



Sensore senza contatto per linea a 3 kVcc

Analisi di campo e principi di rivelazione

Università degli Studi di Pavia

Dipartimento di Ingegneria Industriale e dell'Informazione

Prof. Ing. **Paolo Di Barba** (paolo.dibarba@unipv.it)

Dott. Ing. Maria Evelina Mognaschi

Ing. Luca Canevari, Dott. Ing. Alessandro Liberale, P.I. Andrea Albin

RFI SpA

Direzione Produzione, Roma

Dott. Ing. Ciro Ianniello, Dott. Ing. Giovanni Francone, Dott. Fabrizio Maliore

Direzione Territorial Produzione, Firenze

Dott. Ing. Efsio Murgia, Dott. Ing. Sandro Muccifuori, Sig. Francesco Petito



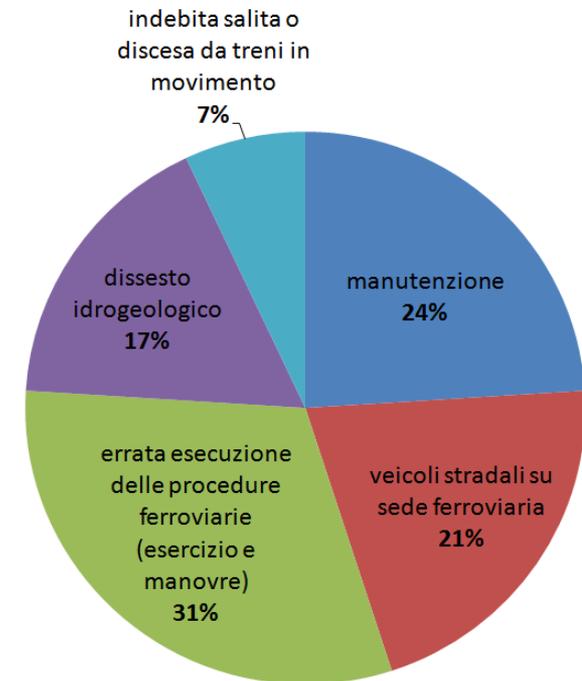
Piano della presentazione

- Sicurezza ferroviaria in ambito TE
- La collaborazione di ricerca RFI – UniPV
- Strumenti per l'analisi del campo elettrico
- Metodi di rivelazione senza contatto
- Modelli di varie configurazioni di linea aerea
- Dispositivi di rivelazione del campo elettrostatico
- Principio dell'elettroscopio elettronico
- Primi prototipi realizzati



Sicurezza ferroviaria

- Nel 2014 si sono registrati 109 incidenti definiti “gravi” con:
 - 53 morti
 - 41 feriti
- Gli incidenti sono da imputare principalmente a:
 - Materiale rotabile in movimento (59% degli incidenti)
 - Manutenzione (causa o concausa del 24% degli incidenti)



Tipologie di incidenti avvenuti nel 2014

Operaio 31enne muore folgorato a Sarmato sui binari della ferrovia



E' morto fulminato da una scarica di 3.000 volt l'operaio pavese che stava iniziando alcuni lavori di manutenzione all'altezza del passaggio a livello di Sarmato.

BRESSANA

la Provincia
PAVESE

Incidente sul lavoro, muore operaio di Bressana

La tragedia questa mattina lungo la linea ferroviaria in territorio di Sarmato (Piacenza). L'uomo, 31 anni, è rimasto folgorato mentre lavorava con il muletto vicino alla linea elettrica

IL PIACENZA

Cronaca

Cronaca / Sarmato / Via Po

Sarmato, operaio muore folgorato al passaggio a livello

Un operaio di 31 anni è rimasto folgorato ed è morto per un scarica di 3mila volt al passaggio a livello a Sarmato sulla tratta ferroviaria Piacenza-Alessandria in via Po. Sul posto i soccorsi del 118 e i carabinieri



Sicurezza ferroviaria in ambito TE

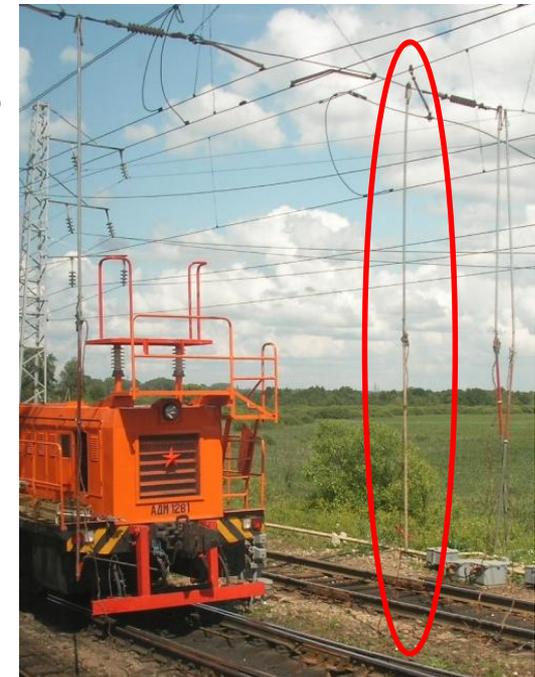
Livello attuale di sicurezza nell'ambito della manutenzione:

- La linea viene sezionata tramite gli appositi sezionatori nelle SSE
- Si utilizza una coppia di “fioretti” che consentono di mettere a terra la linea di contatto

Queste procedure **garantiscono la sicurezza**

Sono presenti, però, alcune **situazioni critiche** in cui è richiesta particolare attenzione

Fioretti utilizzati nella manutenzione





Sicurezza ferroviaria in ambito TE

Situazioni critiche per la sicurezza nella manutenzione:

- Mancati sezionamenti, dovuti a incomprensioni o errori umani
- Lavori in prossimità di spazi d'aria

È auspicabile disporre di un sensore di campo in grado di verificare il corretto sezionamento della linea prima di iniziare i lavori

Sistemi di elettrificazione utilizzati in Italia:

- 2x25 kV, corrente alternata, 50 Hz (alta velocità)
- 3 kV, corrente continua (linee tradizionali)

Spazio d'aria:





Premessa e motivazioni I

Le norme CEI, per le linee alimentate a 3kVcc prevedono la fase di verifica preliminare dell'avvenuta toltà tensione.

In particolare, le **Norme CEI [11-27]** prevedono cinque fasi per la procedura di messa fuori tensione:

1. sezionare la parte di impianto interessata al lavoro;
2. prendere provvedimenti contro la richiusura intempestiva dei dispositivi di sezionamento;
3. verificare che l'impianto sia fuori tensione;
4. eseguire la messa a terra e in cortocircuito delle parti sezionate in AT e in MT e, ove richiesta, anche in BT;
5. provvedere alla protezione verso le eventuali parti attive adiacenti.

La verifica preliminare della toltà tensione deve essere svolta prima dell'installazione dei dispositivi di corto circuito i quali soli garantiscono:

- la messa in sicurezza della zona elettrica oggetto d'intervento;
- la protezione da possibili rialimentazioni.



Premessa e motivazioni II

RFI prevede la verifica strumentale preliminare, con l'ausilio di un dispositivo di rilevamento della presenza di tensione con modalità non a contatto, per gli impianti a 25kVca (corrente alternata).

Ad oggi l'industria di settore non mette a disposizione, per analogia verifica strumentale preliminare su linee a 3kVcc, un rivelatore di tensione non a contatto.

Per questa ragione, **RFI ha promosso e attivato con l'Università di Pavia uno studio finalizzato alla progettazione e realizzazione di un dispositivo di rilevamento della presenza di tensione a distanza di sicurezza**, adeguato a verificare l'assenza di tensione in tutte le configurazioni d'impianto in ambiente ferroviario con alimentazione a 3kVcc.



Filiera operativa futura

Procedure di
interruzione linea

Lavori sulla
linea



Verifica strumentale
senza contatto

Sensore:

linea AC – comunemente utilizzato (induzione elettromagnetica)

linea DC – in fase avanzata di sviluppo (induzione elettrostatica)



Caratteristiche del sensore

sicurezza

portabilità

&

affidabilità

Dispositivi **senza** contatto
con la linea aerea

ridondanza

apparato monosensore

apparato multisensore



Strumenti per l'analisi del campo elettrico



Analisi della geometria del problema

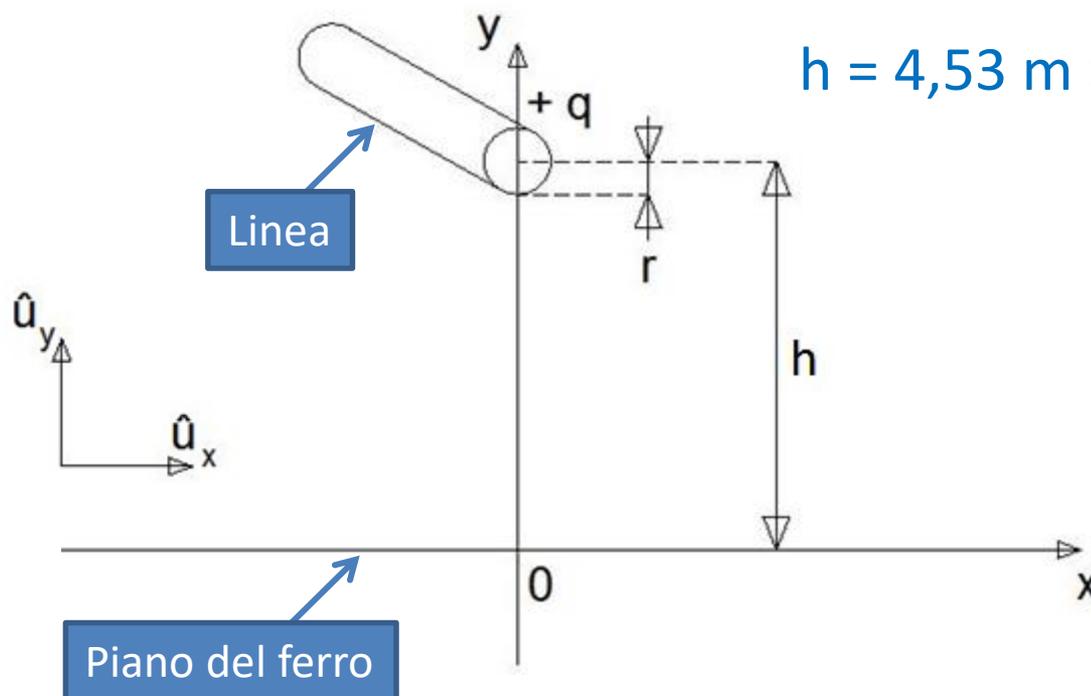
Modello base: conduttore rettilineo indefinito a quota “h” dal piano del ferro:

Sezioni in uso FS:

- 320 mm²
- 440 mm²
- 610 mm²

$h = 5 \text{ m}$ (linea alta)

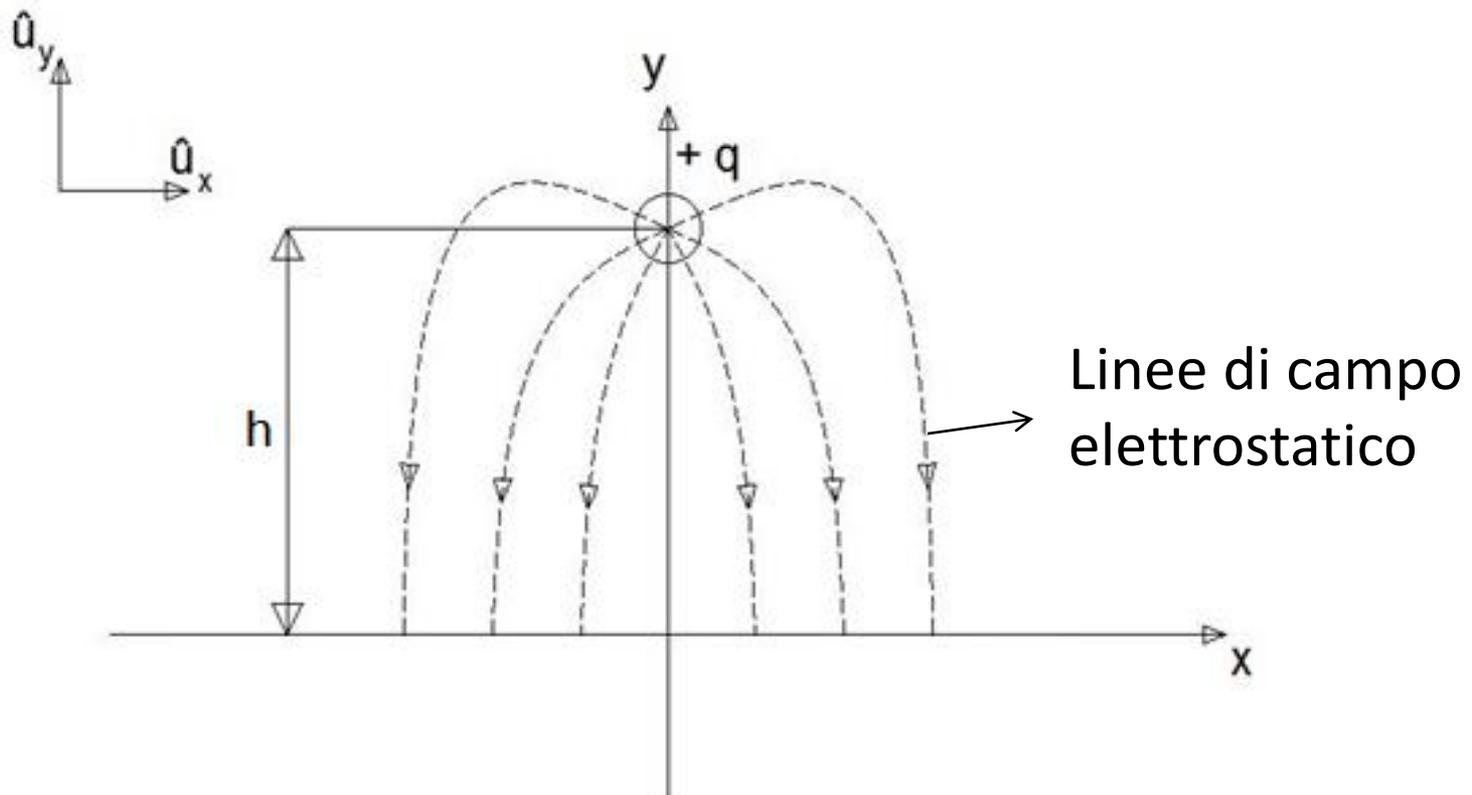
$h = 4,53 \text{ m}$ (linea bassa)





