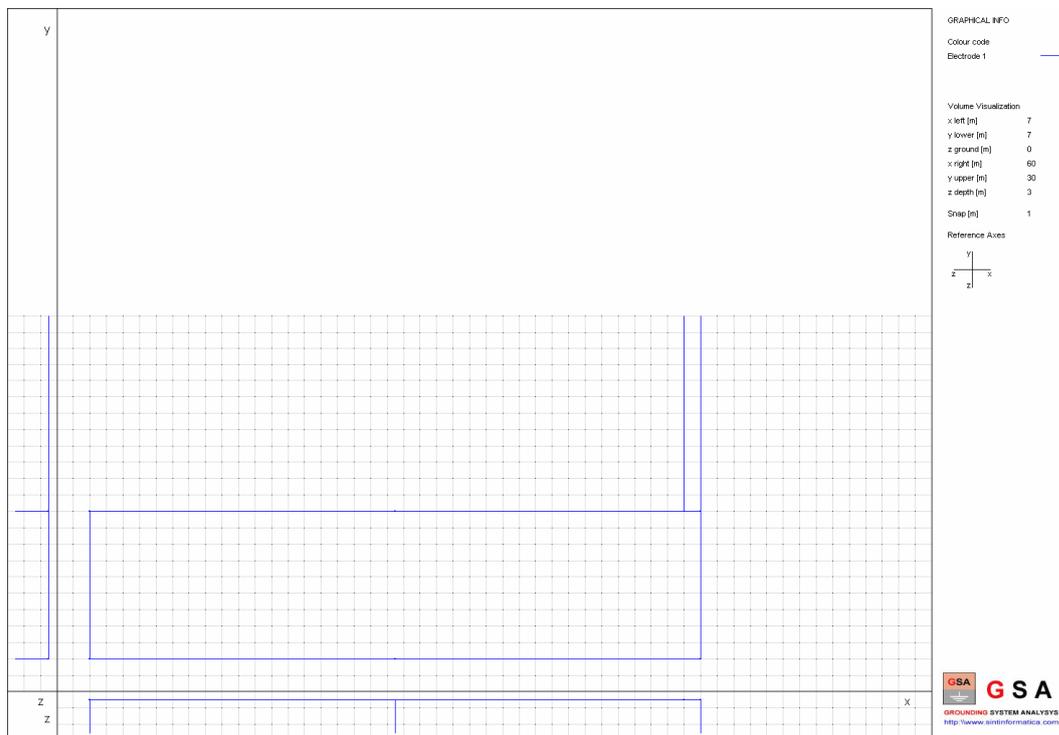


Figura 1 - Modello dispersore di cabina

Con rete a neutro compensato:

$$I_E = 50 \text{ A}$$

$$t_f = 450 \text{ ms}$$

I risultati sono di seguito riportati:

Neutro compensato	
R_E [Ω]	2.95
U_E [V]	147.6
U_{tp} [V]	248
U_{sp} [V]	744

La tensione totale di terra U_E è inferiore ai limiti imposti dalla Norma CEI11.1 relativamente alle tensioni di contatto (U_{tp}) e di passo e (U_{sp}), per cui non sarà necessaria la verifica delle tensioni di passo e contatto.

Con rete a neutro isolato:

$$I_E = 150 \text{ A}$$

$$t_f = 170 \text{ ms}$$

I risultati sono di seguito riportati:

Neutro isolato	
R_E [Ω]	2.95
U_E [V]	442.7
U_{tp} [V]	546.2
U_{sp} [V]	1638.6

La tensione totale di terra U_E è inferiore ai limiti imposti dalla Norma CEI11.1 relativamente alle tensioni di contatto (U_{tp}) e di passo e (U_{sp}), per cui non sarà necessaria la verifica delle tensioni di passo e contatto.

Nel seguito si riportano, per completezza e con riferimento al caso di neutro compensato (situazione più probabile), i seguenti grafici prodotti dal software di calcolo:

- distribuzione 3D dei valori di φ (potenziali sulla superficie del terreno) calcolati;
- curve di livello equipotenziali della distribuzione dei valori di φ ;
- confronto tra tensioni di contatto e di passo ed i relativi limiti ammessi;
- distribuzione 3D delle tensioni di contatto;
- distribuzione delle tensioni di contatto e di passo lungo la direttrice di calcolo (posta al centro della cabina e parallela al lato maggiore).

