ENEA Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Distrib.	Pag.	di
	NNFISS – LP2 - 031	L	1	117

Titolo

Progettazione di una sonda capacitiva per misurazione del grado di vuoto medio di sezione di miscele bifase acqua-vapore

Ente emittente: SIET

PAGINA DI GUARDIA

Descrittori

Tipologia del documento: Rapporto tecnico/Technical Report

Collocazione contrattuale: Accordo di programma ENEA-MSE: tema di ricerca "Nuovo nucleare da fissione"

Argomenti trattati: Reattori ad acqua leggera/Light Water Reactors

Sommario

Questo rapporto è stato emesso nell'ambito del secondo PAR dell'accordo di programma ENEA-MSE e costituisce uno dei deliverable dell'obiettivo C "Prova Integrale IRIS – Selezione della strumentazione speciale" della linea progettuale LP2 "Reattori Evolutivi INTD - International Near Term Deployment" del tema di ricerca "Nuovo Nucleare da Fissione".

Il documento riporta i risultati della progettazione concettuale ed esecutiva di un prototipo di sonda di tipo capacitivo, il cui funzionamento si basa sulla variazione della costante dielettrica del fluido in funzione della presenza di vapore o acqua liquida nel condotto.

Note

Copia n. **In carico a:**

REV.	DESCRIZIONE	DATA		CONVALIDA	VISTO	APPROVAZIONE
2			NOME			
			FIRMA			
1			NOME			
			FIRMA			
0	EMISSIONE	28/09/2012	NOME	F. Bianchi		S. Monti
			FIRMA			

Società Informazioni Esperienze Termoidrauliche
Via Nino Bixio, 27 - 29100 Piacenza (I)

EMITTENTE
issued by
Unità di Produzione
Prove Grandi Impianti

CLIENTE: ENEA Client :	**COMMESSA:** 1PN000CX90245 job:	**DISCO:** -- disk:	**PAGINA:** 1 **DI:** 34 page: of

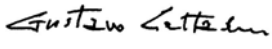
IDENTIFICATIVO: **01 651 ST 10** document:	**Classe Ris.:** Confidential:	**ALLEGATI:** 3 Enclosures:

TITOLO: **Progettazione di una sonda capacitiva per misurazione del grado di vuoto medio di sezione di miscele bifase acqua-vapore**
Title:

REDATTORI: **A. Achilli, M. Greco**
prepared by:

LISTA DI DISTRIBUZIONE
distribution list

ENEA	Renato Tinti
ENEA	Fosco Bianchi
SIET S.p.A.	Alfredo Luce
SIET S.p.A.	Stefano Monti
SIET S.p.A.	Andrea Achilli
SIET S.p.A.	Gustavo Cattadori
SIET S.p.A.	Stefano Gandolfi
SIET S.p.A.	Matteo Greco
SIET S.p.A.	Roberta Ferri
SIET S.p.A.	Cinzia Congiu
SIET S.p.A.	Gaetano Tortora

REV. Rev.	DATA date	DESCRIZIONE description	REDAZIONE prepared by	APPROVAZIONE approved by
0	24/09/2010	Emissione	A. Achilli, M. Greco 	G. Cattadori 

Informazioni strettamente riservate di proprietà SIET SpA - Da non utilizzare per scopi diversi da quelli per cui sono state fornite.
Confidential information property of SIET SpA - Not to be used for any purpose other than those for which it is supplied.

SOMMARIO

SOMMARIO 2

LISTA DELLE FIGURE 3

LISTA DELLE TABELLE 4

LISTA DEGLI ALLEGATI 4

1. OBIETTIVO 5

2. INTRODUZIONE 6

3. DEFINIZIONE DEL PROGETTO CONCETTUALE DEL DISPOSITIVO 7

3.1. Valutazioni dei tipi di moto 7
3.2. Teoria del condensatore semplice 8
3.3. Zone di sensibilità degli elettrodi 11
3.4. Disposizione degli elettrodi 14
3.5. Strumento virtuale 15
3.5.1. Generazione dei segnali 15
3.5.2. Interpretazione dei segnali 17
3.5.3. Struttura della formula polinomiale 19
3.5.4. Considerazioni sui risultati delle elaborazioni 22
3.5.5. Prove preliminari 23

4. PROGETTAZIONE DI UN DISPOSITIVO OPERANTE A FREDDO IN SITUAZIONI STAZIONARIE 24

4.1. Scopo dello strumento 24
4.2. Struttura della cella 24
4.3. Misure elettriche 25
4.4. Schemi circuitali 26
4.5. Strumenti di generazione e misura 30
4.6. Schemi alternativi 31

5. PROGETTO PRELIMINARE DI UN DISPOSITIVO AD ALTA PRESSIONE/TEMPERATURA 32

6. CONCLUSIONI 33

7. BIBLIOGRAFIA 34

LISTA DELLE FIGURE

Figura 1: Zone di sensibilità per due armature affacciate 11

Figura 2: Zone di sensibilità per due armature ad angolo 12

Figura 3: Zone di sensibilità per due armature affiancate 13

Figura 4: Distorsioni di sensibilità introdotte da zone ad elevata costante dielettrica 14

Figura 5: Matrice che definisce il grado di vuoto lungo la sezione e la posizione degli elettrodi 15

Figura 6: Procedura di calcolo della ammettenza di una singola cella 16

Figura 7: Segnale in funzione del rapporto Spessore film/raggio del tubo 18

Figura 8: Segnale in funzione dell'inverso del rapporto Spessore film/raggio del tubo 19

Figura 9: Segnale in funzione della frazione di liquido del nucleo interno 19

Figura 10: Schema dell'apparato utilizzato per le prove preliminari 23

Figura 11: Ponte di Wheatstone capacitivo 26

Figura 12: Schema circuitale alternativo per il ponte di Wheatstone capacitivo 27

Figura 13: Schema circuitale del dispositivo 27

Figura 14: Armatura del condensatore a capacità variabile (con relè di taratura) 28

Figura 15: Schema del dispositivo con due elettrodi a ridotta distanza attivati 29

Figura 16: Schema del dispositivo con trasformatori per disaccoppiare i potenziali di modo comune 30

Figura 17: Schema circuitale alternativo 31

LISTA DELLE TABELLE

Tabella 1: caratteristiche dielettriche dei principali materiali isolanti 8

Tabella 2: Costante dielettrica relativa dell'acqua al variare della temperatura per P tra 1 e 15 bar 9

Tabella 3: Valori di segnale dei casi usati per la regressione polinomiale e coefficienti del polinomio 21

LISTA DEGLI ALLEGATI

Allegato 1: Calcoli eseguiti con il software che riproduce lo strumento virtuale

Allegato 2: Disegno esecutivo dello strumento operante a freddo (077-00-00.dwg)

Allegato 3: Schema concettuale della cella per strumento operante a caldo e in pressione (077-01-00.dwg)

1. OBIETTIVO

Questo documento contiene il progetto di un misuratore di grado di vuoto basato sulla rilevazione della costante dielettrica del fluido costituito da miscela bifase (acqua liquida e vapore) in transito nelle linee di rottura e nelle linee dell'ADS dell'impianto SPES3. Il dispositivo ha anche l'obiettivo di discriminare i differenti regimi di moto sperimentati durante i transitori incidentali.

Il documento è diviso in tre parti:

- Nella prima parte, capitolo 3, si descrive il principio di funzionamento e la struttura degli strumenti capacitivi; si trattano gli aspetti teorici che stanno alla base dei successivi approfondimenti progettuali e si citano i risultati di alcuni esperimenti estremamente preliminari.
- Nella seconda parte, capitolo 4, è presentato il progetto esecutivo di un prototipo di misuratore di grado di vuoto capacitivo dotato di una conformazione ad elettrodi multipli dimensionato per operare a freddo e a pressioni limitate.
- Nella terza parte, capitolo 5, è presentato un progetto preliminare di una variante dello strumento modificata strutturalmente per poter resistere alle condizioni di temperatura e pressione tipiche di SPES3.

2. INTRODUZIONE

L'impianto SPES3 (Simulatore Pressurizzato per Esperienze di Sicurezza) è un simulatore integrato di reattori di piccola taglia modulari (SMR), capace di verificare la risposta del reattore a fronte di transitori incidentali e fornire dati sperimentali per la validazione di codici di calcolo per le analisi di sicurezza.

Una caratteristica dei reattori integrati è il coinvolgimento nel corso dei transitori incidentali dei volumi facenti parte del contenimento, che in determinate fasi vedono il riflusso nel vessel della massa d'acqua precedentemente fuoriuscita.

Pertanto per ogni transitorio previsto dalla matrice di prova è necessaria la misura della portata massica e dell'energia uscente dalla rottura, per verificare che, anche a fronte di un incidente, l'impianto si porti in condizioni di sicurezza.

A causa della notevole differenza di pressione tra i circuiti primario e secondario, tipicamente a 155 e 58 bar circa, rispetto ai sistemi di contenimento a pressione ambiente, in caso di rottura, si verifica la presenza di flusso bifase nei condotti di collegamento tra il punto di rottura ed il componente di raccolta del fluido uscente. Pertanto, i punti di misura dei circuiti idraulici a monte ed a valle della valvola di rottura sono interessati dalla presenza di fluido bifase.
Le misure bifase sono necessarie per ricostruire la distribuzione di massa ed energia tra i diversi componenti.
Un elemento la cui conoscenza è necessaria per definire la portata di un flusso bifase è il grado di vuoto di volume, come indicato in [1].

La disponibilità commerciale di strumenti per la rilevazione del grado di vuoto è risultata praticamente nulla [2] probabilmente anche per la mancanza di richiesta da parte del settore industriale. Da qui la decisione di intraprendere lo sviluppo di un dispositivo basato sulla misura di variazione della costante dielettrica, tipologia di strumenti che è spesso stata studiata a livello accademico ma che per ragioni di mercato non ha dato luogo a strumenti commerciali.

3. DEFINIZIONE DEL PROGETTO CONCETTUALE DEL DISPOSITIVO

Lo strumento capacitivo proposto nel presente documento utilizza la variazione della costante dielettrica del fluido che scorre in una tubazione per ricavare indicazioni sul grado di vuoto, sia locale che medio, all'interno della tubazione stessa.

Come verrà illustrato successivamente, le molecole d'acqua liquida sono caratterizzate da un momento di dipolo e quindi accrescono notevolmente il valore della costante dielettrica dello spazio in cui si trovano, mentre il vapore è caratterizzato da una minor densità rispetto al liquido e l'agitazione molecolare ostacola l'allineamento dei dipoli.