Analisi della geometria del problema

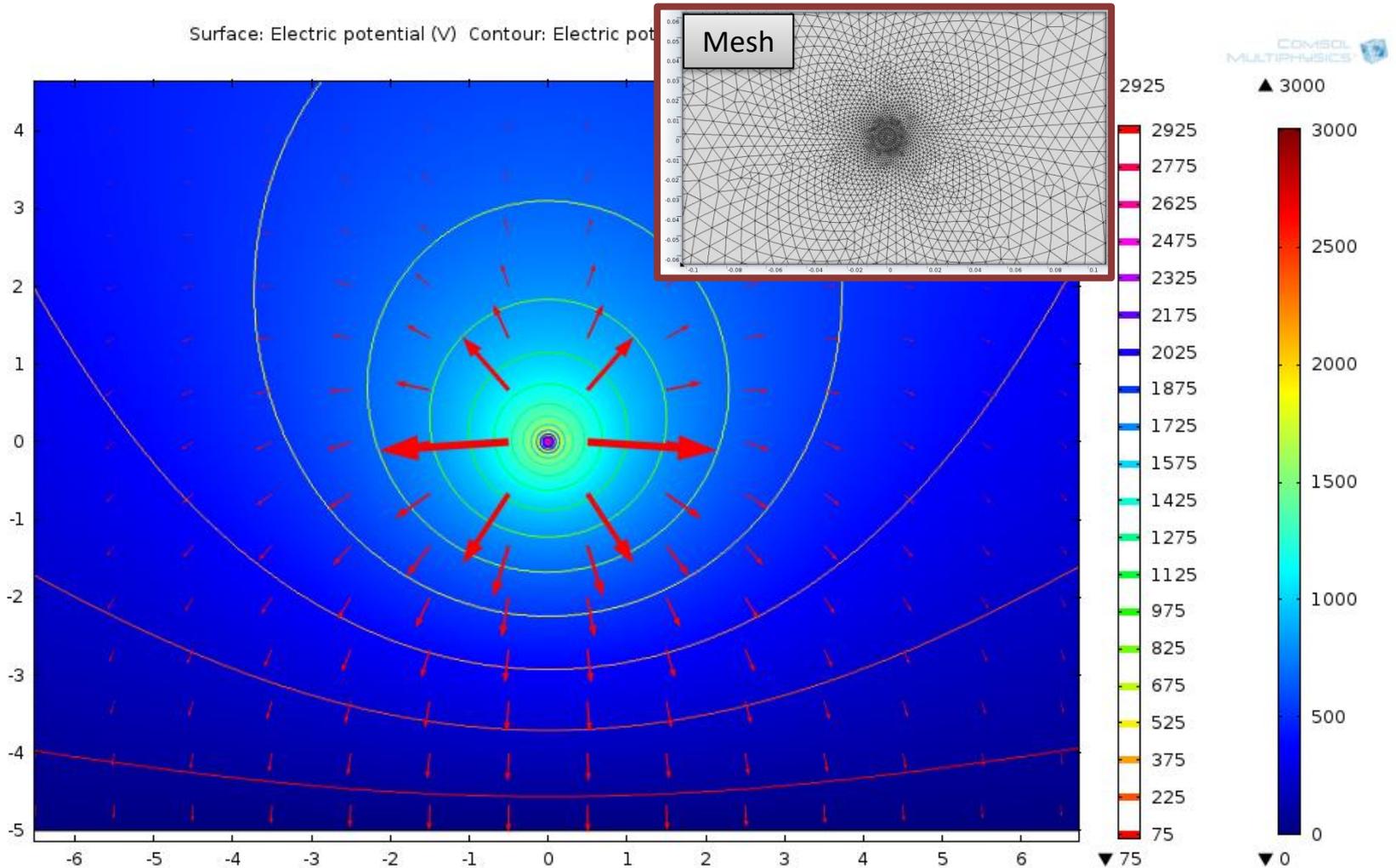
Fra conduttore e terra è applicata una tensione di 3 kV
in corrente continua





Modelli numerici

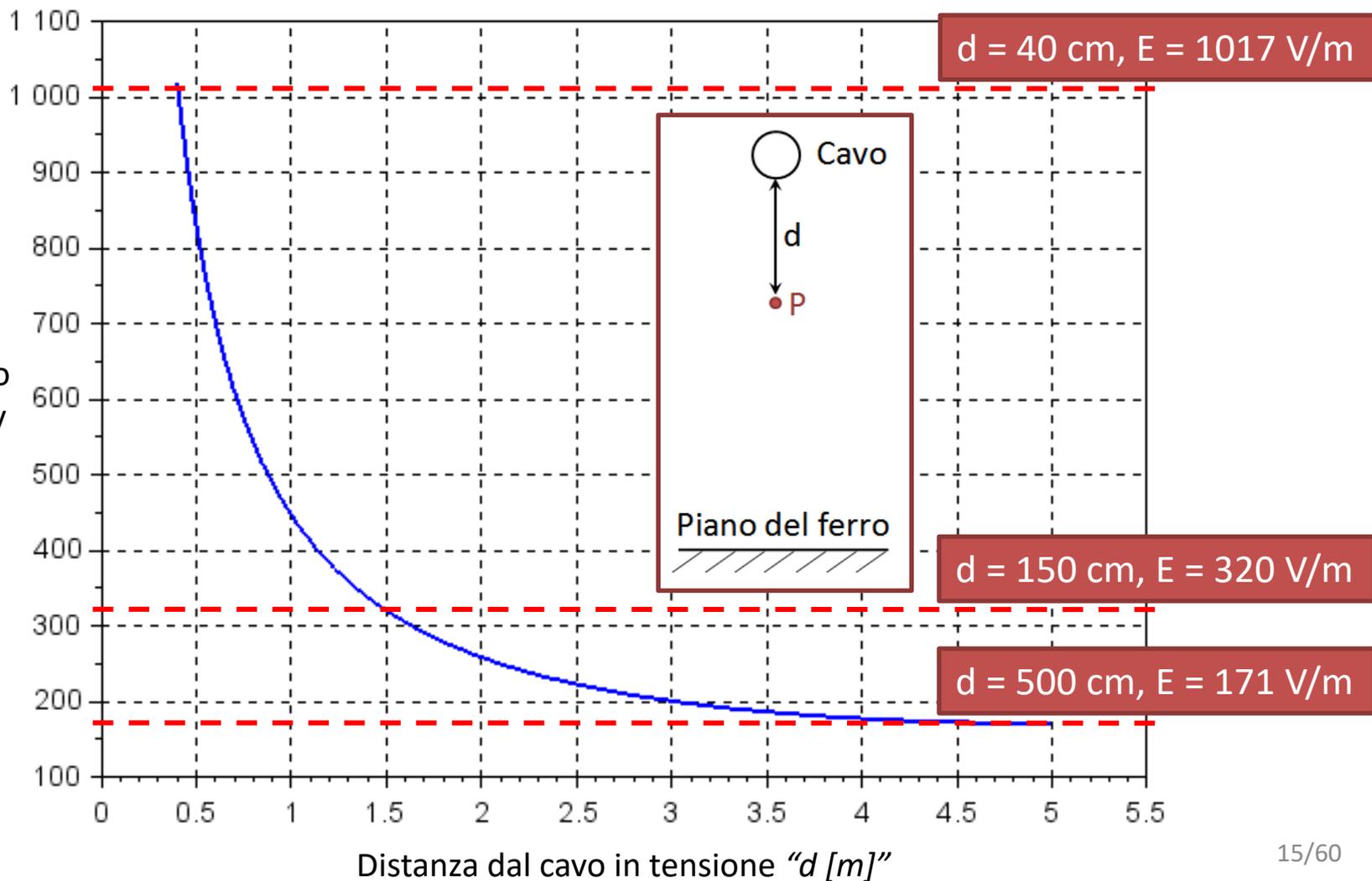
Metodo degli elementi finiti





Modelli numerici

Modulo del campo elettrico in funzione della distanza dal cavo





Metodi di rivelazione senza contatto

Sono possibili due approcci:



Elettrodo di rivelazione
isolato

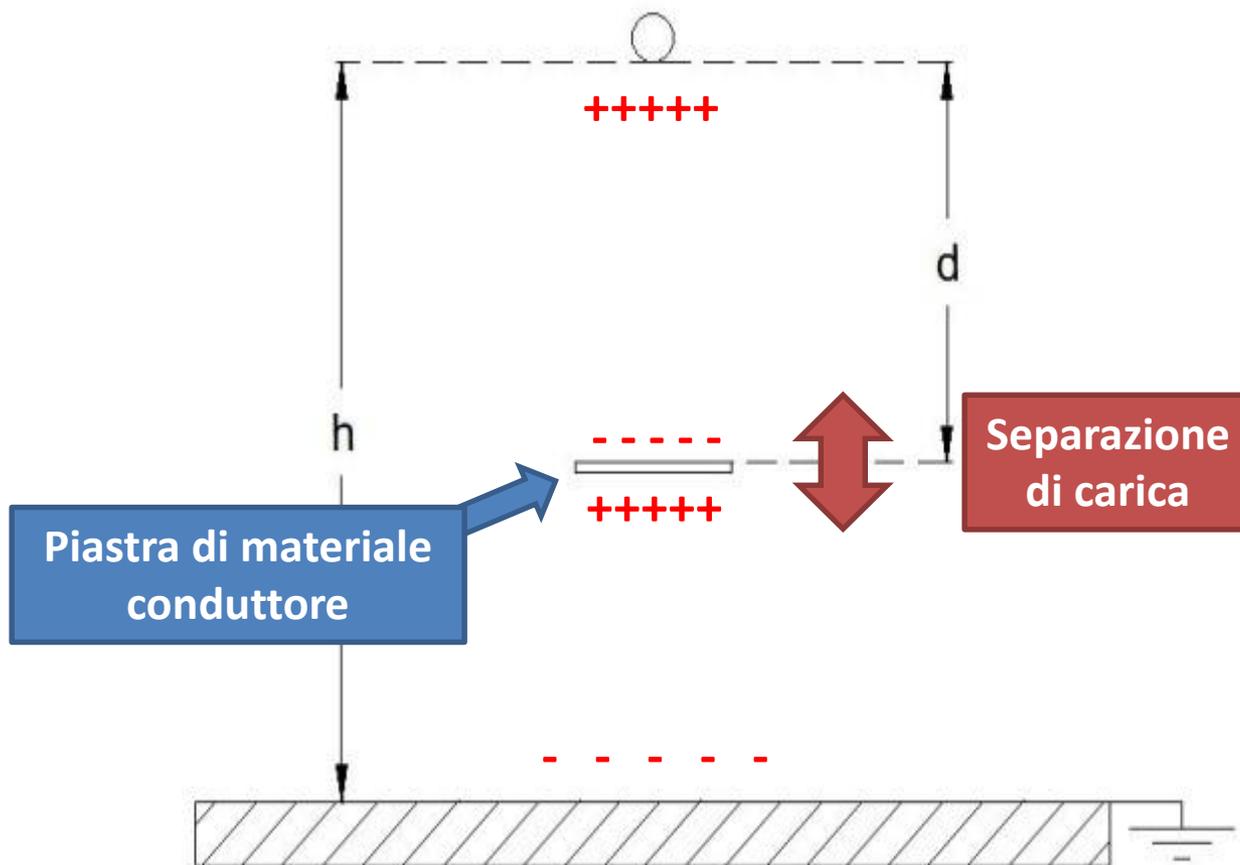


Elettrodo di rivelazione
collegato a terra



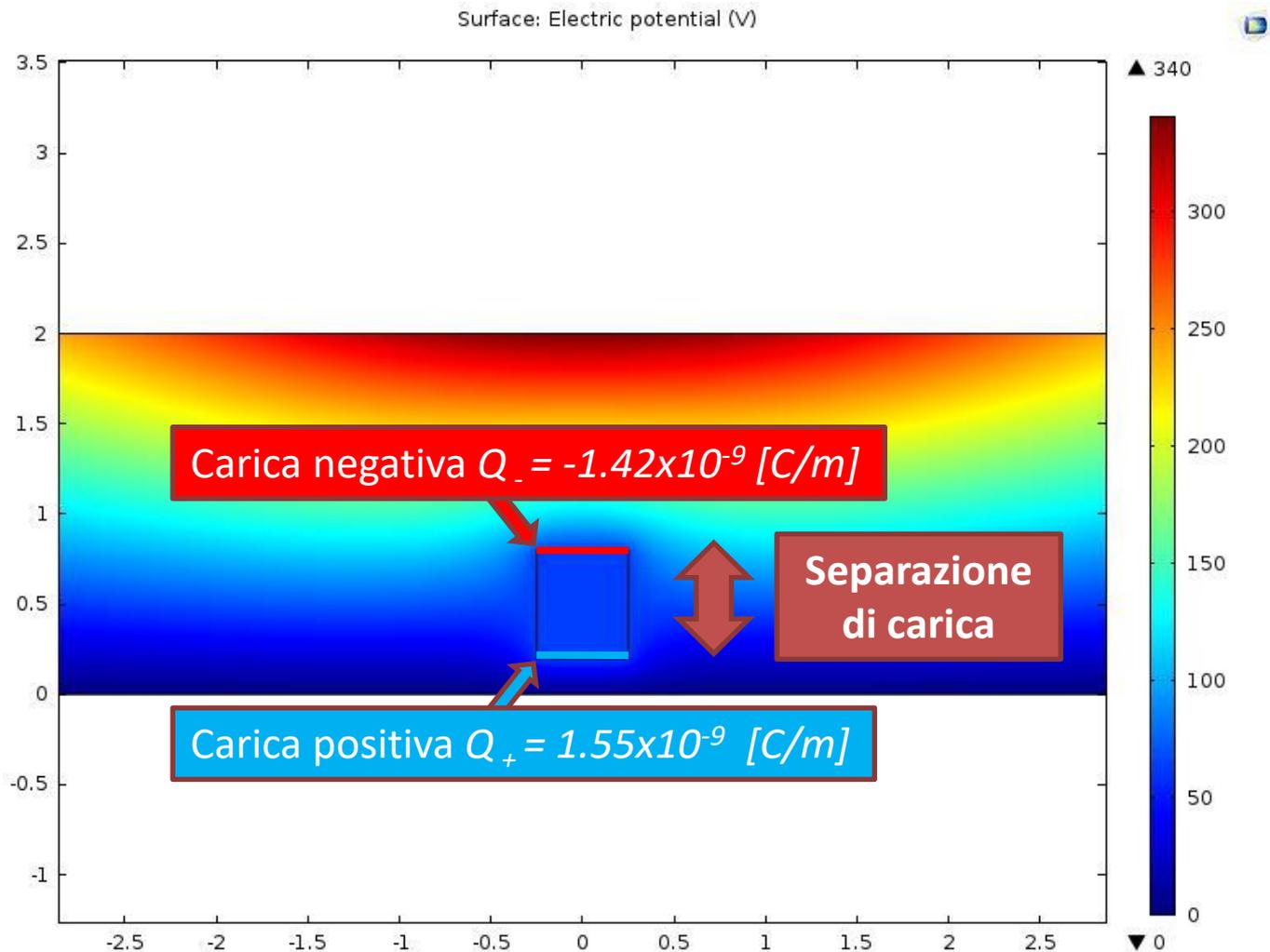
Elettrodo di rivelazione isolato

Induzione elettrostatica su un elettrodo di rivelazione isolato:





Elettrodo di rivelazione isolato

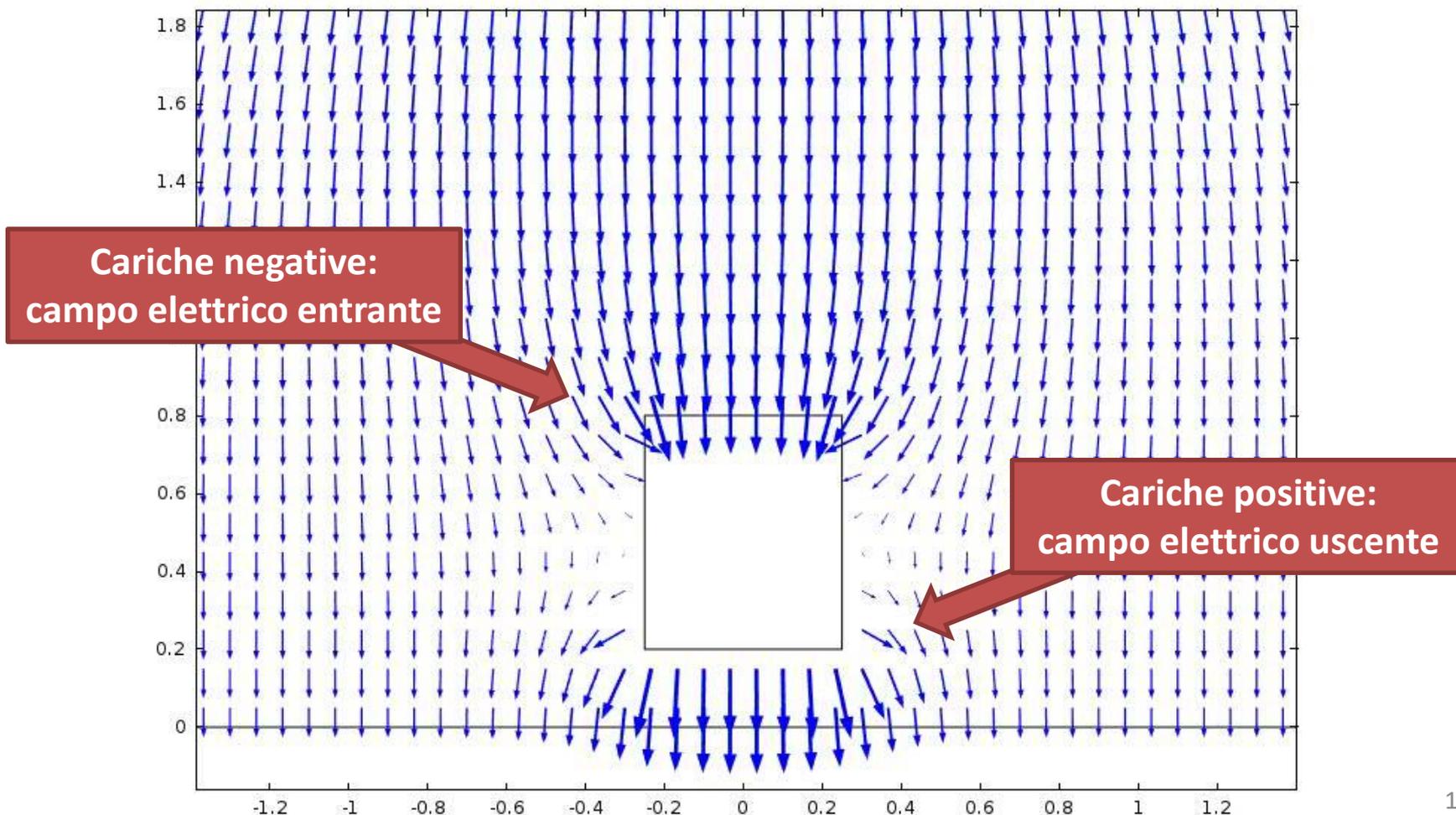




Elettrodo di rivelazione isolato

Arrow Surface: Electric field

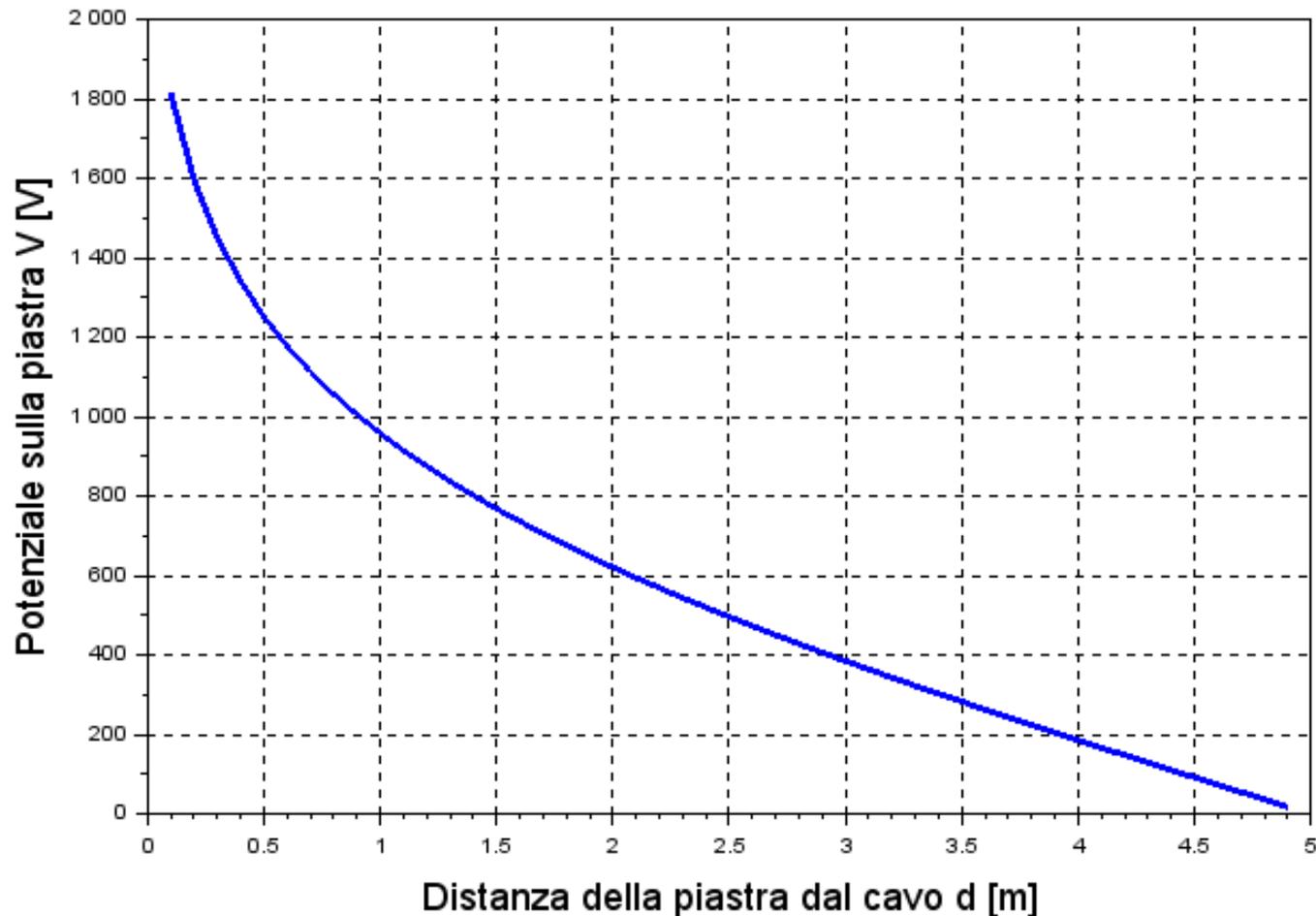
COMSOL
MULTIPHYSICS





Elettrodo di rivelazione isolato

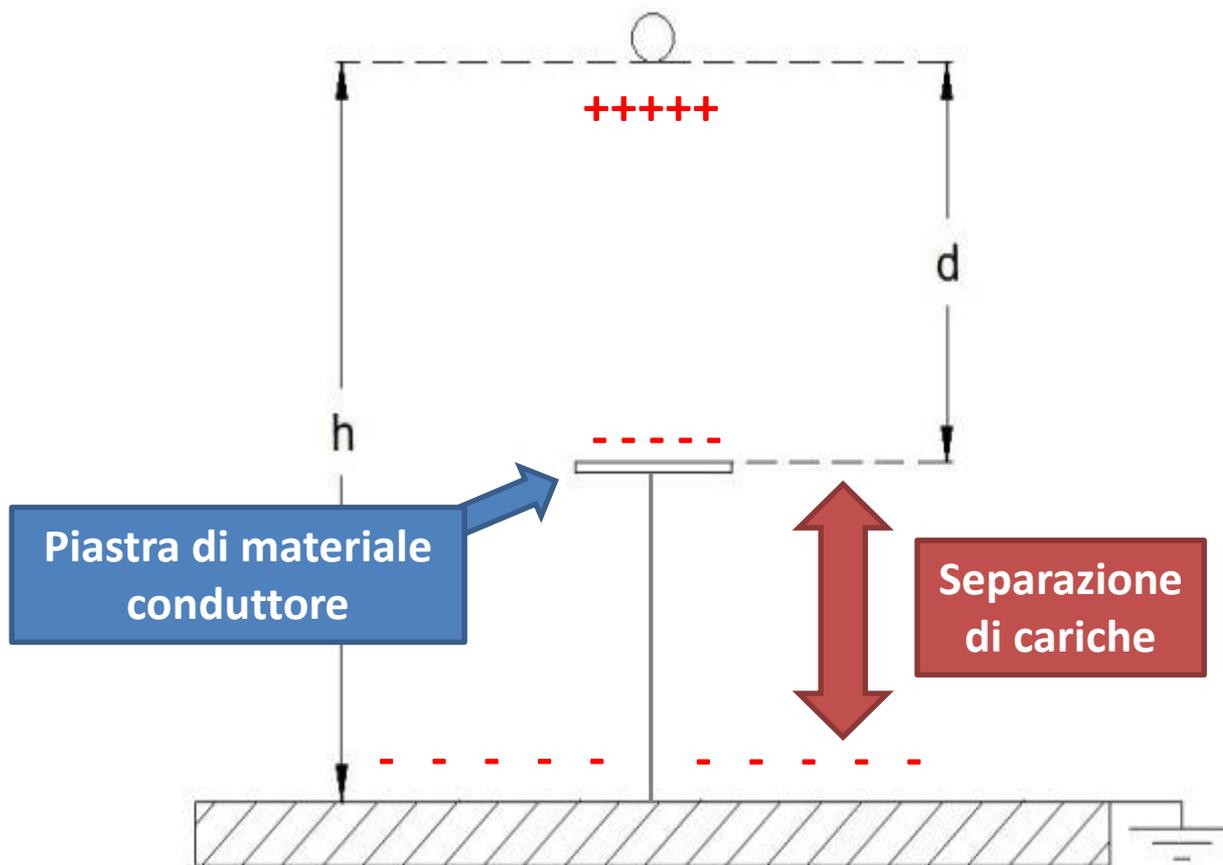
Andamento del potenziale sull'elettrodo





Elettrodo di rivelazione a terra

Induzione elettrostatica su una piastra collegata a terra:

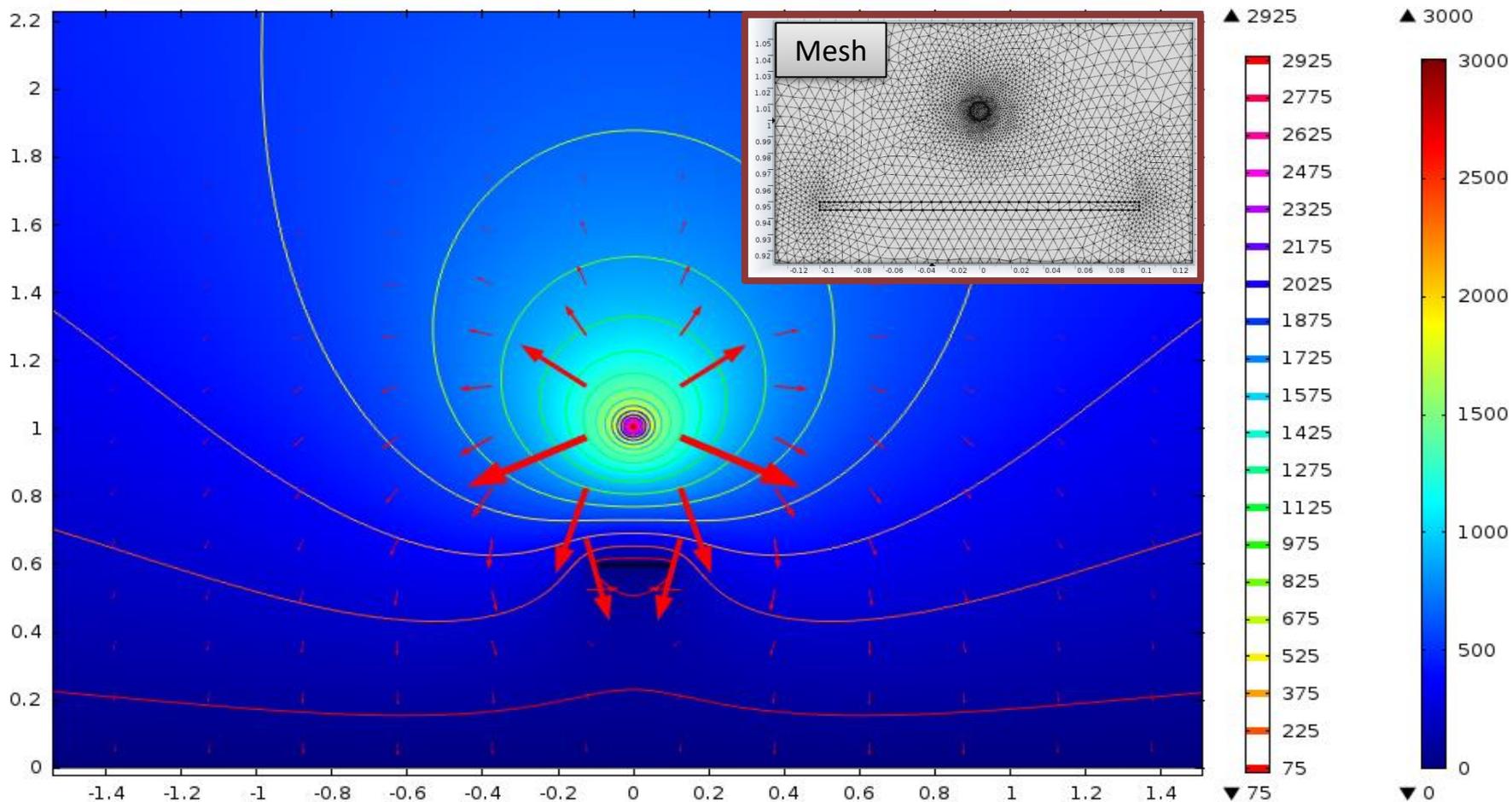




Elettrodo di rivelazione a terra

Surface: Electric potential (V) Contour: Electric potential (V) Arrow Surface: Electric field

COMSOL
MULTIPHYSICS



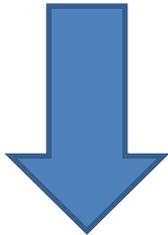


Confronto metodi di rivelazione

Esempio:

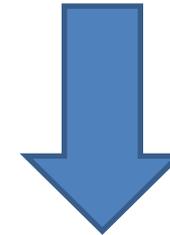
- Piastra 20x20 cm²
- Piastra a 50 cm dal conduttore di linea
- Franco linea: 5 m

Elettrodo di rivelazione
isolato



$$2.32348 \times 10^{-10} C$$

Elettrodo di rivelazione
collegato a terra

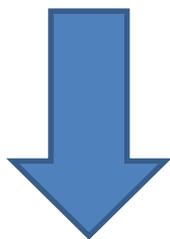


$$1.28148 \times 10^{-8} C$$



Confronto metodi di rivelazione

Elettrodo di rivelazione
isolato



- Minore quantità di carica accumulata
- **Assenza di presa di terra**

Elettrodo di rivelazione
collegato a terra



- **Maggiore quantità di carica** accumulata
- Presa di terra

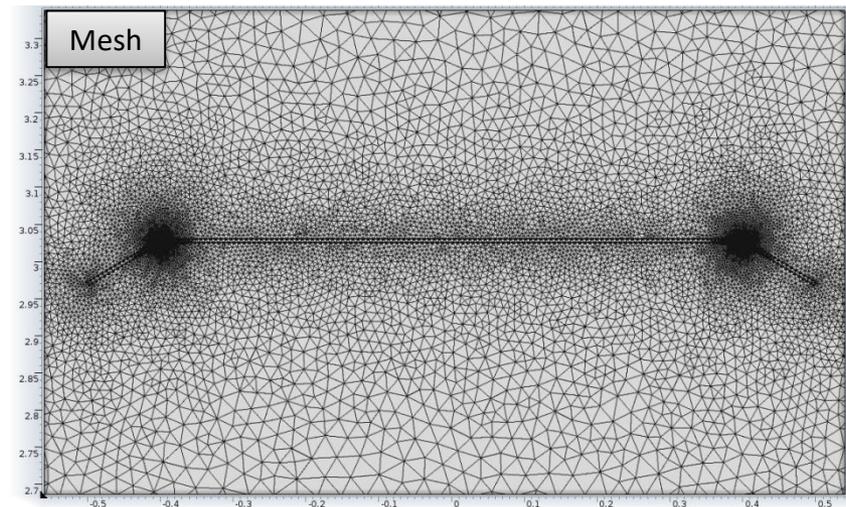


Modelli di diverse configurazioni di linea

- La piastra di rilevazione viene considerata di dimensioni e forma assimilabili a quelle del pantografo in uso TE per il rilievo geometrico della linea:



- Tipologie di linea:
 - Alte ($h = 5.5$ m)
 - Basse ($h = 4.53$ m)
- A loro volta possono essere:
 - Linee singole
 - Linee parallele (fino a tre cavi affiancati)

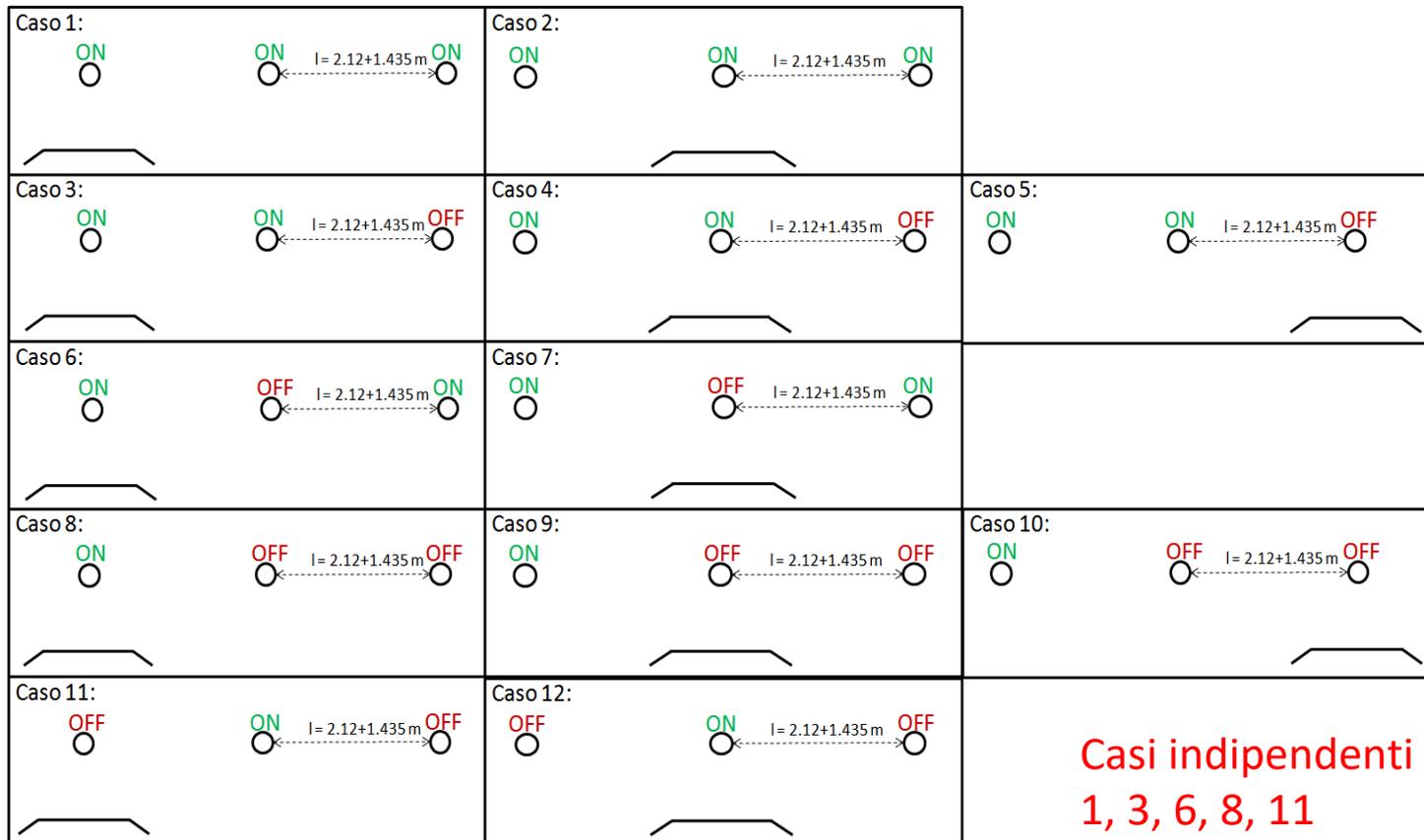


L'elettrodo/pantografo viene considerato collegato a terra



Modello linea reale

- Nel caso di linee parallele sono possibili 12 casi:



Casi indipendenti
1, 3, 6, 8, 11



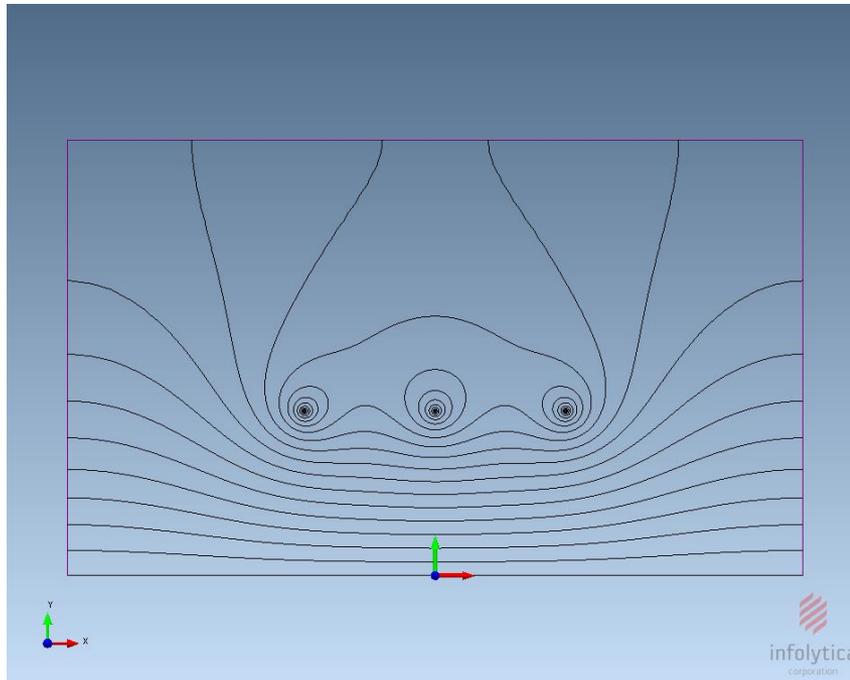
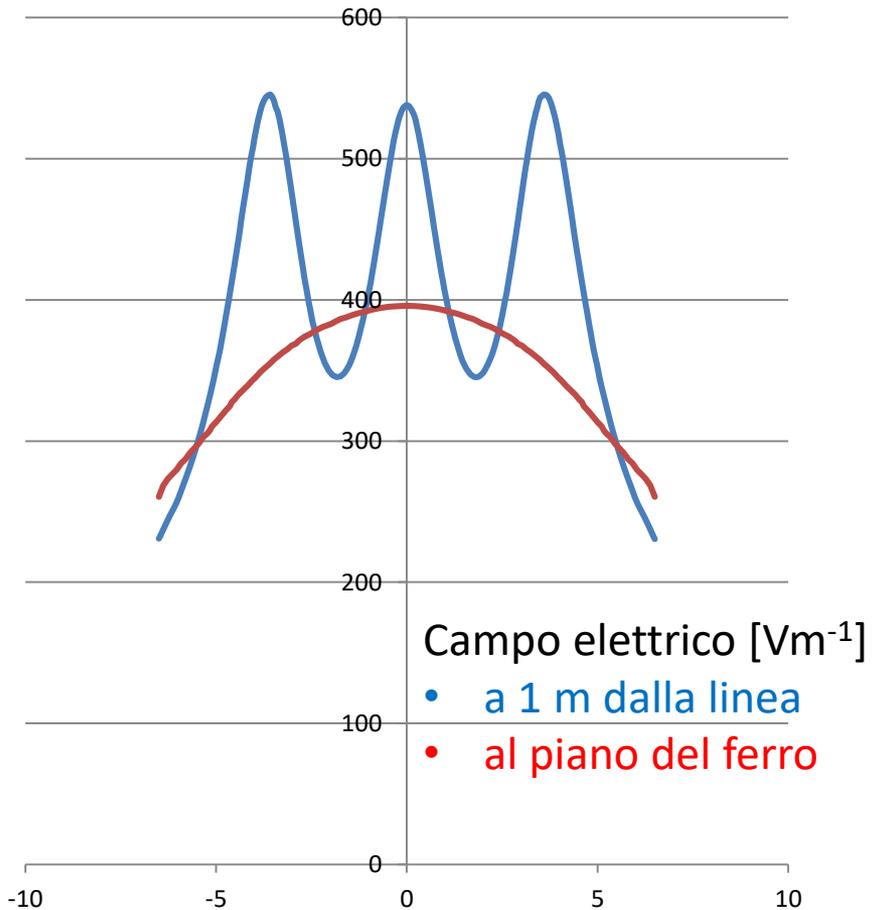
Modello linea reale