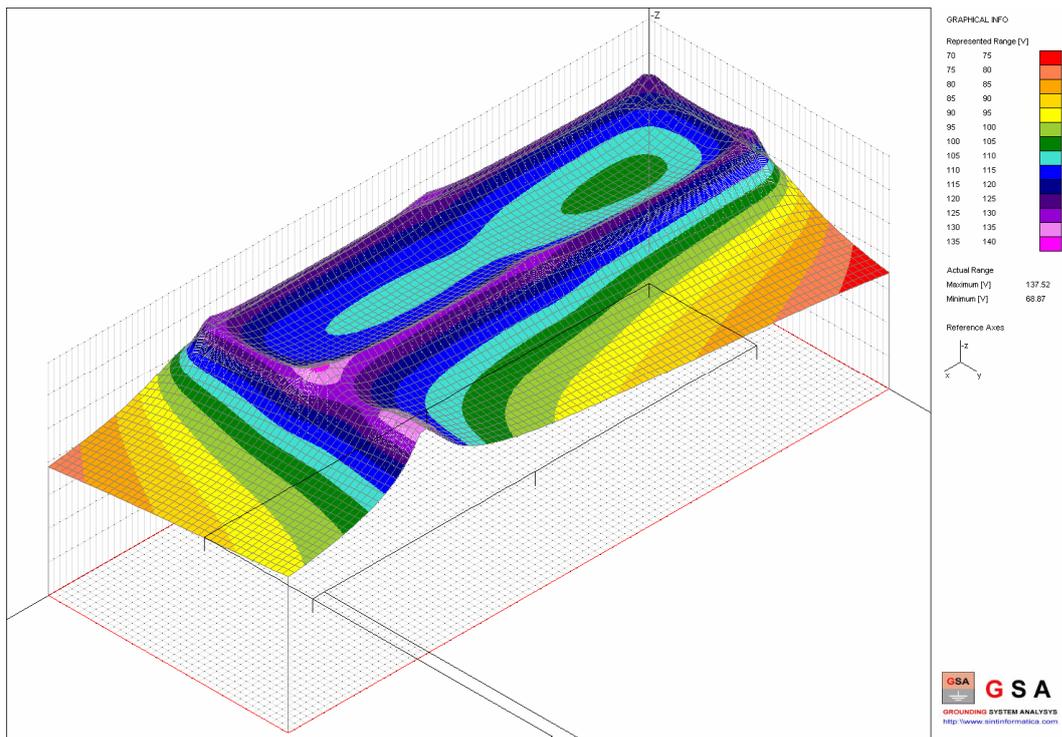


Figura 2 - Distribuzione dei potenziali sulla superficie del terreno (rappresentazione 3D)