Per dimostrare la fattibilità di uno strumento che utilizza la variazione della costante dielettrica dello spazio per risalire al numero di molecole di acqua contenute in tale spazio, occorre valutare a livello teorico i seguenti aspetti:

- la possibilità di ricavare segnali elettrici caratterizzati da un'evidente dipendenza nei confronti del tipo di moto e del grado di vuoto che caratterizzano il flusso;
- la possibilità di risalire attraverso elaborazioni numeriche dai segnali alla distribuzione di grado di vuoto che li ha generati.

Nei paragrafi successivi si esaminano i diversi aspetti teorici che concorrono a definire la possibilità di funzionamento, la struttura fisica del sistema proposto e si definisce uno strumento virtuale per l'esecuzione di simulazioni numeriche.

3.1. Valutazioni dei tipi di moto

Lo strumento capacitivo si configurerà come una cella di misura costituita da un tubo in materiale dielettrico con la stessa sezione interna del tubo che convoglia il fluido oggetto di misurazioni. Elettrodi di diversa forma e dimensione potranno essere fissati all'interno e all'esterno del tubo in materiale dielettrico per misurare la costante dielettrica di diverse zone dello spazio.
La disposizione ottimale degli elettrodi è influenzata dalle caratteristiche dei moti che si realizzano all'interno della tubazione, posta prevalentemente in posizione orizzontale.

Le simulazioni dell'impianto realizzate con il codice RELAP5 [3] evidenziano configurazioni di moto diverse, di cui le prevalenti sono:

a) moto disperso di gocce in matrice di vapore
b) moto anulare con liquido alle pareti
c) moto stratificato con liquido in basso e gocce di vapore nella parte superiore
d) moto stratificato con liquido in basso e passaggio di slug nella parte superiore.

Lo strumento dovrà essere in grado di ricostruire con una buona accuratezza l'andamento del grado di vuoto lungo la sezione per le diverse tipologie di moto.

Tutti i tipi di moto sono caratterizzati da:

a) condizione omogenea con bassa densità
b) moti non omogenei con stratificazioni assiali
c) moti non omogenei con stratificazioni verticali
d) strati con presenza di solo liquido all'esterno o nella zona inferiore.

Siccome la tipologia di moto è determinata dalle caratteristiche (pressione, temperatura e titolo) del fluido che si trova nel primario a monte dell'orifizio che simula la rottura e tali caratteristiche sono variabili nel tempo, nella zona di misura si verificheranno transizioni tra i tipi di moto.

Nel caso di transizioni veloci e ripetute tra i tipi a), b) e c) o la presenza di un tipo di moto naturalmente discontinuo come per d), potrebbe essere problematico eseguire misure ad una frequenza tale da ricostruire l'andamento temporale delle diverse transizioni di tipo di moto. Comunque l'uniformità lungo l'asse della tubazione è sempre molto elevata, infatti la velocità di transito media del fluido è dell'ordine di diverse decine di metri al secondo, quindi la lunghezza attiva del dispositivo di misura viene percorsa da eventuali discontinuità nel giro di pochi millisecondi.

Realisticamente si può pensare di eseguire una sequenza di misura ogni secondo a causa dei tempi di commutazione ed acquisizione, mediando inevitabilmente le discontinuità temporali.
Quindi i diversi tipi di moto possono essere considerati con profilo uniforme lungo l'asse della tubazione e lentamente variabili nel tempo.

3.2. Teoria del condensatore semplice

La capacità di un condensatore ad armature piane dove la distanza tra le due armature sia trascurabile rispetto alla loro larghezza e con il vuoto tra le due armature è definibile con la seguente formula:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon S / d \qquad (1)$$

dove:

C	Capacità	[F]
ε_0	Costante dielettrica assoluta del vuoto	[F/m]
ε	Costante dielettrica relativa del materiale	-
S	Superficie del condensatore, di un'armatura	[m^2]
d	Distanza tra le armature	[m]

La Tabella 1 sottostante riporta le più importanti caratteristiche dielettriche di alcuni materiali isolanti.

Tabella 1: caratteristiche dielettriche dei principali materiali isolanti

Costante dielettrica assoluta del vuoto $e_o = 8{,}854 \cdot 10^{-12}$ [F/m]		
Mezzo dielettrico	***Costante dielettrica relativa***	***Rigidità dielettrica [kV/mm]***
Aria secca (alla pressione di 1 [bar])	1.0006	3
Acqua pura	81.07	15
Olio minerale	2.2 ¸ 2.5	7.5 ¸ 16
Olio per trasformatori	2 ¸ 2.5	12 ¸ 17
Bachelite	5.5 ¸ 8.5	10
Carta comune	2	6
Carta paraffinata	2.5 ¸ 4	40 ¸ 50
Carta da condensatori	5 ¸ 5.5	30
Gomma	2.2 ¸ 2.5	15 ¸ 40
Mica	6 ¸ 8	50 ¸ 100
Polietilene	2.3	50
Porcellana	4 ¸ 7	12 ¸ 30
Vetro	6 ¸ 8	25 ¸ 100
Ossido di titanio	90 ¸ 170	5
Titanati di Ba-Sr	1000 ¸ 10000	5

Come si vede in tabella, la costante dielettrica dell'acqua è notevolmente superiore a quella di altre sostanze, a causa delle caratteristiche polari della molecola d'acqua.
In Tabella 2 viene indicata la costante dielettrica del vapore in funzione della temperatura. I valori riportati sono validi in un range di pressione fino a 15 bar [4].
I valori di temperatura presenti sono quelli previsti durante i transitori di rottura.

Tabella 2: Costante dielettrica relativa dell'acqua al variare della temperatura per P tra 1 e 15 bar

Temperatura [°C]	Costante dielettrica relativa dell'acqua liquida
0	88
5	86.4
10	84.11
15	82.22
20	80.36
25	78.54
30	76.75
35	75
40	73.28
45	71.59
50	69.94
60	66.74
70	63.68
80	60.78
90	57.98
100	55.33
125	49.37
150	43.96
200	34.79

La costante dielettrica del vapore è minore di quella dell'acqua liquida, in parte per la minore densità di materia ed in parte per il minore momento di dipolo manifestato dalla molecola H_20 in fase gassosa.
In [4] è possibile vedere che per le pressioni di nostro interesse, che variano da 1 a 15 bar e per le temperature, tra 40 e 200°C la costante dielettrica relativa del vapore varia tra 1 e 1.02, rispetto all'acqua che varia tra 35 e 75.
La presenza di vapore può quindi essere assimilata al vuoto.

La forte differenza tra acqua e vapore è un elemento favorevole per la sensibilità di eventuali strumenti basati sul principio capacitivo.

È richiesta una fase sperimentale dedicata a misurare la costante dielettrica di fluidi omogenei, liquido e vapore, in quanto non si sono trovate informazioni relative alle miscele.

Dal valore della capacità del condensatore è possibile ottenere la sua *reattanza* espressa in ohm e definita come la parte immaginaria *dell'impedenza* secondo la formula:

$$Z = R + jX \qquad (2)$$

dove

Z	Impedenza	[ohm]
R	Resistenza	[ohm]
X	Reattanza	[ohm]
j	unità immaginaria	-

La formula precedente vale per circuiti in cui la *resistenza* è considerata in serie alla *reattanza.*

I circuiti elettrici che collegano le armature del condensatore, in serie al condensatore stesso, presentano una *resistenza* trascurabile, che quindi non concorre a formare R in (2); la componente di *resistenza* dovuta alla conducibilità dell'acqua, essendo collegata in parallelo al condensatore, tende a favorire il passaggio di corrente. Occorre dunque sommare l'inverso *dell'impedenza* dell'acqua con l'inverso della *resistenza* dell'acqua, ma, dal momento che nel circuito fluirà acqua demineralizzata, la cui resistività è molto elevata, il contributo dovuto alla *resistenza* dell'acqua può essere considerato trascurabile. Per cui, nella formula (2), il termine dovuto alla *resistenza* scompare, lasciando esclusivamente il termine dovuto alla reattanza.

Quindi in definitiva la formula (2) tende a coincidere con:

$$Z = jX \qquad (2.1)$$

La reattanza è ricavabile dalla capacità del condensatore con la formula:

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C} \qquad (3)$$

dove

X_c	Reattanza (componente capacitiva)	[ohm]
f	Frequenza	[Hz]
C	Capacità	[farad]

3.3. Zone di sensibilità degli elettrodi

Quando per effettuare la misurazione della costante dielettrica di una zona dello spazio si dispone di una coppia di elettrodi di dimensioni finite, non si rileva unicamente le proprietà della parte interclusa tra gli elettrodi, ma sussiste una sensibilità anche alle proprietà fisiche dello spazio circostante e non immediatamente adiacente agli elettrodi. Questo aspetto fisico, non presente in misure di grado di vuoto eseguite ad esempio con radiazioni, produce effetti che devono essere tenuti in debita considerazione.

Figura 1, Figura 2 e Figura 3 illustrano qualitativamente il problema. Come è possibile osservare, le zone dove le linee di flusso del campo elettrico sono più ravvicinate sono caratterizzate da una sensibilità maggiore (zone rosse), mentre spostandosi verso zone con linee di flusso del campo più diradate la sensibilità diminuisce (zone gialle e verdi).

Un'ulteriore complicazione, rappresentata in Figura 4, è dovuta alla distorsione delle linee di flusso causata dalla presenza di zone ad elevata costante dielettrica che addensano su di sé le linee di flusso medesime. Questo comporta che le zone che sono allineate con la zona ad elevata costante dielettrica sono interessate da una maggiore sensibilità rispetto alle altre. in particolare, in Figura 4, in assenza della zona ad elevata costante dielettrica, tutte le parti dello spazio compreso tra le armature sarebbero caratterizzate dalla stessa sensibilità, cosa non più vera con la zona non omogenea.