- Caso 1

ON
○

ON $l = 2.12 + 1.435\text{m}$ ON
○ ←-----→ ○

Diametro conduttore 28 mm (610 mm²)
Franco h = 4.53 m (linea bassa)



Mapa equipotenziale



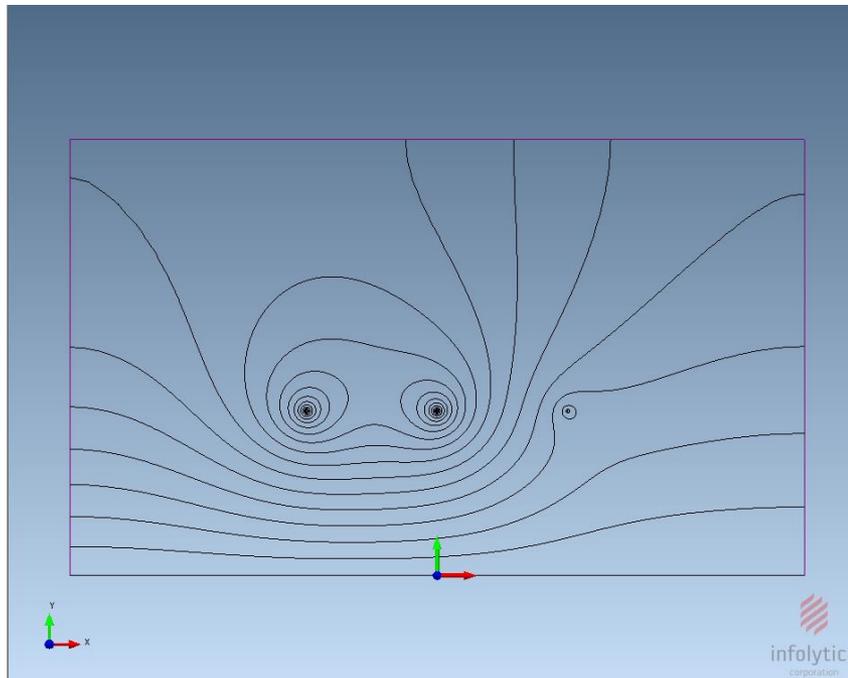
Modello linea reale

- Caso 3

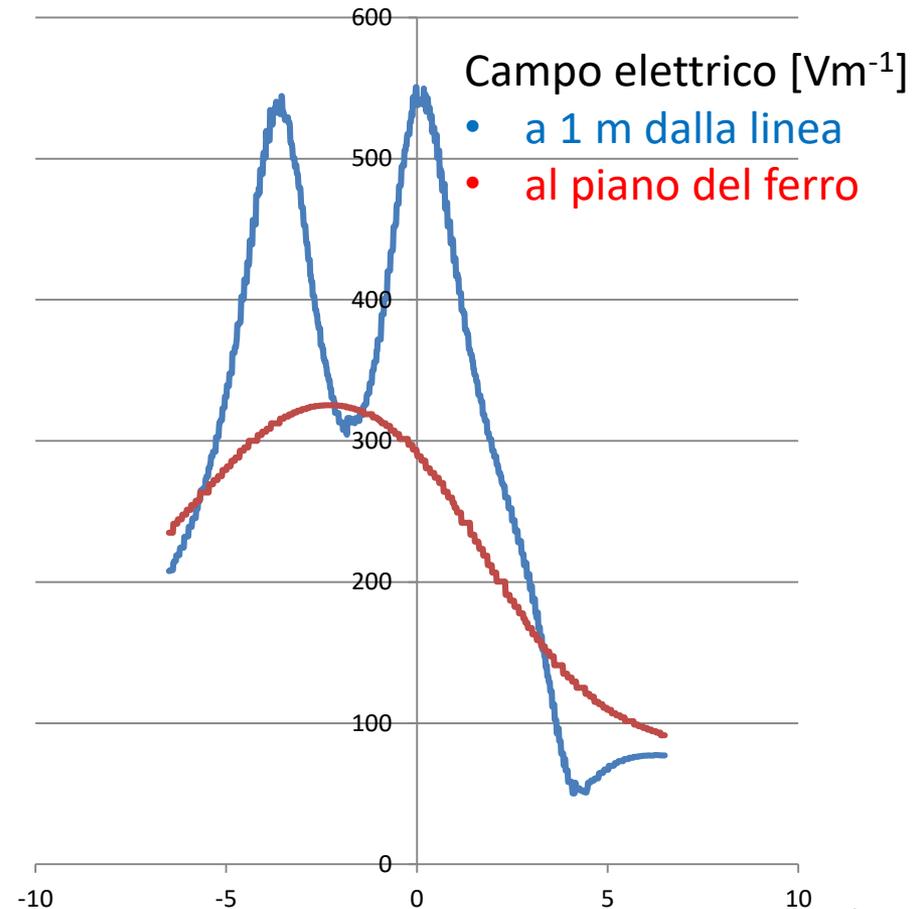
ON
○

ON ○ $l = 2.12 + 1.435\text{m}$ OFF ○

Diametro conduttore 28 mm (610 mm^2)
Franco $h = 4.53\text{ m}$ (linea bassa)



Mappa equipotenziale



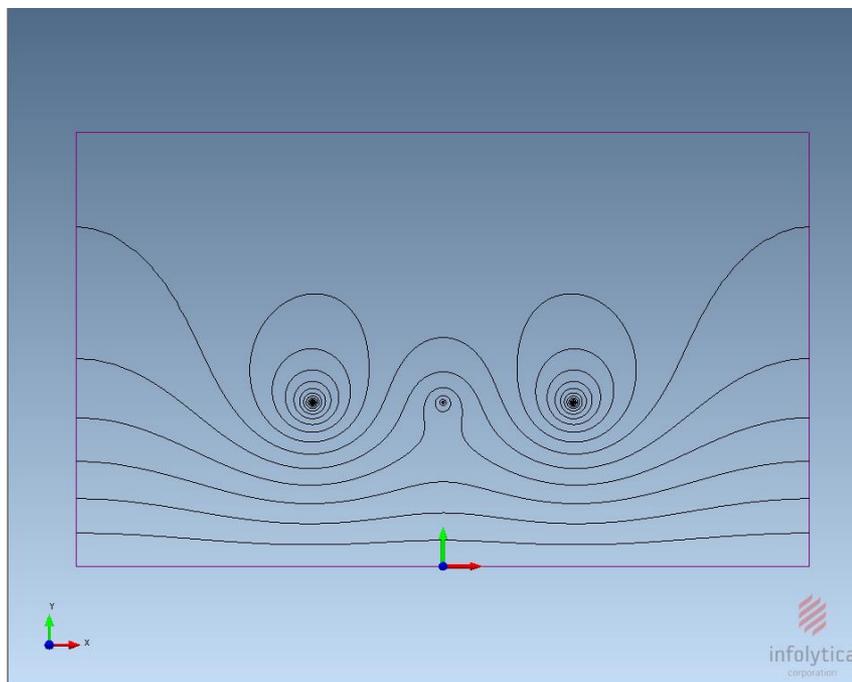


Modello linea reale

- Caso 6

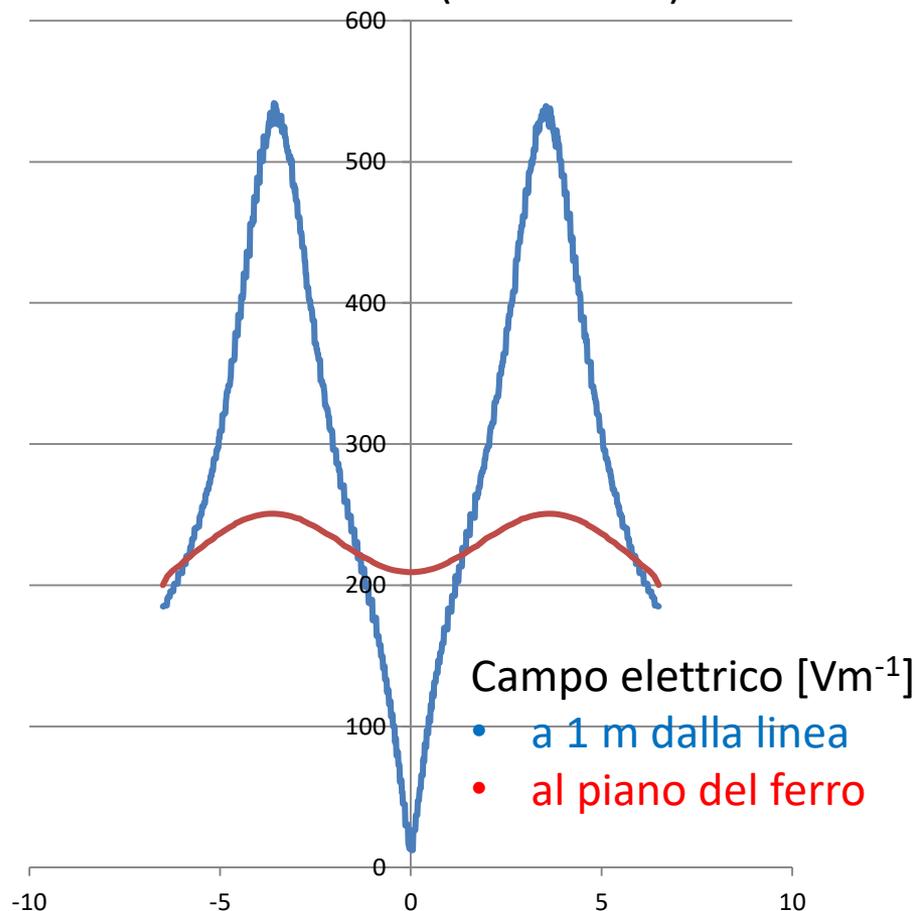
ON
○

OFF ← $l = 2.12 + 1.435 \text{ m}$ → ON
○



Mapa equipotenziale

Diametro conduttore 28 mm (610 mm^2)
Franco $h = 4.53 \text{ m}$ (linea bassa)