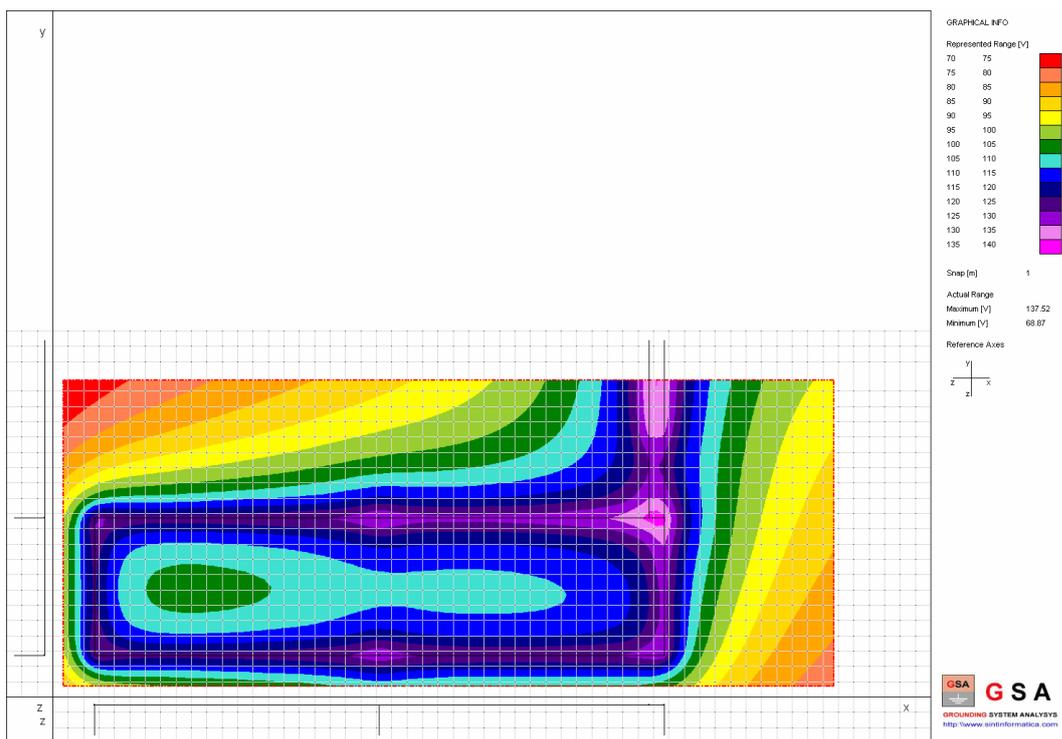


Figura 3 - Distribuzione dei potenziali sulla superficie del terreno (rappresentazione 2D)

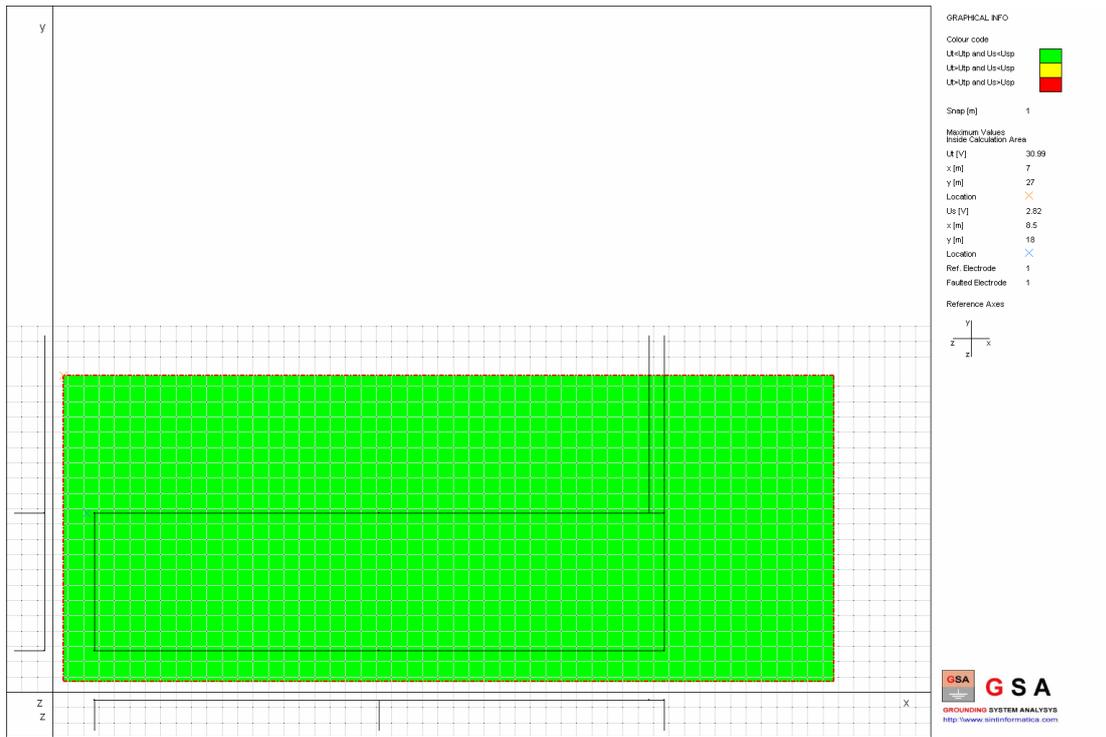


Figura 4 - Confronto tra tensioni di contatto e di passo ed i relativi limiti ammessi