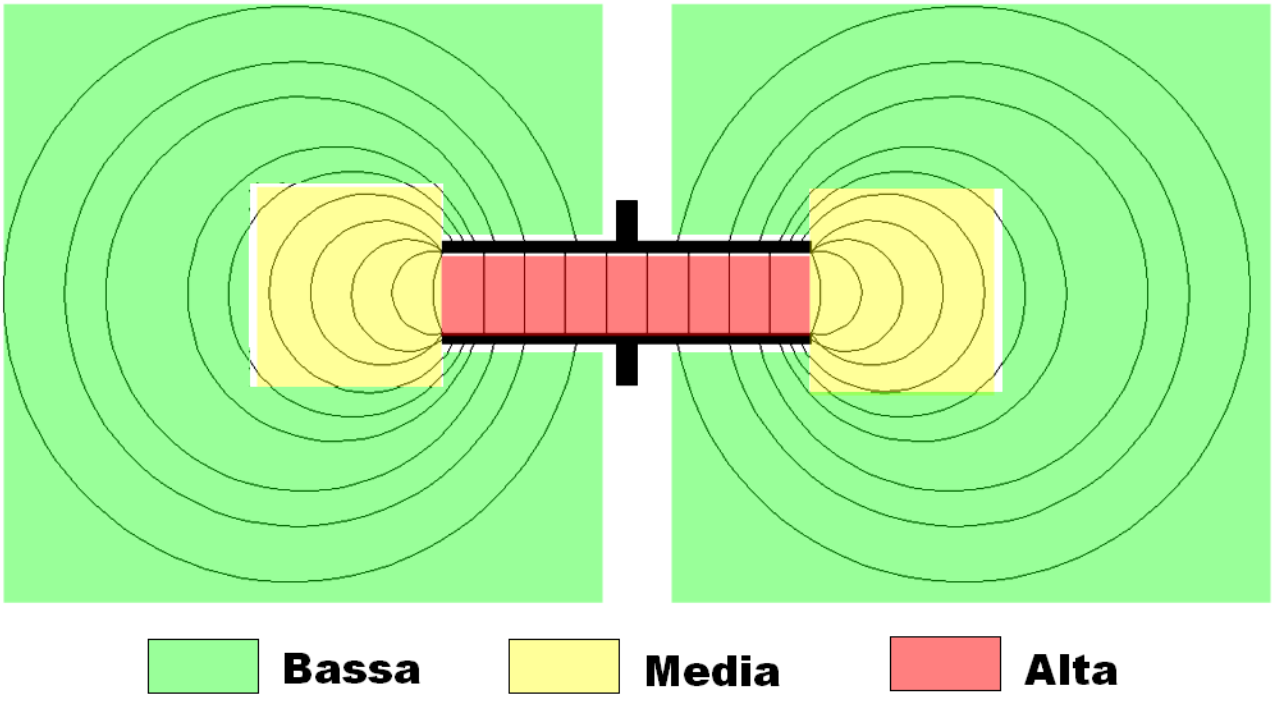


Figura 1: Zone di sensibilità per due armature affacciate

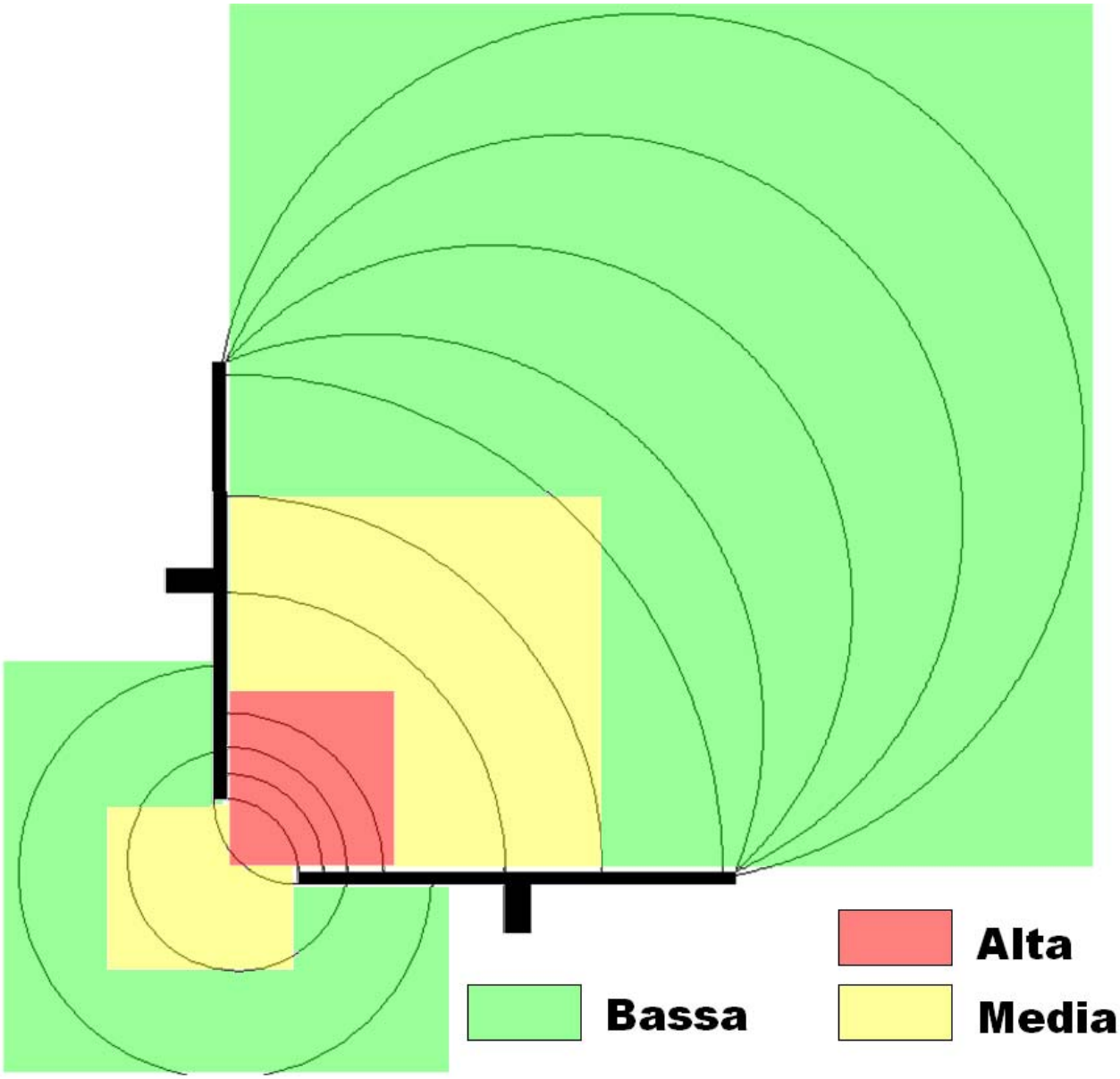


Figura 2: Zone di sensibilità per due armature ad angolo

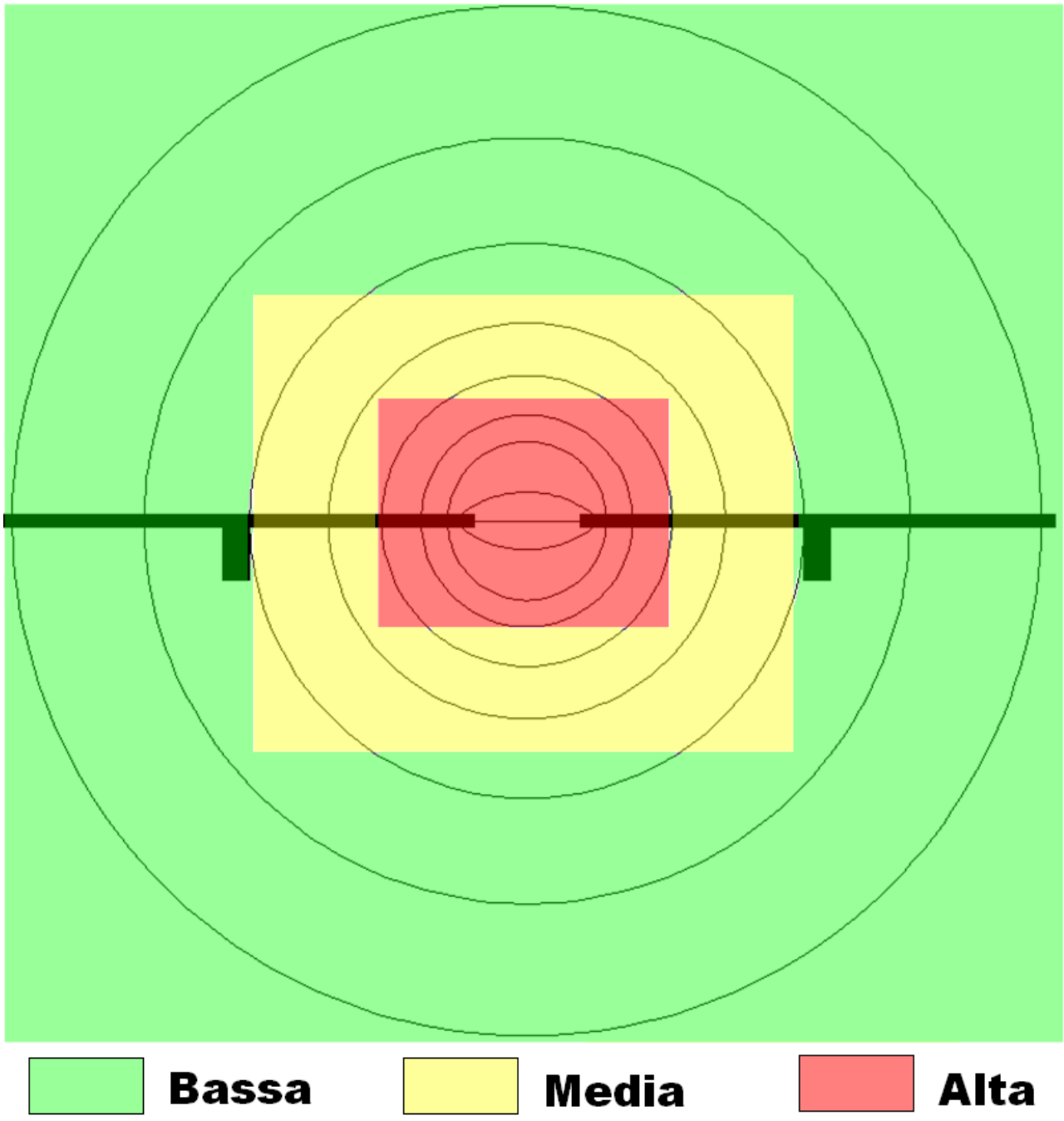


Figura 3: Zone di sensibilità per due armature affiancate

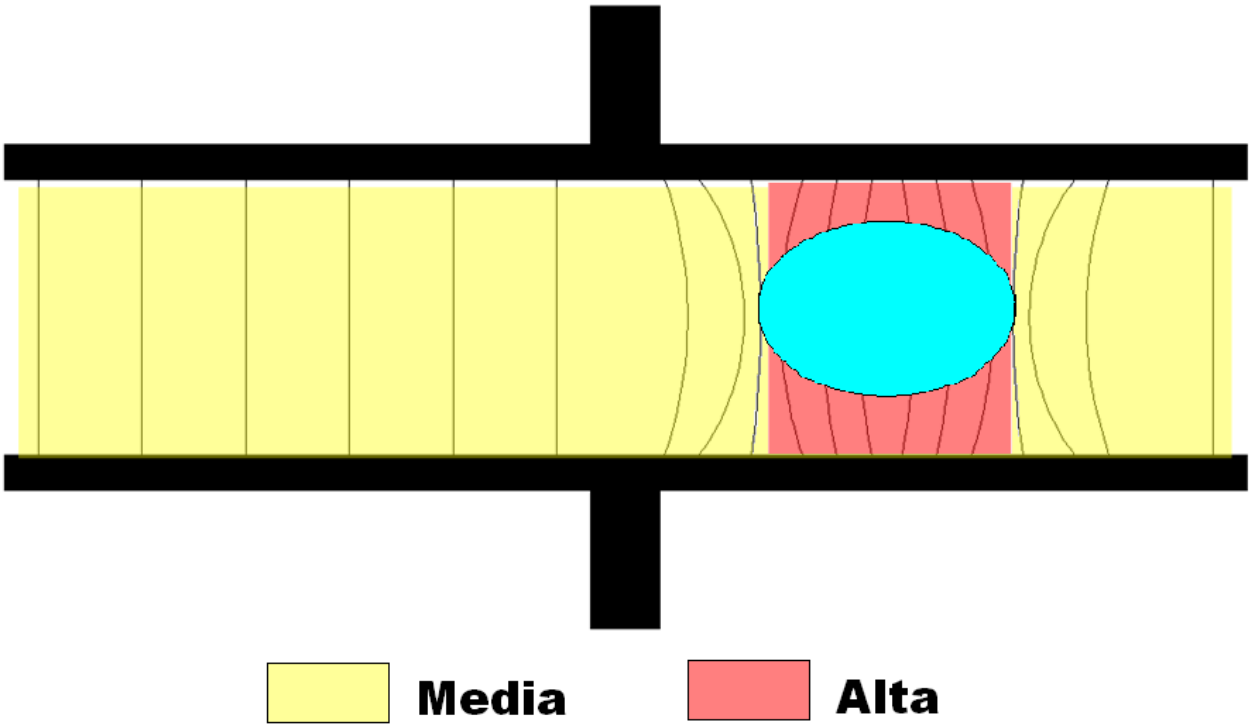


Figura 4: Distorsioni di sensibilità introdotte da zone ad elevata costante dielettrica

3.4. Disposizione degli elettrodi

Sulla base delle considerazioni fisiche dei paragrafi precedenti, si possono formulare alcune ipotesi sulla disposizione ideale e sulla forma degli elettrodi; i requisiti che gli elettrodi dovranno sicuramente soddisfare sono i seguenti:

- gli elettrodi dovranno avere una superficie abbastanza grande per amplificare il segnale da essi rilevato rispetto al disturbo dovuto ad altre parti dello strumento;
- è necessario che siamo prevalentemente esterni al tubo in materiale isolante per semplificare il sistema di posa;
- è necessario che vi siano numerosi elettrodi attorno al tubo, in modo da consentire una risoluzione significativa per quanto riguarda la ricostruzione del grado di vuoto e i regimi di flusso entro la sezione.

La distribuzione che soddisfa a tutti questi requisiti è probabilmente rappresentata da elettrodi lineari, realizzati con nastri metallici di larghezza limitata e di lunghezza significativa, disposti lungo le generatrici di un tubo in materiale isolante che costituisce il tronchetto di misura vero e proprio.

Oltre agli elettrodi esterni per alcuni tipi di moto potrebbe essere estremamente utile un elettrodo interno alla tubazione, disposto in coincidenza del diametro e realizzato con una bacchetta metallica supportata da crociere d'estremità.

3.5. Strumento virtuale

3.5.1. Generazione dei segnali

Per dimostrare la fattibilità effettiva dello strumento, la cui struttura è stata sommariamente descritta nel paragrafo precedente, è stato realizzata una routine in grado di simulare uno strumento virtuale.

Questa routine, basato su una cartella Excel, consente di schematizzare la sezione del tronchetto di misura attraverso 376 celle quadrate disposte secondo un reticolo 22x22. All'esterno, o anche all'interno, di questo volume virtuale possono essere definiti elettrodi collocati in qualunque posizione. Al tubo e agli elettrodi virtuali è assegnata una lunghezza convenzionale di un metro mentre il diametro del tubo è conseguenza della scelta della dimensione della cella elementare.

L'*input* del foglio di calcolo è raccolto nella prima parte del foglio "Dat" dove è necessario inserire:

Costante dielettrica relativa vapore	--
Costante dielettrica relativa liquido	--
Costante dielettrica assoluta	(F/m)
Frequenza di alimentazione elettrodi	Hz
Resistività elettrodi	ohm/m
Dimensioni lato cella	m
semipotenziale d'alimentazione elettrodi	V

Attraverso le formule (1), (2), (2.1) e (3) il programma calcola le seguenti grandezze:

reattanza "cella" vapore	ohm
reattanza "cella" liquido	ohm
Reattanza "cella" aria (si considera vuoto)	ohm

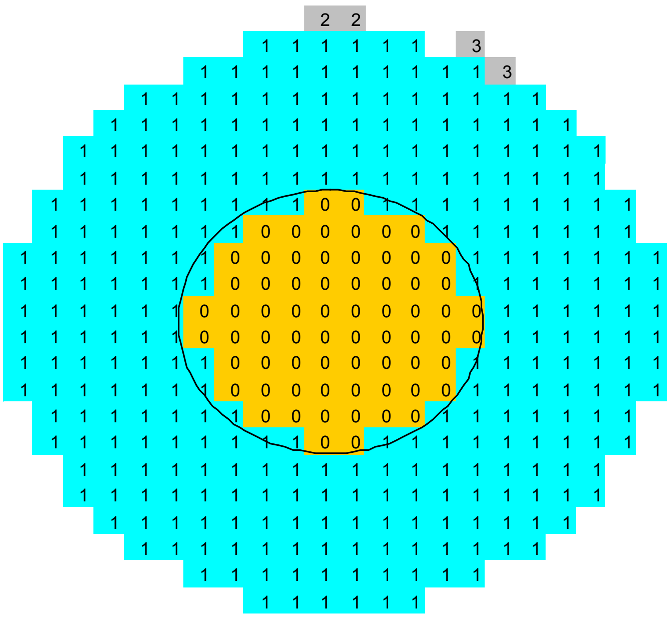


Figura 5: Matrice che definisce il grado di vuoto lungo la sezione e la posizione degli elettrodi (caso di moto anulare con vapore al centro)