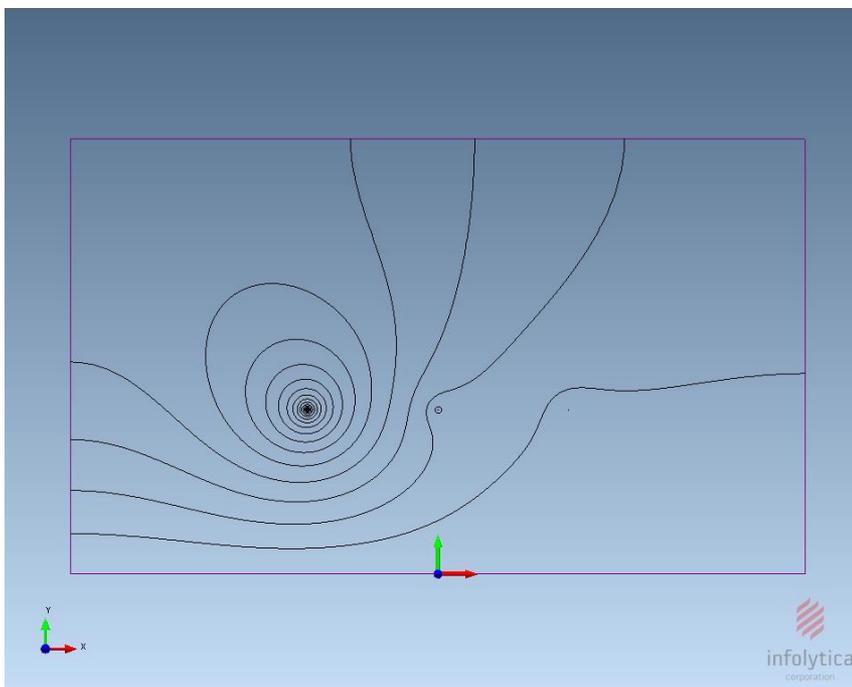


Modello linea reale

- Caso 8

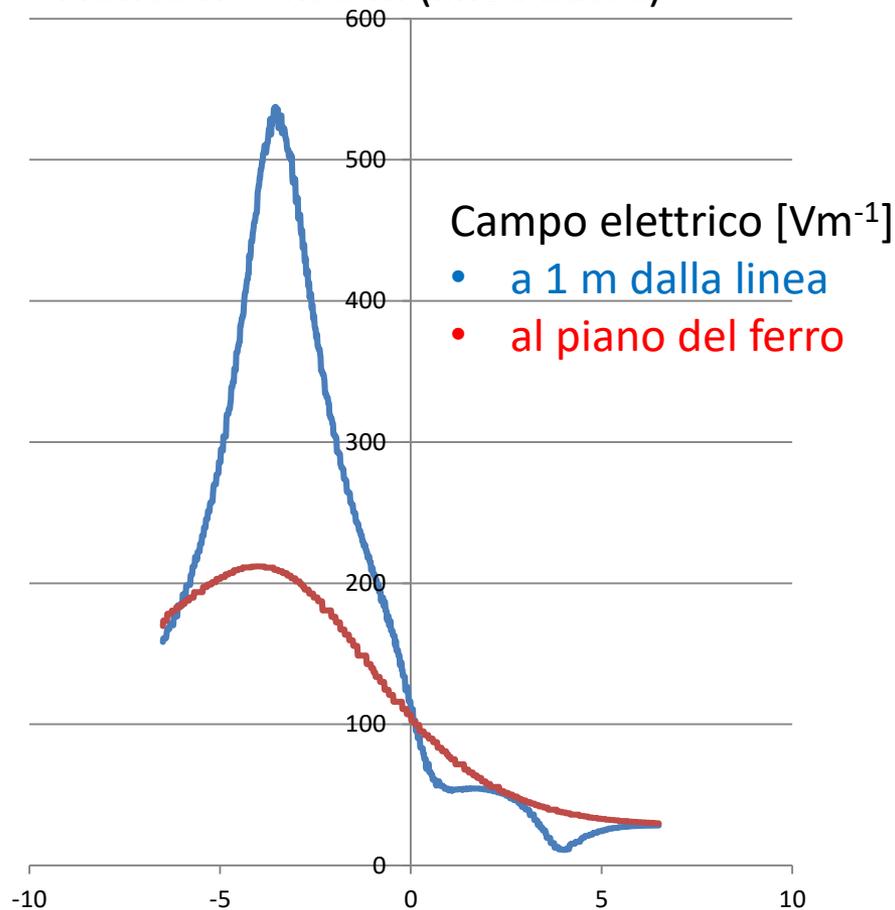
ON
○

OFF ← $l = 2.12 + 1.435\text{m}$ → OFF
○



Mappa equipotenziale

Diametro conduttore 28 mm (610 mm^2)
Franco $h = 4.53\text{ m}$ (linea bassa)



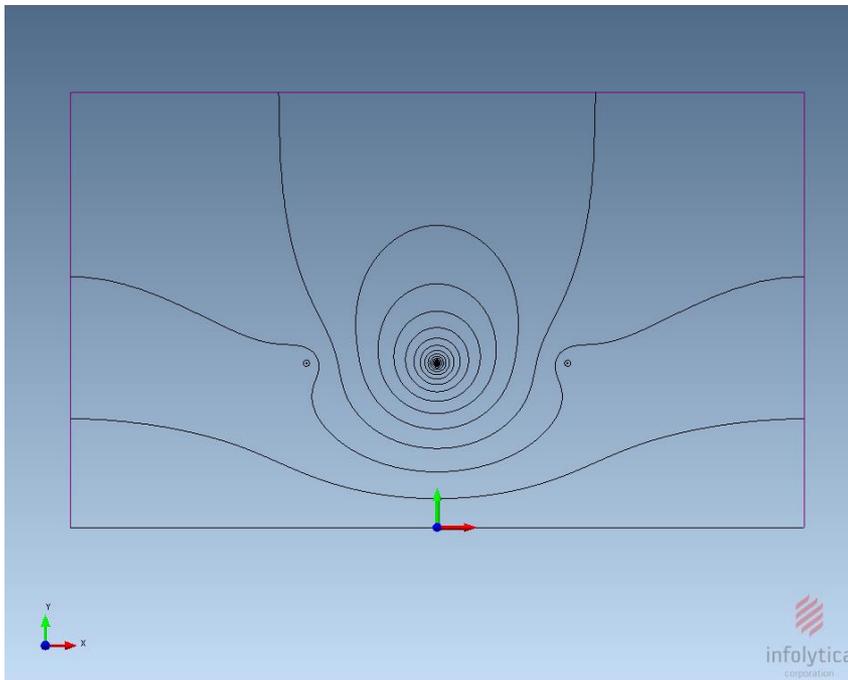


Modello linea reale

- Caso 11

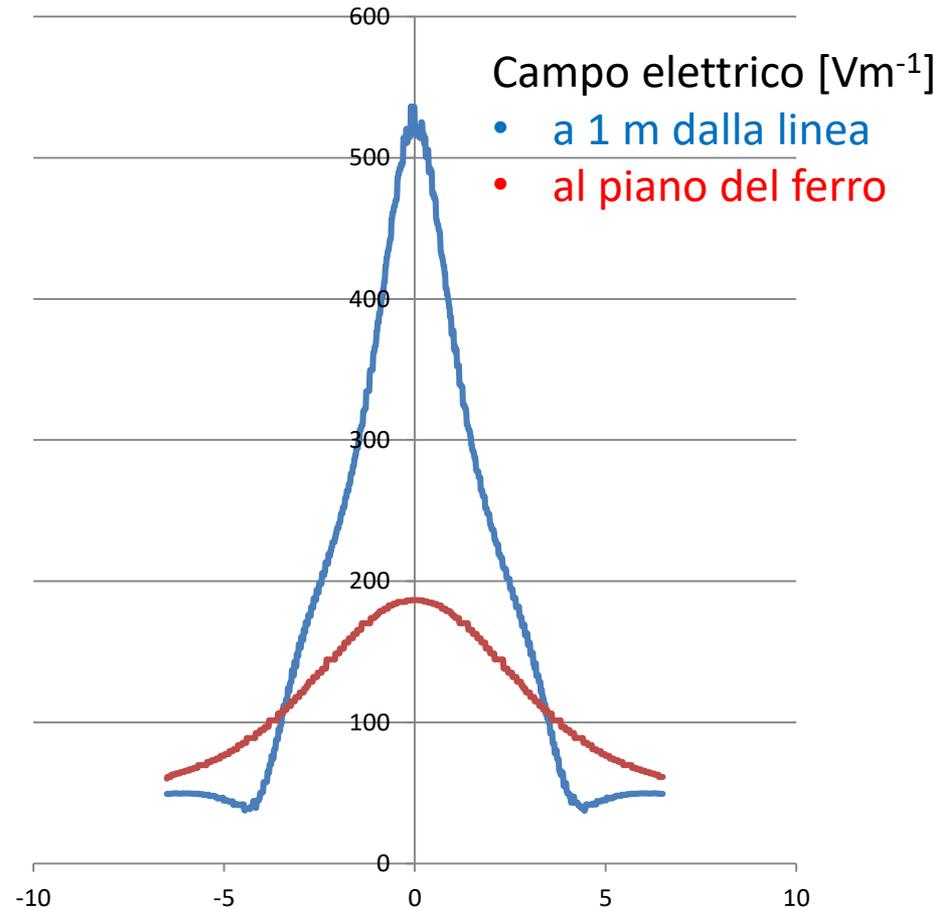
OFF

ON $l = 2.12 + 1.435 \text{ m}$ OFF



Mappa equipotenziale

Diametro conduttore 28 mm (610 mm^2)
Franco $h = 4.53 \text{ m}$ (linea bassa)





Riferimenti

Ambiente di simulazione

Codice agli elementi finiti **ElecNet**

Mentor - Infolytica

Montreal, Québec, Canada

www.mentor.com/products/mechanical/magnet/elecnet/

Aspetti metodologici

P. Di Barba, A. Savini, S. Wiak

Field Models in Electricity and Magnetism

Springer, 2008



Principi di rivelazione e sensori commerciali



Sensori di campo I

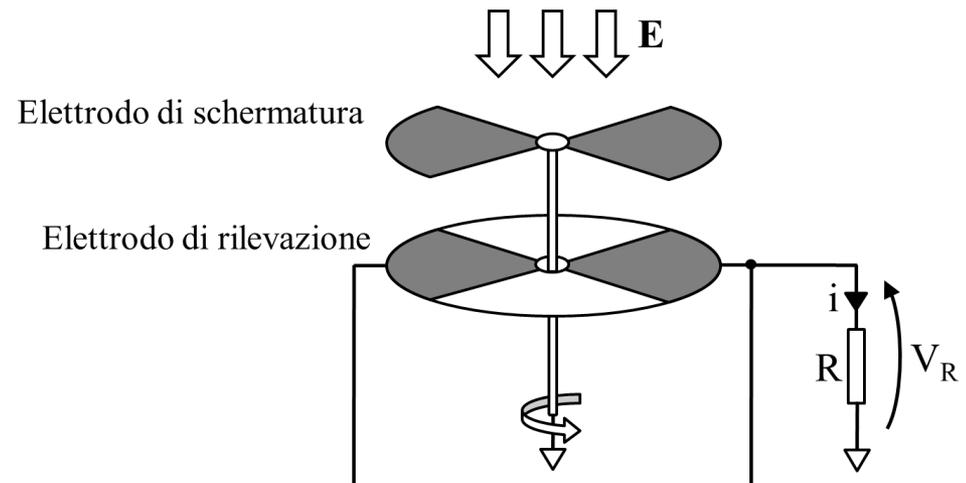
Mulinello Elettrostatico (Field Mill):

È composto da due elettrodi di cui uno fisso e uno mobile (messo in rotazione tramite un piccolo motore) i quali creano una capacità variabile nel tempo.

Quando il mulinello viene sottoposto ad un campo elettrico, nel condensatore viene indotta una corrente variabile.

Caratteristiche:

- Sensibilità al campo: bassa
- Immunità ai disturbi: bassa
- Portabilità: alta
- Costo: basso



$$i(t) = \frac{dq(t)}{dt} = \epsilon_0 E \frac{dA(t)}{dt}$$

$A(t)$ = superficie elettrodo di rilevazione



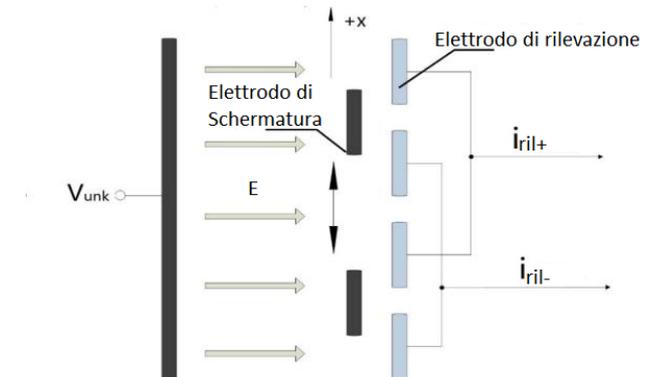
Sensori di campo II

Sensore basato su MEMS:

funzionamento simile al "field mill", utilizza un condensatore variabile nel tempo (moto alternativo). Realizzato in tecnologia MEMS

Caratteristiche:

- Sensibilità al campo: media
- Immunità ai disturbi: alta
- Portabilità: media
- Costo: medio



$$i_{ril\pm} = NE\varepsilon_0 l_{ril} \omega_{ris} \cos(\omega_{ris} t)$$

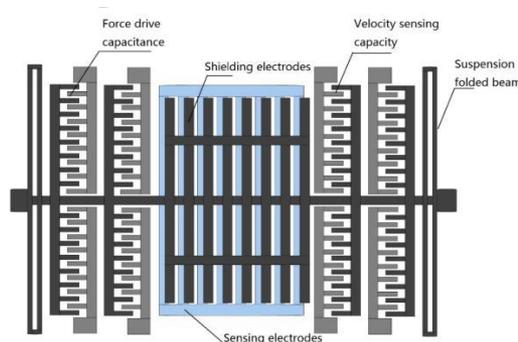
N : numero di elettrodi di rilevazione

l_{ril} : lunghezza dell'elettrodo di rilevazione

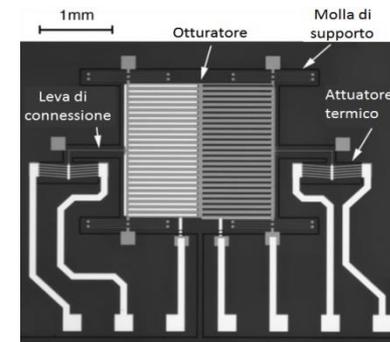
ω_{ris} : frequenza angolare di risonanza della struttura MEMS

Due tipi di pilotaggio:

- Struttura con pettine di pilotaggio elettrostatico:



- Struttura con pilotaggio termico:



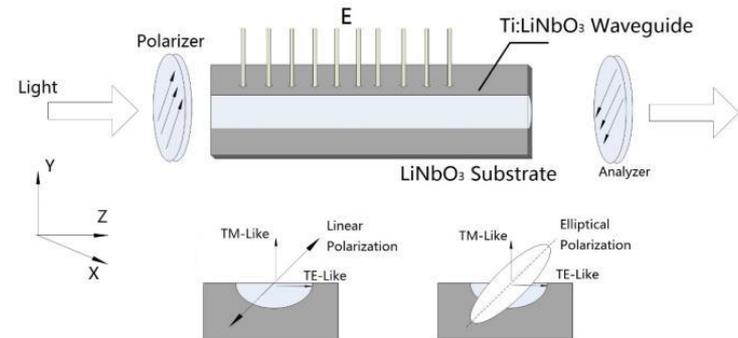


Sensori di campo III

Sensore Elettro-ottico:

Un fascio di luce attraversa un cristallo (ad esempio niobato di litio, LiNbO_3). L'indice di rifrazione del cristallo varia quando viene sottoposto ad un campo elettrico. Analizzando quindi la rotazione del piano di polarizzazione di un fascio di luce è possibile risalire al valore del campo elettrico.

OSS: Questo tipo di sensore necessita di un campo elettrico variabile nel tempo ($E_y(t)$) ma può essere utilizzato anche con un campo elettrico stazionario mettendo in rotazione il sensore stesso.