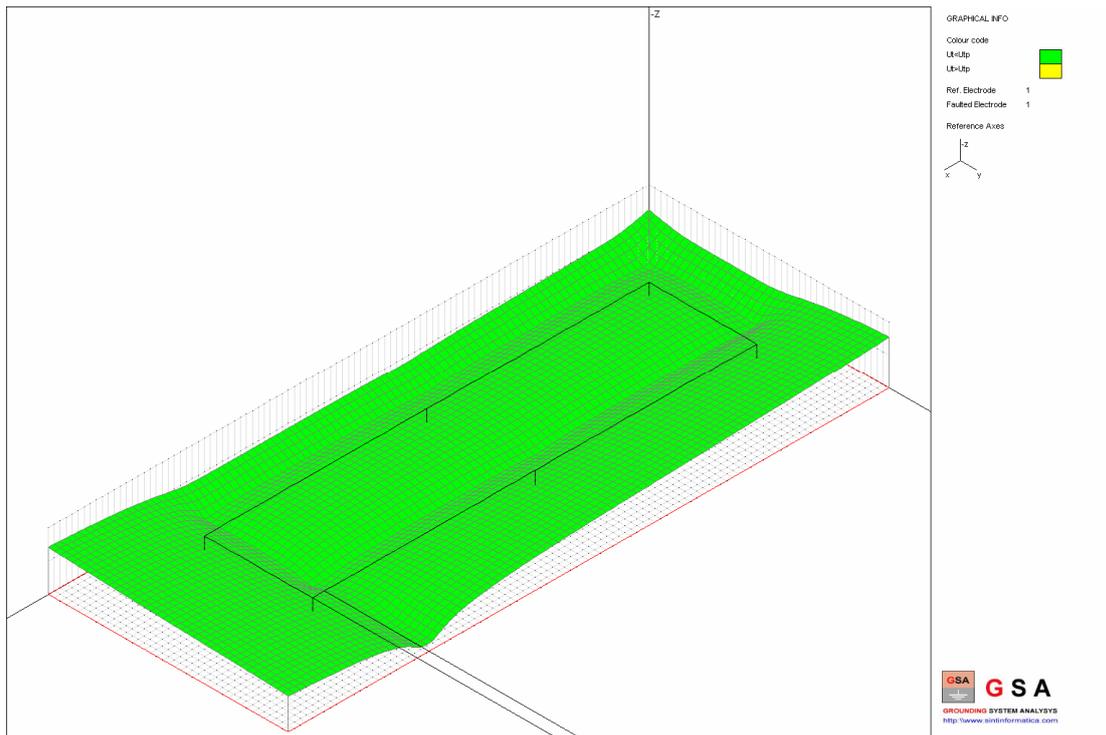


Figura 5 - Distribuzione delle tensioni di contatto e confronto con i limiti ammessi (rapp. 3D)



Figura 6 - Tensioni di contatto e di passo lungo la direttrice di calcolo

Per una verifica, seppur approssimativa, dei risultati ottenuti con il codice di calcolo GSA si può ad esempio confrontare il valore delle resistenza ricavato con il software con il valore che si ottiene utilizzando delle formule semplificate che si trovano in letteratura.

Nel caso specifico poiché il dispersore è costituito, essenzialmente, da un elettrodo interrato orizzontalmente a 0,5m di profondità, realizzato con una corda di rame nudo avente sezione di 95 mm² ed uno sviluppo complessivo di 1200m (due corde da 600m tra loro connesse), si può utilizzare la seguente formula semplificata:

$$R_E = \frac{\rho}{4\pi L} \left\{ 2 \ln \left(\frac{L}{r_0} \right) + \ln \left[\frac{\frac{L}{2} + \sqrt{\left(\frac{L}{2}\right)^2 + (2h + r_0)^2}}{-\frac{L}{2} + \sqrt{\left(\frac{L}{2}\right)^2 + (2h + r_0)^2}} \right] \right\}$$

dove

- ρ : resistività del terreno pari a 1000 ohm·m
- L: Lunghezza elettrodo (pari a 1200m)
- $r_0 = 5,5 \cdot 10^{-3}$ m
- h: profondità di interramento (pari a 0,5m)

Con la formula ed i valori sopra riportati si ricava un valore di R_E pari a 2,53 Ohm . Il valore di GSA (vedi paragrafi precedenti) seppur comparabile con tale valore risulta più alto: ciò si spiega considerando che i due elettrodi lineari da 600m che compongono il dispersore, nella realtà risultano tra loro accoppiati: di questo mutuo accoppiamento GSA ne considera gli effetti in termini di potenziale sul terreno e, conseguentemente, in termini di resistenza di terra. La formula semplificata, ipotizzando i due elettrodi perfettamente in parallelo, trascura questa mutua influenza: ne risulta una resistenza equivalente del dispersore minore.