Dopo aver eseguito tali calcoli preliminari, il programma inizia ad operare nel seguente modo: parte da una matrice inserita dall'operatore nel foglio "cost", di cui un esempio è riportato in Figura 5, che riproduce la distribuzione di:

- liquido (celle con inserito il numero 1);
- vapore (celle con inserito il numero 0);
- fluido bifase (celle con inseriti numeri compresi tra 0 e 1 rappresentativi della frazione di liquido)
- elettrodi (2 per il primo elettrodo, 3 per il secondo elettrodo);

Una volta inserita la distribuzione desiderata dall'utente, si attiva un processo iterativo che prevede a grandi linee i seguenti passi:

Step 1
Calcolo di una matrice con le reattanze delle singole celle: i valori delle reattanze per le celle che contengono liquido, vapore o aria vengono prelevate direttamente dal foglio "Dat"; le reattanze degli elettrodi vengono considerate coincidenti con *l'impedenza* resistiva, molto bassa, riportata nel foglio "Dat"; infine la reattanza delle celle con fluido bifase vengono calcolate come media pesata delle reattanze di liquido e vapore sulla base del coefficiente scritto nella corrispondente cella del foglio "Cost", che esprime la frazione di liquido.

Step 2
Generazione di una matrice che esprime il potenziale elettrico delle singole celle secondo le seguenti regole:

- le celle contrassegnate con il numero 2 (primo elettrodo) sono poste al semipotenziale di alimentazione, inserito con il segno "+";
- le celle contrassegnate con il numero 3 (secondo elettrodo) sono poste al semipotenziale di alimentazione inserito con il segno "-";
- tutte le altre celle sono poste ad un potenziale (V) che è la media pesate dei potenziali delle quattro celle che confinano attraverso un lato con la cella in esame ottenuta inserendo come coefficienti di pesatura *l'ammettenza* (inverso *dell'impedenza*) che è interposta tra il centro della cella oggetto di calcolo ed il centro della cella adiacente. Questa *ammettenza* viene calcolata come inverso della semisomma delle reattanze delle due celle coinvolte (la cella oggetto di calcolo e la cella adiacente), come indicato in Figura 6; le formule sono riportate di seguito, (3) e (4).

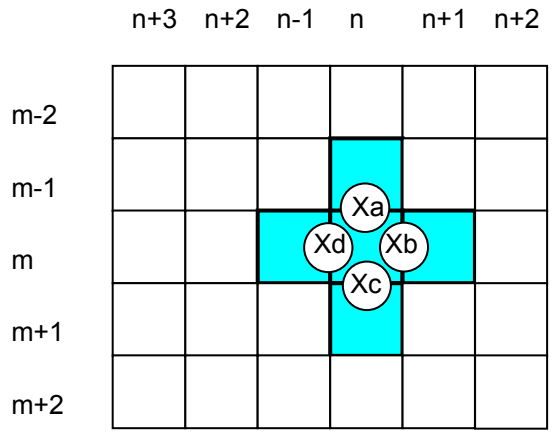


Figura 6: Procedura di calcolo della ammettenza di una singola cella

$$X_a = \frac{X_{(n,m-1)} + X_{(n,m)}}{2} \quad X_b = \frac{X_{(n+1,m)} + X_{(n,m)}}{2} \quad X_c = \frac{X_{(n,m+1)} + X_{(n,m)}}{2} \quad X_d = \frac{X_{(n-1,m)} + X_{(n,m)}}{2} \qquad (3)$$

$$V_{(n,m)}) = \frac{V_{(n-1,m)}\frac{1}{X_d} + V_{(n+1,m)}\frac{1}{X_b} + V_{(n,m-1)}\frac{1}{X_a} + V_{(n,m+1)}\frac{1}{X_c}}{\frac{1}{X_d} + \frac{1}{X_b} + \frac{1}{X_a} + \frac{1}{X_c}} \quad (4)$$

Step 3
Mediante altre matrici, si calcolano i valori della corrente erogata dal primo elettrodo e quella raccolta dal secondo elettrodo. Il calcolo descritto allo Step 2 viene ripetuto operando su tutte le celle della matrice in modo iterativo fin tanto che le correnti fluenti nei due elettrodi non assumono lo stesso valore. *L'impedenza* complessiva è calcolata dividendo la tensione totale (doppio della semitensione di alimentazione) per la corrente media fluente.