Caratteristiche:

- Sensibilità al campo: alta
- Immunità ai disturbi: alta
- Portabilità: media
- Costo: alto

$$V_{ril}(t) \cong K_0 \left[1 + kn_0^3 r_{22} L (\vec{\nabla} E_y \cdot \vec{v}) \right]$$

L : lunghezza della guida

k : numero d'onda del vuoto ($0.14 \div 0.2 \mu\text{m}^{-1}$)

r_{22} : coefficiente di Pockels ($6.8 \frac{\text{pm}}{\text{V}}$ per il materiale LiNbO_3)

n_0 : indice di rifrazione ordinario del LiNbO_3

K_0 : coefficiente proporzionale alla potenza media della luce ricevuta

\vec{v} : velocità relativa del sensore rispetto al campo elettrico



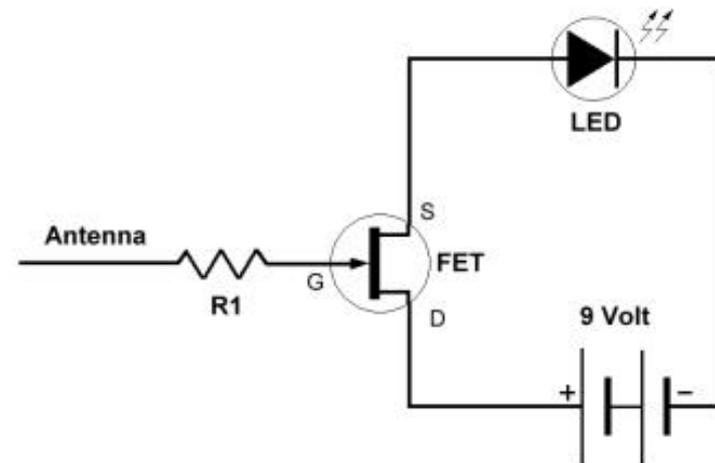
Sensori di campo IV

Elettroscopio elettronico:

Uno spezzone di filo, che funge da 'antenna' per il sensore, viene collegato al *gate* di un transistor ad effetto di campo. Quando viene sottoposto ad un campo elettrico, si ha una redistribuzione di cariche nell'antenna che a sua volta porta in conduzione il transistor. Si accende così il LED che fornisce una indicazione visiva.

Caratteristiche:

- Sensibilità al campo : variabile
- Immunità ai disturbi: bassa
- Portabilità: alta
- Costo: basso





Sensori commerciali I

Mulinello elettrostatico (Field Mill)

Azienda (sede)	Modello	Prezzo
Mission Instrument (Arizona, Stati Uniti d'America)	Zebra (h 13 cm x D 7.5 cm) 0.25 kg	3.764,00 €
Mission Instrument (Arizona, Stati Uniti d'America)	EFS 1000 (h 19 cm x D 15.3 cm) 2.3 kg (maggiore precisione rispetto allo Zebra)	10.033,52 €
Boltek (Canada)	EFM-100 (h 17 cm x D 13 cm) 1 kg	2.014,77 €
BIT LINE Meteo Service * (Collecchio (PR), Italia)	EFM-100 (h 17 cm x D 13 cm) 1 kg	2.650,00 € + IVA
Chilworth (Regno Unito)	JCI 140 Field Mill Static Monitor (3.4 cm x 6.6 cm x 15 cm) 0.32 kg	1.355,00 €

- Il prezzo si riferisce al kit comprensivo di cablaggi, alimentatore, interfaccia e software.
- I sensori basati su MEMS oppure elettro-ottici non sono facilmente reperibili in versioni commerciali.

* Distributore italiano: Boltek Srl



Sensori commerciali II

Mulinello elettrostatico (Field Mill)

Mission Instrument

Zebra

(h 13 cm x D 7.5 cm)

0.25 kg



Mission Instrument

EFS 1000

(h 19 cm x D 15.3 cm)

2.3 kg



Boltek

EFM-100

(h 17 cm x D 13 cm)

1 kg



Chilworth

JCI 140 Field Mill

Static Monitor

(3.4 cm x 6.6 cm x 15 cm)

0.32 kg





Analisi comparativa

Le principali caratteristiche dei sensori di campo senza contatto sono riassunte nella seguente tabella:

	Sensibilità al campo elettrico	Costo	Immunità ai disturbi	Portabilità e robustezza	Reperibilità
Mulinello elettrostatico (field mill)	Bassa	Basso	Bassa	Alta	Alta
Sensore basato su MEMS	Media	Medio	Alta	Alta	Bassa
Sensore elettro-ottico	Alta	Alto	Alta	Media	Bassa
Elettroscopio elettronico	Variabile	Basso	Bassa	Alta	Alta

: condizione favorevole

: condizione sfavorevole

L'elettroscopio elettronico (quarto rigo in tabella) risulterebbe il candidato migliore



Riferimenti

Rivelatore a distanza del campo elettrico di una linea di trazione a 3 kVcc Studio preliminare

Detecting the electric field of a 3kV DC traction line at a distance: a preliminary study

P. Di Barba, M.E. Mognaschi, L. Canevari

Dipartimento di Ingegneria Industriale e dell'Informazione, Università di Pavia

G. Francone, C. Ianniello, M. Maliore, S. Muccifuori, F. Petitto

Rete Ferroviaria Italiana SpA

Ingegneria Ferroviaria, in stampa

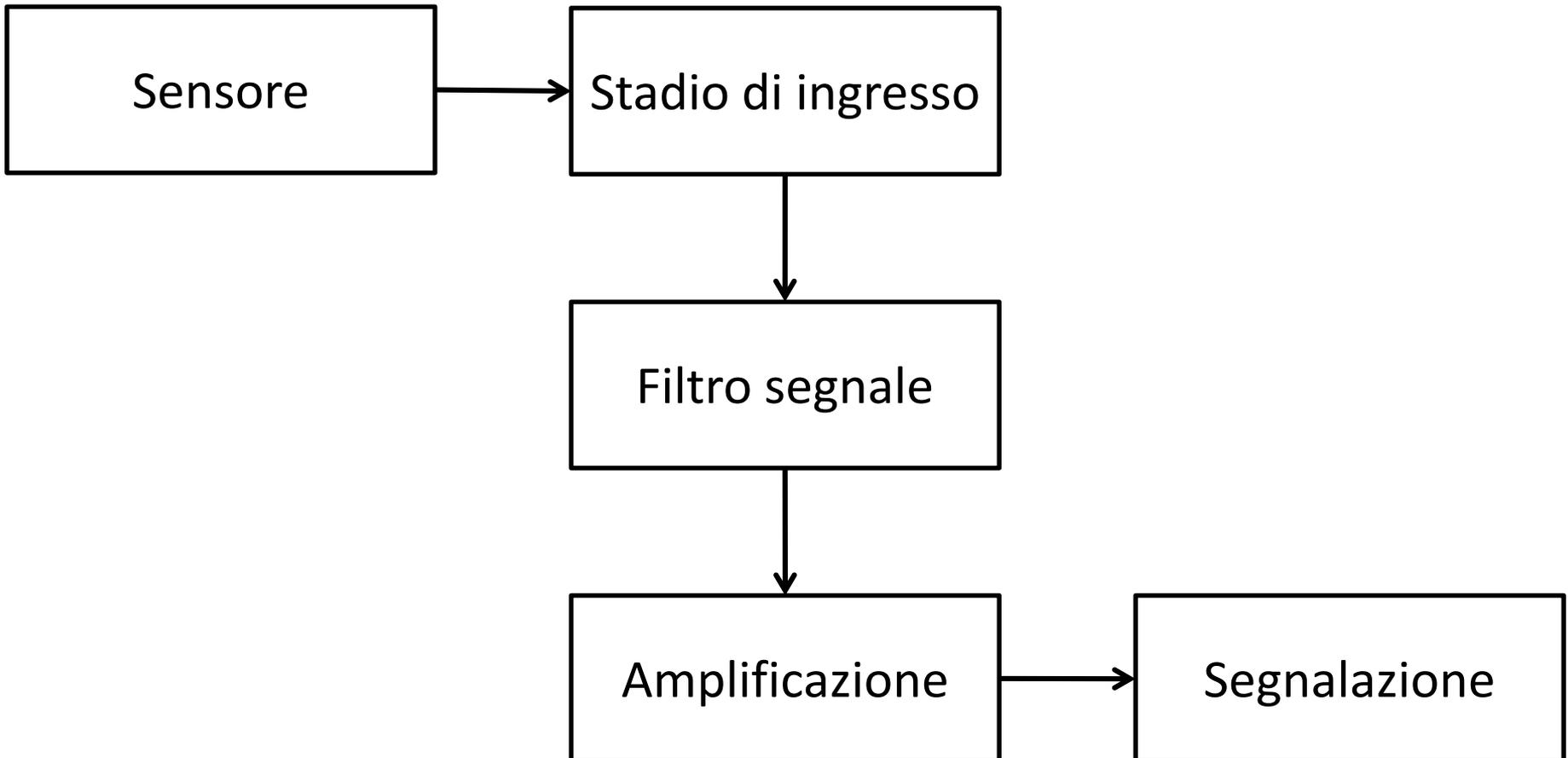
Dott. Ing. S. Muccifuori, "Rilevatore di Presenza/Assenza di Tensione per le Linee Ferroviarie Tradizionali," *Ingegneria Ferroviaria*, Anno LXV, N. 3, Marzo 2010, pp. 241-260 (2010)



Prototipo di elettroscopio elettronico



Elettroscopio elettronico





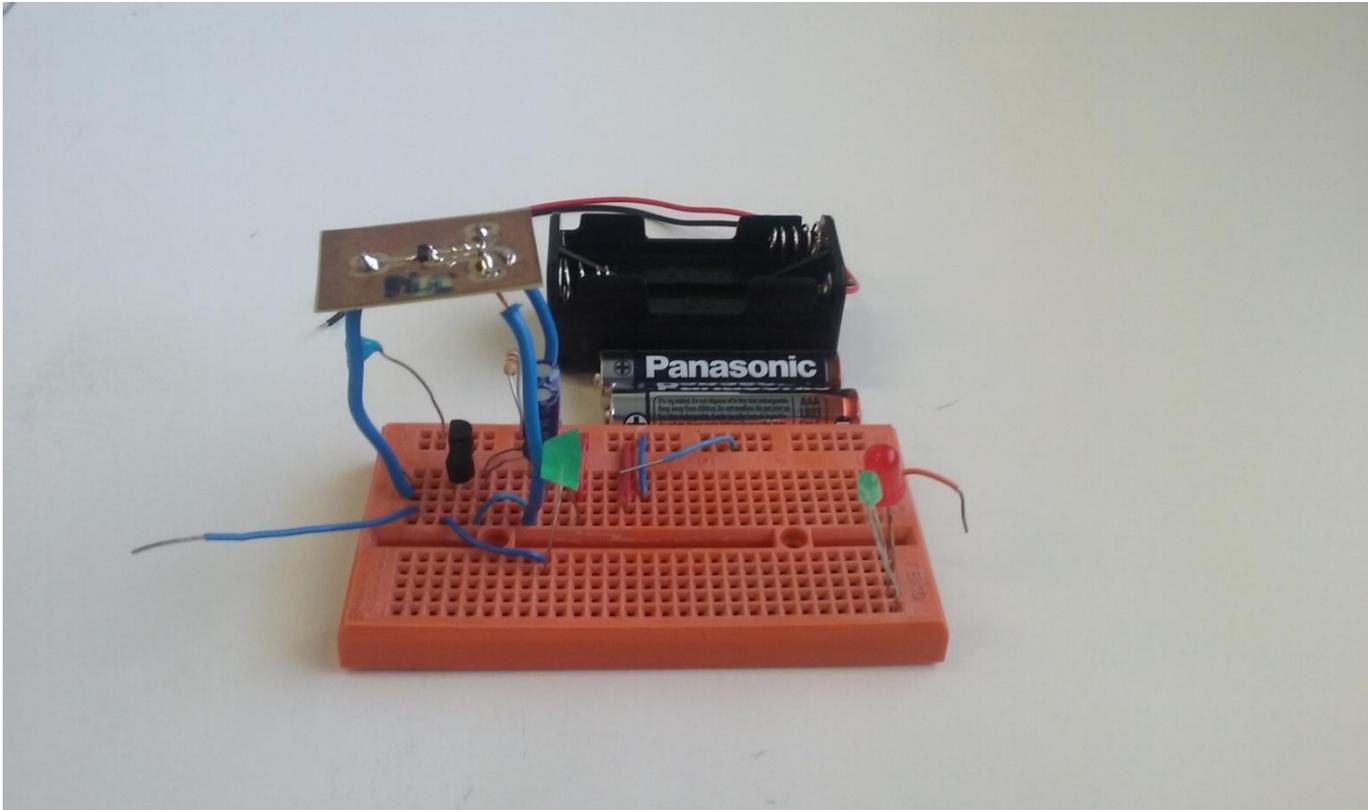
Requisiti minimi

Il sensore di campo dovrà **operare in modo selettivo per la linea o ente oggetto di lavorazione**, indipendentemente dalla presenza nelle immediate vicinanze di una seconda linea di contatto o ente alimentato.

L'utilizzo del sensore deve essere possibile, oltre che per le configurazioni impiantistiche più semplici, come ad esempio una catenaria di piena linea, anche per **tutte le configurazioni d'impianto**, normalmente presenti in ambiente ferroviario.