DIMENSIONAMENTO IMPIANTO DI TERRA INTERNO

Si riportano di seguito i calcoli di dimensionamento dei principali conduttori di terra e di protezione che compongono l'impianto di terra all'interno della cabina.

Il trasformatore ed il gruppo elettrogeno installati nella cabina di cui trattasi hanno taglia pari a 630 kVA.

In particolare, al fine del calcolo dell'integrale di Joule, il coefficiente Kt per conduttori in rame e isolati in coma G9 è ricavato nella tabella seguente, date le temperature iniziali e finali (rif CEI 64-8/5 – tab.54B CEI 11-1 – Allegato B):

Parametro	Rame isolato G9
θ_f	250
θ_i	30
β	234.5
K	226
Kt	175.8

Funzionamento da rete		
Dati di ingresso		
Trasformatore MT/bt		
Tensione nominale primario V1n [V]	20.000	
Tensione nominale secondario V2n [V]	400	
Potenza nominale [kVA]	630	
Impedenza di cto cto [%]	6,00	
Zcc [ohm]	0,0152	
Corrente di guasto trifase I" k [A]	16.670,99	
Dati impianto		
Impedenza cavo trasf-QBT [ohm]	-	
Kt CT1	175,83	Cavo tipo N07G9-K
Kt CT2	175,83	Cavo tipo N07G9-K
Kt PE1	175,83	Cavo tipo N07G9-K
Kt PE2	175,83	Cavo tipo N07G9-K
Guasto a terra lato MT		
Corrente di doppio guasto a terra lato MT [A] con rete a neutro compensato I" kEE	10.825,32	
Tempo di intervento della protezione [s]	0,12	
I ² t	1,41E+07	
Guasto fase-terra lato bt		
Corrente di guasto a terra lato bt [A]	16.670,99	
Corrente di guasto lato bt trasferita lato MT [A]	192,50	
Tempo di intervento della protezione MT [s] (eliminazione del guasto)	0,50	
I ² t	1,39E+08	
Guasto fase-terra a valle del quadro bt		
Corrente di guasto a valle dell'interruttore generale [A]	16.670,99	
Tempo di intervento della protezione [s]	0,015	
I ² t	4,17E+06	
Calcolo sezioni		Sezione [mm²]
Carcassa TR-Collettore (CT1)	67,04	
Collettore-Dispensore (CT2)	21,33	
Neutro-Collettore (PE1)	67,04	
Quadro bt-Collettore (PE2)	11,61	
Carcassa QMT - Collettore	21,33	
Sezioni commerciali scelte		Sezione [mm²] Verifica
Carcassa TR-Collettore (CT1)	120,00	OK
Collettore-Dispensore (CT2)	25,00	OK
Neutro-Collettore (PE1)	120,00	OK
Quadro bt-Collettore (PE2)	25,00	OK
Carcassa QMT - Collettore	25,00	OK
Funzionamento da gruppo elettrogeno		
Dati di ingresso		
Gruppo elettrogeno		
Tensione nominale Vn [V]	400	
Potenza nominale [kVA]	630	
Xd" [p.u.]	0,126	
X2 [p.u.]	0,142	
X0 [p.u.]	0,088	
Zcc [p.u.] (Zd"+Z2+Z0)	0,356	
Zcc [ohm] (Zd"+Z2+Z0)	0,090412698	
Corrente di guasto fse-terra I" k 1F [A]	7662,87	
Tempo di intervento della protezione di gruppo [s] (1)	1	
I ² t	5,87E+07	
Kt	175,83	Cavo tipo N07G9-K
Calcolo sezioni		Sezione [mm²]
Centro stella GE - Collettore	43,58	
Carcassa GE - Collettore	43,58	
Sezioni commerciali scelte		Sezione [mm²] Verifica
Centro stella GE - Collettore	120,00	OK

NOTE:

(1) Considerato come intervento della protezione di frequenza, nel caso di guasto a monte dell'interruttore BT