Step 4
Mediante altri operatori matriciali che determinano la media dei gradi di vuoto dei singoli elementi nella matrice "cost" si calcola il grado di vuoto medio della sezione.

Nell'ultima parte del foglio "Dat" e nel foglio "Cost" a destra della matrice che caratterizza la sezione, sono riportati i seguenti dati conclusivi, dove *l'impedenza* rappresenta il risultato principale.

Corrente in	A
Corrente out	A
Differenza	A
Differenza percentuale	%
Corrente media	A
Impedenza	ohm
Grado di vuoto medio	--

Utilizzando tale simulatore sono stati ricavati i segnali ottenibili da uno strumento reale in presenza di diverse configurazioni all'interno della sezione di tubazione, misurando *l'impedenza* totale in corrispondenza di diversi elettrodi. La quasi totalità delle diverse configurazioni analizzate è riportata in Allegato 1.

3.5.2. Interpretazione dei segnali

La parte più impegnativa ed ancora in corso di sviluppo è la messa a punto di un algoritmo complesso in grado di riottenere dai segnali, in questo caso generati dallo strumento virtuale ma in futuro generati da uno strumento reale, la distribuzione del grado di vuoto lungo la sezione.
La complessità è dovuta all'elevatissima dipendenza di ogni segnale dalle caratteristiche dielettriche di punti della sezione anche distanti dagli elettrodi utilizzati per determinare il segnale.
Come illustrato nel paragrafo 3.3, le linee di flusso che fuoriescono dalle armature di un condensatore, anche se rarefatte, descrivono percorsi che si distanziano anche notevolmente dalla congiungente le armature stesse. Questa interdipendenza rende complicato il calcolo, inoltre anche la disponibilità di un'accurata trattazione teorica del problema non ha consentito per ora di produrre uno strumento matematico gestibile.

È stato comunque prodotto un algoritmo basato su regressioni polinomiali che è in grado, con buona precisione, di ricostruire il grado di vuoto di distribuzioni stratificate o anulari caratterizzate da un film liquido di moderato spessore alla parete, eventualmente con spessore crescente verso la generatrice inferiore del tubo, e con un nucleo interno omogeneo caratterizzato da una massiccia presenza di vapore.
Il concetto di omogeneità del nucleo è da intendersi come omogeneità media nel tempo o nello spazio, rappresentato dall'asse del tubo, quindi quest'approccio è applicabile anche per moti a tappi.

SI riportano a titolo d'esempio i grafici dell'andamento del segnale in funzione dello spessore di film liquido rapportato al raggio in Figura 7 ed in funzione del suo inverso in Figura 8. I grafici sono tratti da una serie di simulazioni che prevedono elettrodi posizionati lungo due generatrice a 90° l'una dall'altra e un profilo di flusso anulare con vapore al centro ed un film liquido alla parete di spessore variabile tra zero ed il 75% del raggio.
Si può notare che il grafico in Figura 8 evidenzia un andamento pressoché lineare dovuto ad un legame iperbolico tra segnale e spessore del film liquido.
Si è pertanto operato una sostituzione di variabile utilizzando appunto il termine 1/T in luogo di T ed assegnando il valore di 1/T=60 nei casi in cui il film è assente.
In Figura 9 si riporta l'andamento del segnale in funzione della frazione di liquido nel nucleo centrale per diversi spessori del film liquido alla parete.

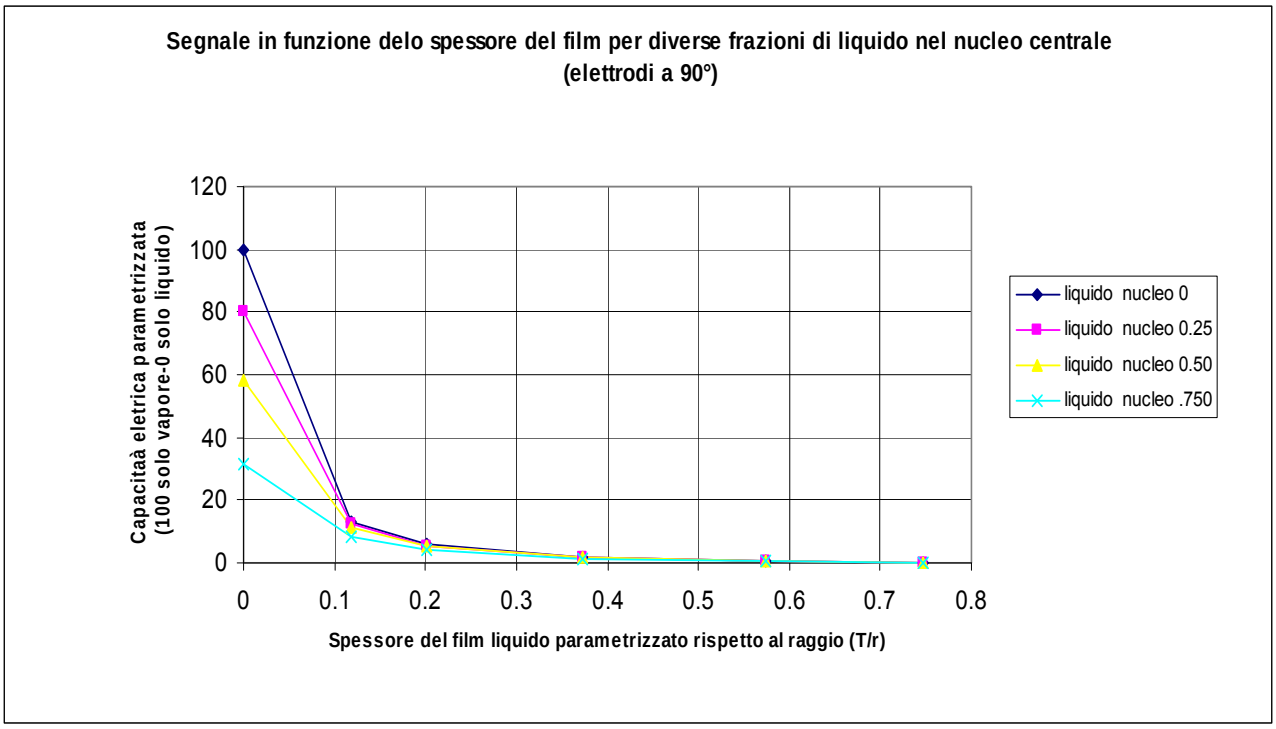


Figura 7: Segnale in funzione del rapporto Spessore film/raggio del tubo

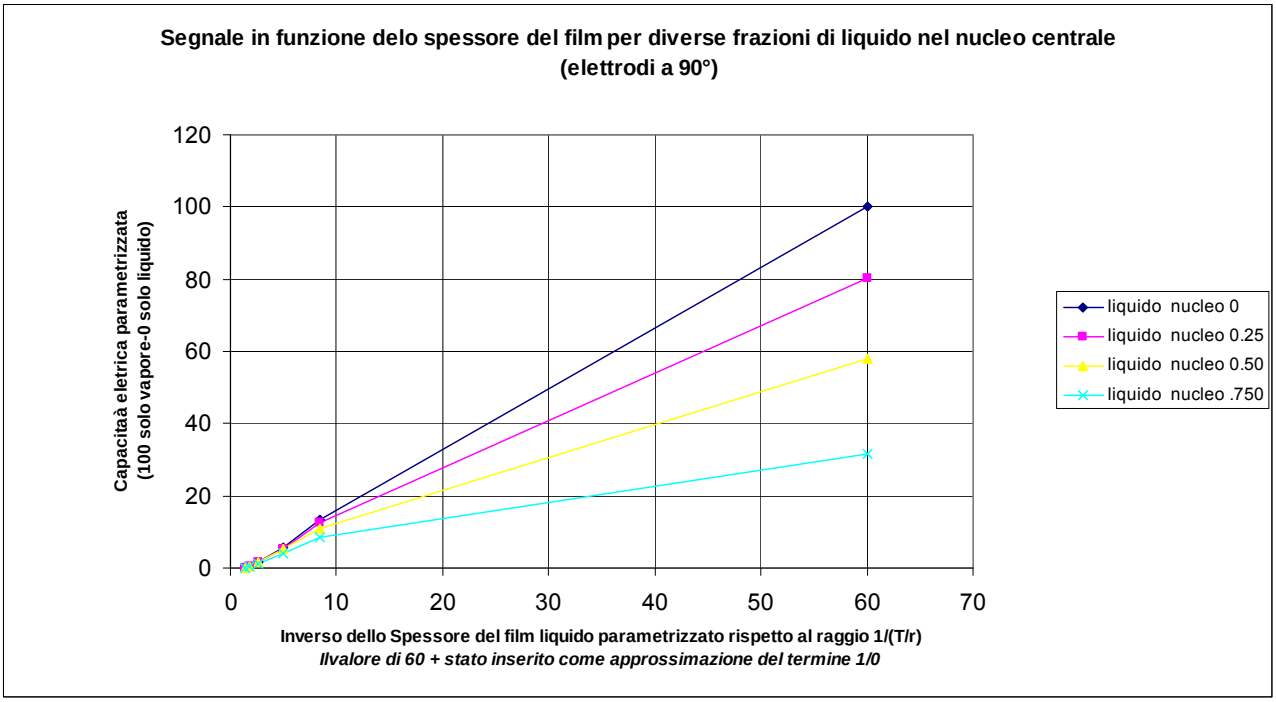


Figura 8: Segnale in funzione dell'inverso del rapporto Spessore film/raggio del tubo