Elettroscopio elettronico: prototipo UniPV



CIFI, Firenze Campo di Marte, 3 dicembre 2018



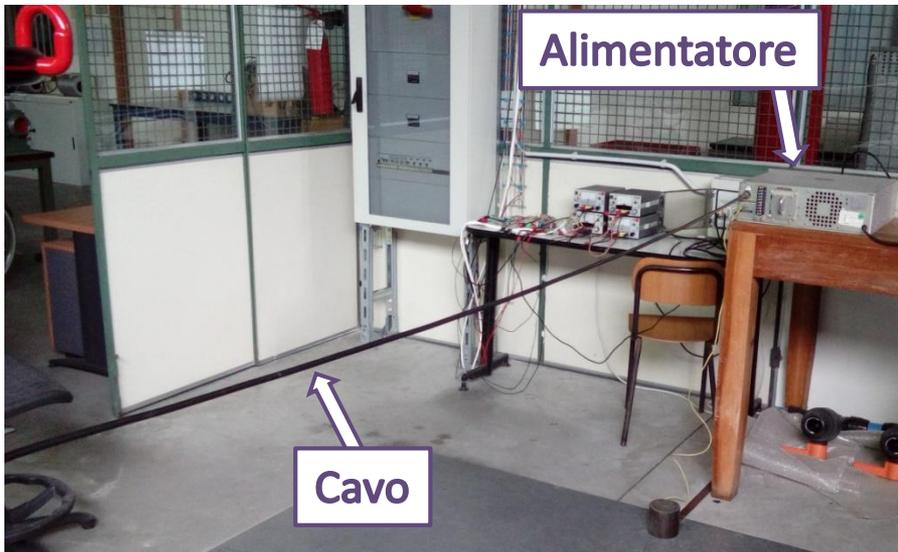
Laboratorio UniPV



Alimentatore utilizzato:
SPELLMAN High Voltage DC
Supply

0 ÷ 5 kVcc

controllato in corrente (0 – 10 mA)



Riproduzione della linea in
laboratorio:

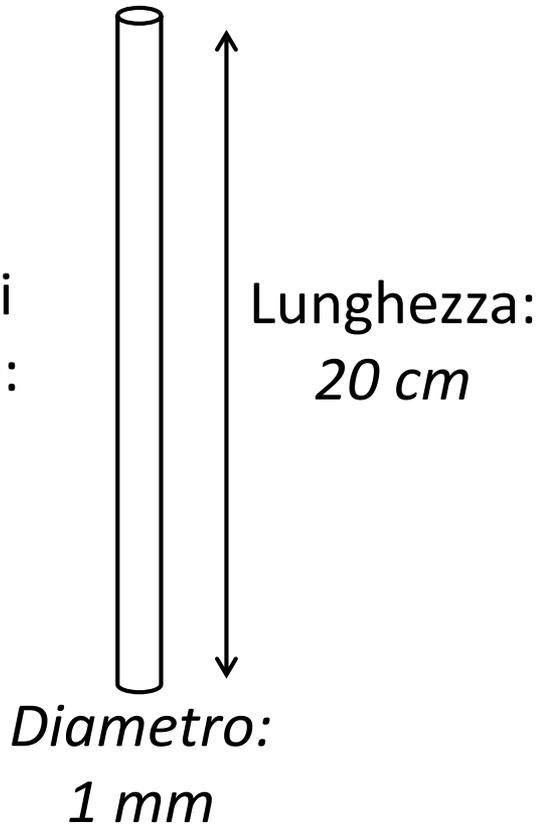
Cavo isolato alla quota di
1 metro dal suolo



Simulazioni antenna

Antenna utilizzata per il prototipo costruito in laboratorio:

Spezzone di
filo di rame:



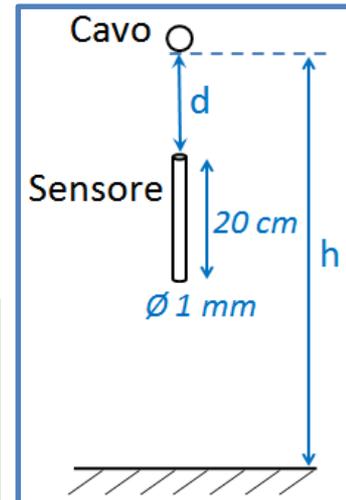
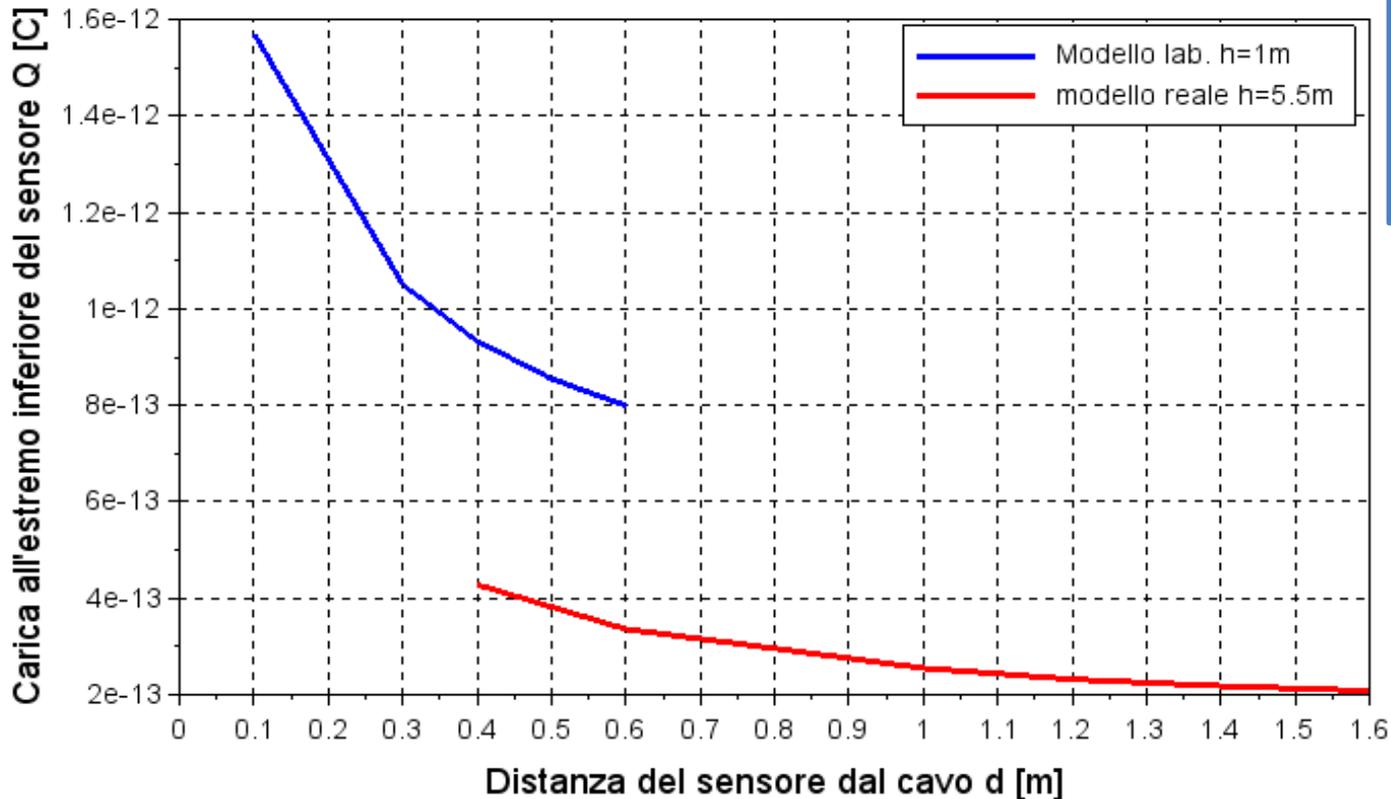
Nota: è stata aggiunta
una sferetta di alluminio
che consente di captare
meglio il campo elettrico





Simulazioni antenna

Confronto tra linea reale ($h = 5.5 \text{ m}$) e modello laboratorio ($h = 1 \text{ m}$):



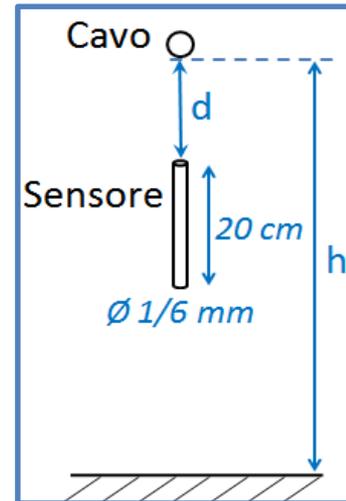
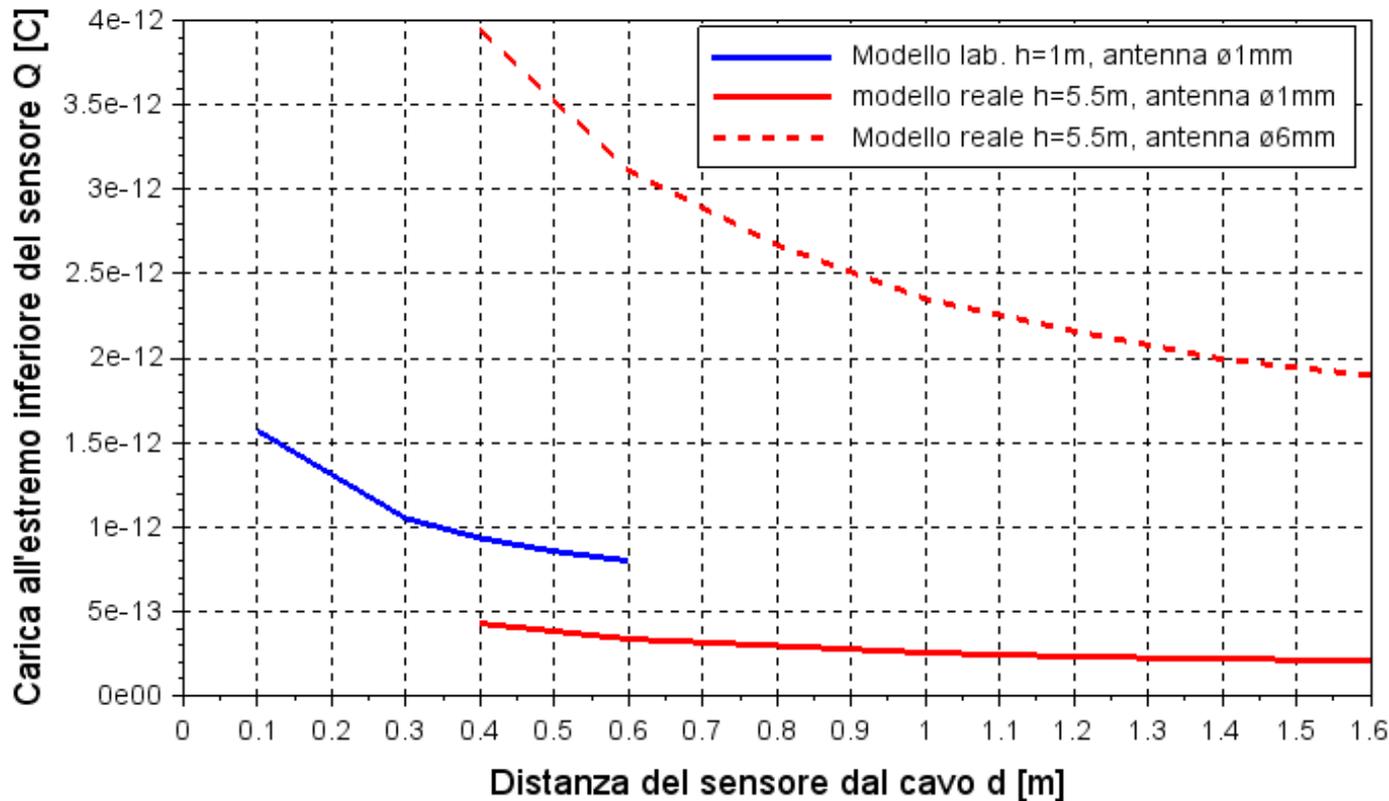
Nota:
Dati ricavati
tramite
simulazioni 3D
con metodo ad
elementi finiti

Per captare la stessa quantità di carica in entrambi i casi,
è necessario variare le dimensioni dell'antenna



Simulazioni antenna

Utilizzando un sensore di diametro pari a 6 mm:



Nota:
Dati ricavati
tramite
simulazioni 3D
con metodo ad
elementi finiti



Prototipi realizzati

- Prototipo con **stadio d'ingresso JFET ed amplificazione Darlington**: sensibilità non adeguata alle necessità della rivelazione, alimentazione singola non sufficiente per trattare eventuali disturbi.
- Prototipo con **stadio d'ingresso ed amplificazione con operazionali**: sensibilità facilmente regolabile con la capacità in ingresso, alimentazione duale, necessità di schermatura per riferimento di potenziale (**gabbia di Faraday**).
- Prototipo **miniaturizzato**: adatto anche al montaggio su **casco** o **fioretto**, sono state eseguite prove di tipo in differenti configurazioni di impianto.



Prove di tipo

- Linee affiancate
- Linea con attraversamento 3 kVcc
- Linea con attraversamento 132 kVca
- Linea con 132 kVca a lato
- Linea 3 kVcc con 11 kVca su stesso palo di sostegno



Prove di tipo

- **Sovrappasso metallico** (distanza dalla fune < 3m)
- **Pensilina metallica** (collegamento a terra tramite diodo)
- **Prova sotto portale IS** (segnale partenza Fabro-Ficulle)
- **Ambienti confinati** (galleria Castiglione)
- Viadotti e ponti in ferro
- Linee sezionate meccanicamente e fisicamente



Prove di Tipo





Conclusione

- _ È possibile utilizzare vari metodi di rilevazione
- _ Possibile metodo di rivelazione per uso individuale:
 - Elettrodo isolato → Elettroscopio elettronico
 - Vantaggi dell'elettroscopio elettronico:
 - Semplice costruzione
 - Componenti facilmente reperibili a prezzi contenuti
 - Non necessita di un contatto diretto con il cavo
 - Dimensioni contenute
 - Buona trasportabilità e resistenza