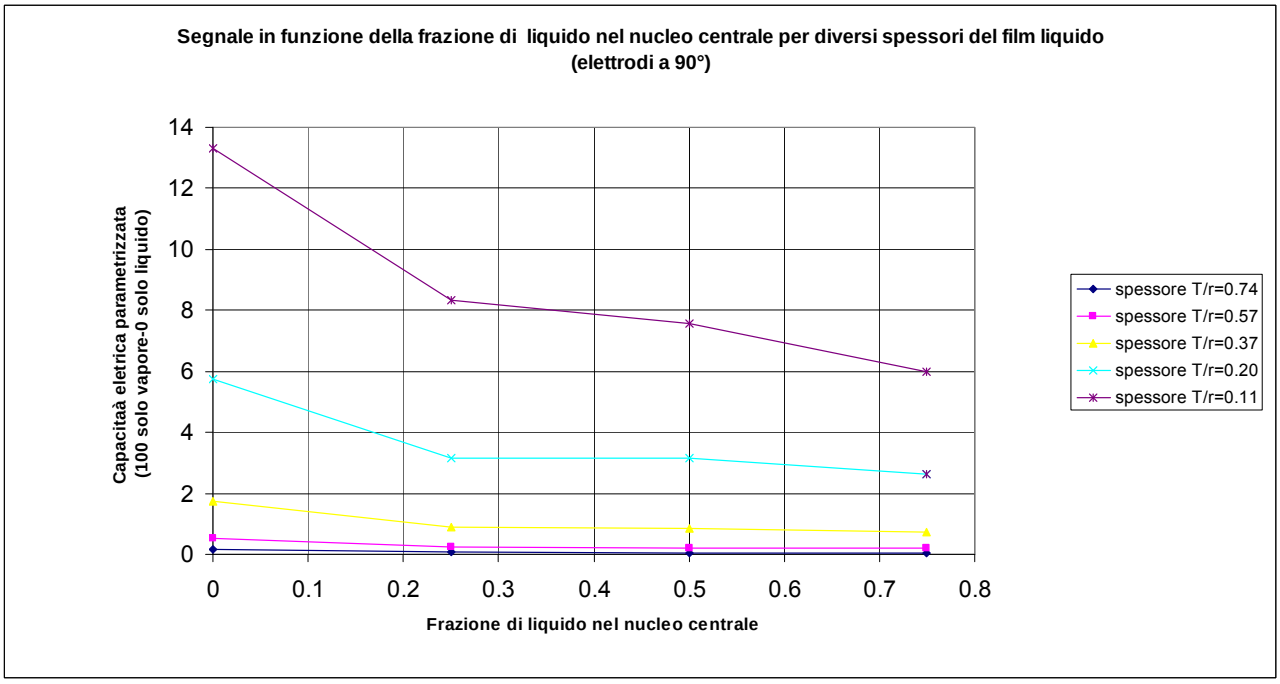


Figura 9: Segnale in funzione della frazione di liquido del nucleo interno

3.5.3. Struttura della formula polinomiale

I dati utilizzati per mettere a punto la forma polinomiale sono stati ricavati, con lo strumento virtuale, simulando sei configurazioni anulari con spessore crescente della zona liquida periferica.

Le stesse configurazioni sono state anche calcolate per 4 diversi gradi di vuoto del nucleo centrale, ottenendo in tal modo 24 combinazioni di profilo del grado di vuoto.

Ciascuna di queste 24 combinazioni è stata calcolata con elettrodi disposti a tre diverse angolazione relative, 22.5 °, 45 ° e 90 °.

Praticamente per ogni profilo di flusso sono stati determinati 3 valori di segnale, S_1, S_2 e S_3, uno per ogni coppia di elettrodi. E' necessario precisare che come valore di segnale non si è utilizzato il valore dell'*impedenza* complessiva rispetto ai due elettrodi espresso in ohm, bensì il valore d'*impedenza* normalizzato sottraendo l'*impedenza* che si verifica sulla stessa coppia di elettrodi quando nel tubo è presente solo liquido e dividendo il risultato per la differenza tra l'*impedenza* realizzata solo con vapore meno l'*impedenza* con solo liquido

$$S = \frac{Z - Z_L}{Z_V - Z_L} \qquad (5)$$

Dove:
S = Valore del segnale (adim)
Z= Impedenza rilevata (ohm)
Z_V= Impedenza per la stessa coppia di elettrodi con solo vapore nella tubazione (ohm)
Z_L= Impedenza per la stessa coppia di elettrodi con solo liquido nella tubazione (ohm)

In sostanza, il segnale normalizzato ha campo di variazione tra 0 (solo liquido) e 1 (solo vapore)

Effettivamente, sono state eseguite due regressioni:

- la prima per ricavare la dipendenza dai segnali dello spessore dello strato di liquido alla parete, t_{lp},
- la seconda per ricavare la dipendenza dei segnali del grado di vuoto del nucleo interno α_{ni}.

Le due regressioni operate hanno struttura polinomiale le cui variabili "note" sono i segnali normalizzati elevati alle potenze 1, 2 e 3. Le funzioni trovate hanno quindi la seguente struttura:

- grado di vuoto del nucleo interno:

$$\alpha_{ni} = a_1 S_1 + b_1 S_1^2 + c_1 S_1^3 + d_1 S_2 + e_1 S_2^2 + f_1 S_2^3 + g_1 S_3 + h_1 S_3^2 + i_1 S_3^3 + l_1 \qquad (6)$$

- spessore del film di liquido alla parete

$$1/t_{lp} = a_2 S_1 + b_2 S_1^2 + c_2 S_1^3 + d_2 S_2 + e_2 S_2^2 + f_2 S_2^3 + g_2 S_3 + h_2 S_3^2 + i_2 S_3^3 + l_2 \qquad (7)$$

La Tabella 3 riporta i 24 casi utilizzati per determinare la regressione con i valori di spessore del film liquido e di grado di vuoto della parte centrale effettivamente inseriti nello strumento virtuale, con i relativi segnali associati agli elettrodi nelle tre posizioni.

Accanto ai dati di input sono riportati i risultati ricavati utilizzando i coefficienti ed i relativi errori da questi ultimi, mentre nella zona sottostante sono riportati i vettori con i coefficienti.

Nelle due ultime colonne sono stati evidenziati in verde i risultati concordi con il dato di partenza entro il ±10%, in giallo i risultati concordi tra ±10% e ±20%, in rosso i valori che sono in disaccordo oltre il 20%.

Come si vede gli errori, specialmente per quanto riguarda i casi con film liquido sottile, sono molto contenuti.. I risultati relativi alla frazione di liquido della zona centrale sono imprecisi quando il film liquido alla parete assume uno spessore significativo.

Tabella 3: Valori di segnale dei casi usati per la regressione polinomiale e coefficienti del polinomio

		Segnali														
Caso	Tipo di profilo	angolo 90° Sottocaso A			angolo 45° Sottocaso B			*angolo 22.5° Sottocaso C*			1/T	Frazione di liquido		1/T calcolato	Frazione di liquido calcolata	Errore % termine 1/t	Errore % termine Fr. Liquido
		S_1	S_1^2	S_1^3	S_2	S_2^2	S_2^3	S_2	S_2^2	S_2^3							
1	*Bolla grande*	**0.154707**	0.023934	0.003703	**0.063751**	0.004064	0.000259	**0.033717**	0.001137	3.83E-05	1.338053	0		1.35874	0.43319	1.5456685	
2	*Bolla grandissima*	**0.52785**	0.278625	0.147072	**0.236979**	0.056159	0.013309	**0.132083**	0.017446	0.002304	1.739935	0		1.83752	0.34316	5.6086698	
3	*anulare spesso*	**1.745883**	3.048109	5.321643	**0.913695**	0.834839	0.762789	**0.549322**	0.301755	0.165761	2.683764	0		2.71726	0.30743	1.2481696	
4	*anulare medio*	**5.762797**	33.20983	191.3815	**3.474301**	12.07076	41.93746	**2.447157**	5.988579	14.65499	4.973527	0		5.13143	0.1752	3.1749357	
5	*anulare sottile*	**13.29262**	176.6937	2348.721	**8.778232**	77.05735	676.4273	**6.884933**	47.4023	326.3616	8.420819	0		8.56334	0.08975	1.6925111	
6	*Solo miscela*	**100**	10000	1000000	**100**	10000	1000000	**100**	10000	1000000	60	0		60.0042	0.00258	0.0069524	
7	*Bolla grande*	**0.151579**	0.022976	0.003483	**0.062444**	0.003899	0.000243	**0.032984**	0.001088	3.59E-05	1.338053	0.25		1.35356	0.43439	1.1588171	73.757988
8	*Bolla grandissima*	**0.516508**	0.26678	0.137794	**0.231846**	0.053753	0.012462	**0.129143**	0.016678	0.002154	1.739935	0.25		1.82237	0.34649	4.7380261	38.595162
9	*Anulare spesso*	**1.700336**	2.891141	4.91591	**0.891203**	0.794243	0.707831	**0.536126**	0.287432	0.1541	2.683764	0.25		2.68434	0.31742	0.0215484	26.969068
10	*Anulare medio*	**5.523287**	30.5067	168.4973	**3.354595**	11.25331	37.75029	**2.369343**	5.613787	13.30099	4.973527	0.25		5.07317	0.25604	2.0034666	2.4175342
11	*Anulare sottile*	**12.43564**	154.6452	1923.112	**8.333957**	69.45483	578.8336	**6.581416**	43.31503	285.0742	8.420819	0.25		8.28977	0.16481	-1.556304	-34.07461
12	*Solo miscela*	**80.3336**	6453.488	518431.9	**80.94547**	6552.169	530368.3	**82.71208**	6841.288	565857.1	60	0.25		59.9847	0.24055	-0.025454	-3.778784
13	*Bolla grande*	**0.145705**	0.02123	0.003093	**0.059972**	0.003597	0.000216	**0.031613**	0.000999	3.16E-05	1.338053	0.5		1.34419	0.43655	0.4588568	-12.68947
14	*Bolla grandissima*	**0.49529**	0.245312	0.121501	**0.222246**	0.049393	0.010977	**0.123659**	0.015291	0.001891	1.739935	0.5		1.79411	0.35267	3.1138862	-29.46539
15	*Anulare spesso*	**1.616251**	2.612269	4.222083	**0.849529**	0.721699	0.613104	**0.511563**	0.261696	0.133874	2.683764	0.5		2.62126	0.33546	-2.329039	-32.90873
16	*Anulare medio*	**5.102704**	26.03759	132.8621	**3.140255**	9.861201	30.96669	**2.229122**	4.968984	11.07647	4.973527	0.5		4.9669	0.38964	-0.133347	-22.07154
17	*Anulare sottile*	**11.03541**	121.7804	1343.897	**7.58016**	57.45882	435.547	**6.057766**	36.69653	222.299	8.420819	0.5		8.208	0.3734	-2.52725	-25.31922
18	*Solo miscela*	**57.93046**	3355.938	194411	**58.85796**	3464.26	203899.3	**61.8036**	3819.685	236070.3	60	0.5		60.0224	0.51388	0.0373419	2.7751954
19	*Bolla grande*	**0.130632**	0.017065	0.002229	**0.053649**	0.002878	0.000154	**0.028118**	0.000791	2.22E-05	1.338053	0.75		1.32008	0.44214	-1.343239	-41.04825
20	*Bolla grandissima*	**0.441303**	0.194748	0.085943	**0.19787**	0.039153	0.007747	**0.109788**	0.012054	0.001323	1.739935	0.75		1.72187	0.36839	-1.038452	-50.88138
21	*Anulare spesso*	**1.408662**	1.984329	2.79525	**0.745812**	0.556236	0.414848	**0.45028**	0.202752	0.091295	2.683764	0.75		2.45959	0.37659	-8.352841	-49.78782
22	*Anulare medio*	**4.166067**	17.35612	72.30676	**2.644082**	6.991167	18.48522	**1.899439**	3.607868	6.852925	4.973527	0.75		4.67383	0.64524	-6.025953	-13.96791
23	*Anulare sottile*	**8.311724**	69.08476	574.2134	**6.003418**	36.04103	216.3694	**4.923986**	24.24564	119.3852	8.420819	0.75		8.69	0.91635	3.1965681	22.179338
24	*Solo miscela*	**31.76383**	1008.941	32047.83	**32.57364**	1061.042	34562	**35.47085**	1258.181	44628.75	60	0.75		59.9818	0.73867	-0.030402	-1.510956

Coefficienti per la restituzione del termine 1/T partendo dai segnali e dalle loro potenze

S_1	S_1^2	S_1^3	S_2	S_2^2	S_2^3	S_2	S_2^2	S_2^3	cost
4.87E+00	-1.92E-01	1.01E-02	1.01E-02	-2.10E-02	-1.59E-02	1.50E+01	-5.88E-03	7.68E-03	1.12E+00

Coefficienti per la restituzione del termine di frazione di liquido nel nucleo partendo dai segnali e dalle loro pot

S_1	S_1^2	S_1^3	S_2	S_2^2	S_2^3	S_2	S_2^2	S_2^3	cost
-1.81E+00	-1.17E-02	2.30E-03	2.30E-03	-6.89E-02	-3.48E-03	-2.22E+00	3.72E-02	1.55E-03	4.91E-01

3.5.4. Considerazioni sui risultati delle elaborazioni

La messa a punto di uno strumento virtuale consente di simulare diverse soluzioni geometriche per gli elettrodi e la risposta di queste soluzioni a particolari distribuzioni di grado di vuoto; come tale è da considerarsi uno strumento completo che non richiederà presumibilmente ulteriori ottimizzazioni.

Lo strumento matematico della regressione polinomiale, finora utilizzato per ricavare dai segnali strumentali la distribuzione del grado di vuoto, necessita ancora di un'attività di ottimizzazione e di approfondimento; lo scopo di dimostrare la possibilità di ottenere dai segnali rilevati da uno strumento capacitivo è comunque raggiunto.

Il problema della scarsa sensibilità rispetto alla costante dielettrica degli strati interni è una conseguenza della caratteristica di distribuzione di sensibilità spaziale dei condensatori come illustrato nel paragrafo 3.3 accentuata dall'ulteriore distorsione di sensibilità dovuta alla presenza di uno strato esterno di liquido che concentra ulteriormente verso la periferia le linee di flusso. Questi due fenomeni rendono estremamente utile l'installazione di un elettrodo centrale, posizionato lungo il diametro della tubazione come accennato nel paragrafo 3.4, soprattutto nel caso in cui prevalgano i moti con componente anulare.

3.5.5. Prove preliminari

Per verificare la fattibilità pratica del metodo è stato realizzato un semplice esperimento utilizzando gli strumenti citati nel paragrafo 4.5 e disponibili nel laboratorio SIET.

Si tratta di un generatore di tensione alternata e di un oscilloscopio.

È stata realizzata una cella di misura costituita da un cilindro in materiale plastico chiuso all'estremità inferiore, del diametro interno di 50 mm ed esterno di 60 mm.

Attorno a questo cilindro, separati da una distanza di circa un diametro, sono stati realizzati due anelli metallici con connessioni elettriche.

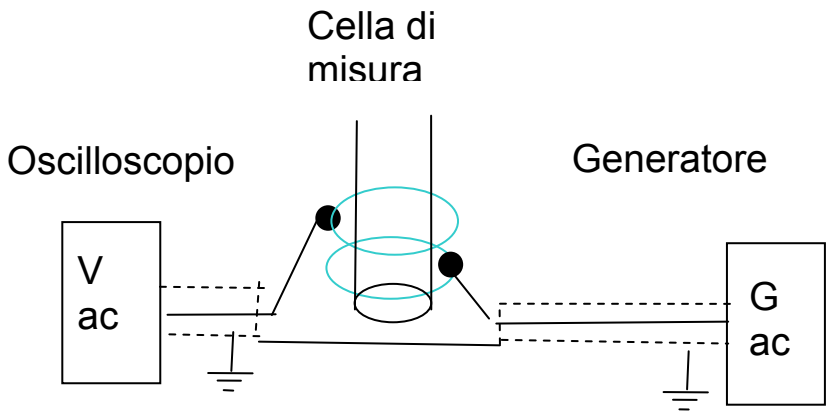


Figura 10: Schema dell'apparato utilizzato per le prove preliminari

Il circuito realizzato, visibile in Figura 10, seppure più semplice, riproduce quello riprodotto in Figura 17 dove il condensatore B è sostituito dalla capacità interna dell'oscilloscopio.

Alimentando questo circuito mediante il generatore G con una frequenza di 10 kHz ed una tensione di circa 10 V, sono state osservate le variazioni di segnale che si verificavano versando acqua nello spazio tra i due elettrodi.

Le variazioni osservate in termini di ampiezza di segnale sono state di circa il 100%; praticamente si è osservato un raddoppio del segnale quando veniva inserita acqua tra gli elettrodi.

Il risultato ottenuto, anche se molto empirico, ha avuto il pregio di dimostrare la possibilità di realizzare una sonda capacitiva.

4. PROGETTAZIONE DI UN DISPOSITIVO OPERANTE A FREDDO IN SITUAZIONI STAZIONARIE

4.1. Scopo dello strumento

Prima di giungere alla messa a punto di uno strumento in grado di essere impiegato su simulatori di reattori di tipo integrato è necessario realizzare una serie di test a condizioni ridotte di pressione e temperatura finalizzate a verificare e calibrare gli algoritmi che consentono di ottenere a partire dai valori di *impedenza* misurati tra le coppie di elettrodi le informazioni sul grado di vuoto.

Per tale attività sperimentale è necessario disporre di circuiti in grado di realizzare flussi bifase dalle caratteristiche note e di uno strumento che abbia la struttura dello strumento finale, ma che potrà essere dimensionato per condizioni meno gravose e che potrà anche operare le acquisizioni in modo più lento; infatti, il flusso bifase potrà essere mantenuto con caratteristiche costanti per tempi prolungati.

4.2. Struttura della cella

La teoria proposta nel capitolo 3 dimostra come un sistema basato su una serie di elettrodi disposti lungo le generatrici di un tubo cilindrico con l'integrazione di un eventuale elettrodo centrale fornisce informazioni idonee a ricostruire con sufficiente approssimazione il grado di vuoto di sezione nei casi illustrati.

In questo strumento gli elettrodi attivi potranno essere presenti soltanto su metà circonferenza della tubazione; infatti, essendo destinato all'utilizzo su circuiti di taratura, opererà sempre su flussi assiali simmetrici tipici dei condotti verticali o su flussi simmetrici rispetto al piano di mezzeria per tubi inclinati od orizzontali.

Il diametro interno scelto per la cella è 80 mm, poiché la maggior parte delle linee di SPES3 su cui potranno essere installati questi strumenti è compresa tra 2"1/2 e 3" con un diametro interno da circa 65 a circa 80 mm.

Inoltre, tubi con diametro interno di 80 mm presentano diametro esterno di circa 90 mm e consentono un'agevole installazione degli elettrodi senza ricorrere a componenti miniaturizzati.

La parte di cella che supporta gli elettrodi sarà realizzata con un tubo in materiale isolante trasparente (policarbonato o Pyrex®) raccordato a tronchetti metallici, terminanti con connessioni filettate per il collegamento al processo; le flange non sono necessarie in quanto le pressioni di esercizio saranno basse.

La lunghezza del tubo in materiale isolante sarà di almeno 60 cm per poter supportare elettrodi sufficientemente lunghi (40 cm) mantenendo tra le estremità di questi e di tronchetti metallici uno spazio sufficiente per ridurre il transito parassita di correnti nel metallo dei tronchetti.

Saranno utilizzate flange per unire meccanicamente, attraverso barre filettate, i due tronchetti metallici d'estremità, come illustrato nel disegno in Allegato 2, assemblando in tal modo lo strumento; infatti, come si può notare dal disegno stesso, i due tronchetti attraverso le flange e le barre filettate serrano il tubo in materiale isolante.

Tronchetti d'estremità e flange saranno realizzate in acciaio inossidabile (AISI 304 o 316)

Il tubo in materiale isolante, ad un'estremità sarà accoppiato direttamente al tronchetto metallico mediante giunti a bicchiere con guarnizioni piane di tenuta.
All'estremità opposta sarà posizionato un anello metallico con giunti a bicchiere simili a quelli dei tronchetti d'estremità. L'anello metallico sarà inserito tra il tratto principale di tubo isolante lungo circa 60 cm ed uno spezzone più corto di tubo isolante, lungo 10 cm.

Quest'anello metallico, sulla superficie interna affacciata nel fluido presenterà tre supporti realizzati con viti in acciaio inossidabile che sosteranno un tondino in acciaio inox costituente l'elettrodo centrale.

L'anello metallico e le viti in tal modo diventano l'elemento per connettersi elettricamente all'elettrodo centrale.
La funzione dello spezzone isolante da 10 cm è separare galvanicamente l'elettrodo centrale dai tronchetti metallici d'estremità.

Il centraggio dell'elettrodo da un lato è garantito dalla struttura di supporto descritta mentre dal lato opposto saranno previste alette in lamiera fissate sull'elettrodo che andranno in appoggio alla parete interna del tubo isolante, senza continuità elettrica con l'esterno.

Gli elettrodi periferici saranno realizzati con strisce di rame di 4 mm di larghezza e dello spessore di pochi decimi di mm incollate sulla parete esterna del tubo per una lunghezza di 400 mm. Alle estremità delle strisce saranno saldati i conduttori che consentono il collegamento all'elettronica di misura.
Considerando che gli elettrodi attivi sono disposti solo su un lato del tubo esterno e che lo sviluppo dell'arco è di circa 141 mm per un tubo con D_e di 90 mm, il passo degli elettrodi (per 16 elettrodi lungo l'intera circonferenza) è di 17.6 mm e lo spazio libero tra due elettrodi contigui è di 13.6 mm.

Anche se gli elettrodi attivi saranno solo quelli disposti su una semicirconferenza del tubo (in numero di 8+1) gli altri sette, posizionati dal lato opposto, saranno comunque installati al fine di riprodurre l'interazione tra elettrodi attivi e non attivi che sarà presente nello strumento finale.

Ogni singolo elettrodo sarà dotato di collegamento elettrico ad entrambe le estremità; in corrispondenza delle zone terminali degli elettrodi saranno realizzate due basette lineari dove sono saldati i fili.

Dal lato in cui non è inserito l'anello di supporto dell'elettrodo centrale la basetta porterà dieci Reed relè, nove per gli elettrodi esterni ed uno per l'elettrodo centrale

Sulla basetta del lato opposto sono previsti solo nove Reed relè per gli elettrodi esterni.

Per ogni basetta, due conduttori comuni al lato esterno di tutti i Reed relè, uno per basetta, connetteranno ad un ponte di Wheatstone i due elettrodi che si vogliono utilizzare per la misura.

4.3. Misure elettriche

La misura della capacità o *dell'impedenza* del condensatore costituito dalla cella di misura richiede la realizzazione di circuiti idonei.

Sono previsti due diversi livelli di realizzazione delle misure elettriche:

1. una fase in cui le misure saranno eseguite utilizzando strumentazione da laboratorio quale generatori di correnti e tensioni alternate, voltmetri ed oscilloscopi;
2. una fase che prevederà la realizzazione di un sistema d'acquisizione e misura dedicato.

La prima fase sarà limitata alla messa punto ed alla caratterizzazione della cella di misura su circuiti predisposti a tale attività, mentre la seconda fase sarà necessaria per rendere lo strumento applicabile sul simulatore di reattori integrati.

Lo scopo di questo documento progettuale è la definizione della prima modalità di misura.

4.4. Schemi circuitali

I valori della capacità elettrica della cella di misura sono dell'ordine di 10^{-10} Farad, quindi si tratta di capacità molto piccole che sono dello stesso ordine di grandezza della capacità dei conduttori coassiali per segnali elettrici o delle capacità parassite che si possono generare nell'iterazione tra gli elettrodi e le parti metalliche dello strumento o degli impianti adiacenti.
Per ottenere il segnale minimizzando i disturbi si farà ricorso ad un ponte di Wheatstone capacitivo; questo circuito consente di massimizzare il segnale rendendo misurabili variazioni anche piccole.
Inoltre, realizzando i cablaggi con discreta cura si potrà ridurre ulteriormente la formazione di capacità parassite.
La Figura 11 e la Figura 12 riproducono due diverse configurazioni di ponte di Wheatstone capacitivo con l'alimentatore che provvede all'energizzazione con tensione alternata e il voltmetro che misura la tensione causata dallo sbilanciamento del ponte.
Lo schema ideale dovrebbe essere un ponte di condensatori di cui uno attivo e tre dummy, eventualmente con uno dei tre dummy regolabile per poter bilanciare il sistema.

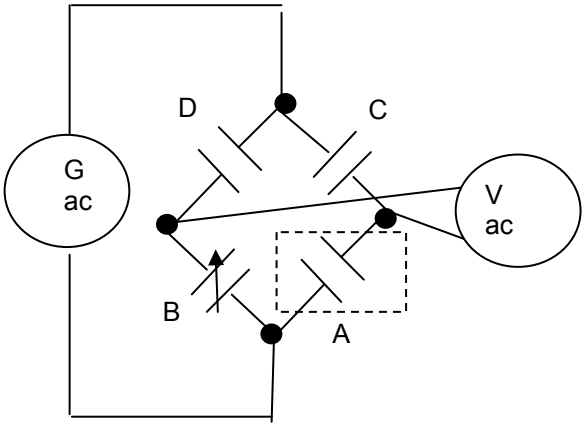


Figura 11: Ponte di Wheatstone capacitivo

Il condensatore A è costituito dalla cella di misure con la coppia di elettrodi attivi.

Il condensatore B è dotato della possibilità di variare la propria capacità per adattarsi alla capacità del condensatore A mentre i condensatori C e D sono fissi, tra loro uguali e con capacità paragonabile agli altri due (A e B).

Una seconda configurazione, che fornisce una risposta più lineare quando A e B sono diversi da C e D è quella rappresentata in Figura 12.

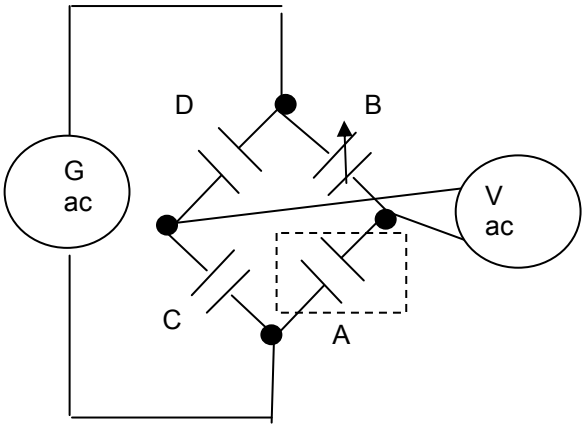


Figura 12: Schema circuitale alternativo per il ponte di Wheatstone capacitivo

A prescindere dalle due configurazioni adottabili, si tratta di realizzarle in modo che gli effetti parassiti non generino disturbi maggiori del segnale. Per far questo, l'utilizzo di una geometria regolare e l'adozione di schermi è assolutamente necessaria.

Nello schema seguente i cablaggi sono realizzati con cavi coassiali, circondati da schermi esterni totalmente collegati a massa che quindi fungono da gabbia di Faraday per evitare che i circuiti interagiscano disturbandosi a vicenda; grazie agli schermi si evita che i conduttori che sono collegati al generatore, che quindi sono sede della tensione di alimentazione del ponte, inducano tensioni sui conduttori che raccolgono il segnale di sbilanciamento del ponte che è molto più debole dell'alimentazione.

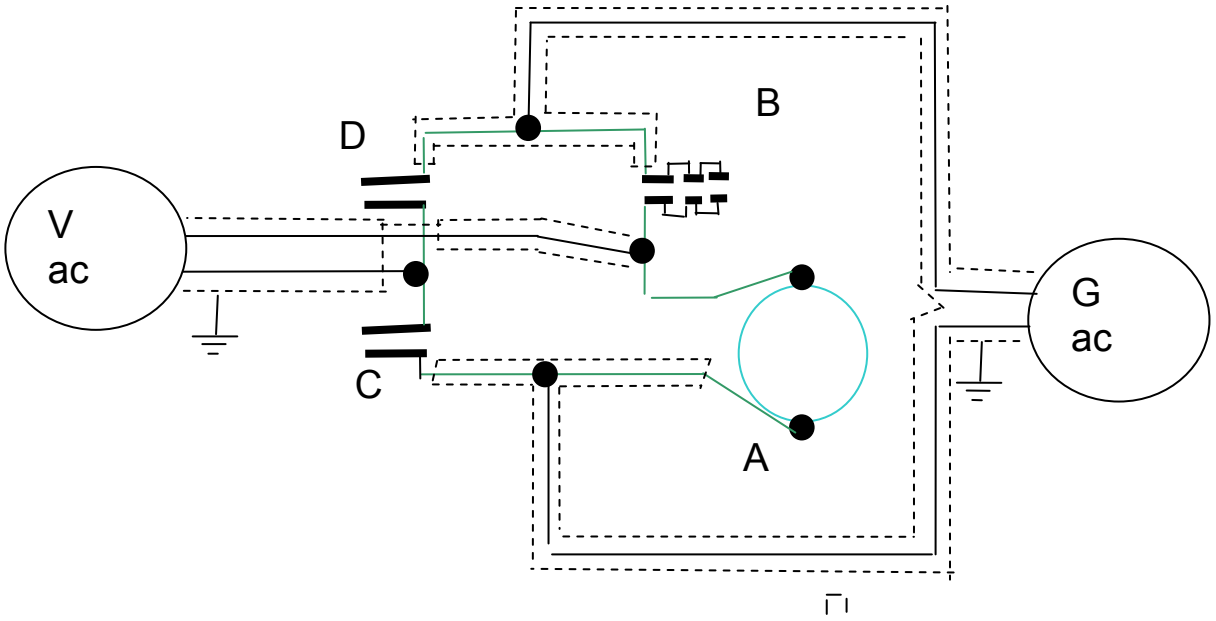


Figura 13: Schema circuitale del dispositivo

Nella Figura 13 è riprodotto lo schema circuitale dell'apparato. In blu è rappresentato il tubo con un diametro interno di 80 mm ed esterno di circa 90 mm, che nel prototipo iniziale sarà realizzato in Plexiglas®.

Il circuito a ponte descritto deve potersi collegare alle diverse coppie di elettrodi che sono presenti all'esterno del tubo realizzando in tal modo misure in diverse zone come è visibile in Figura 14.
Gli elettrodi periferici nella versione di strumento prevista per l'impiego a freddo sono disposti solo lungo mezza circonferenza del tubo e questo ne riduce il numero a 9 rispetto ai 16 preventivati per la versione finale.

La presenza di un elettrodo interno che si aggiunge ai 9 periferici porta a 10 il numero totale di elettrodi

Come descritto nel paragrafo relativo alla struttura, vi sono due basette dotate di Reed relè che chiudendosi a coppie rispetto ai rispettivi poli comuni consentiranno l'attivazione delle coppie di elettrodi volute.

Il dettaglio della basetta è riportato nel disegno in Allegato 2.

I tre condensatori B, C e D sono realizzati con lastra per circuito stampato con strato conduttore su entrambe le superfici.
Siccome lo spessore della lastra è di circa 1.5 – 2 mm per riprodurre la capacità del condensatore A che si ha quando all'interno del tubo c'è una piccola frazione d'acqua, dovrebbero essere sufficienti circa 10 – 20 cm^2.

In realtà i condensatori, in particolare il condensatore B che deve essere variabile, saranno realizzati riproducendo sulle lastre da circuito stampato una serie di zone diverse da mettere in parallelo mediante cavallotti realizzati con Reed relè. In questo modo è possibile tarare la capacità chiudendo un numero variabile di relè. La Figura 14 riproduce una possibile vista di una delle facce.

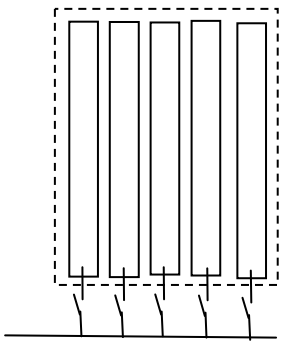


Figura 14: Armatura del condensatore a capacità variabile (con relè di taratura)

La faccia che realizza l'armatura opposta può essere eventualmente lasciata continua, perché il condensatore è tale solo dove entrambe le armature sono collegate, il concetto è schematizzato in Allegato 2.

Con riferimento alla Figura 13, le linee in verde rappresentano i collegamenti interni del ponte che devono essere tali da minimizzare gli effetti parassiti. Per mantenere una geometria regolare, simmetrica e priva di deformazioni elastiche, i collegamenti non schermati saranno realizzati con filo rigido, eventualmente bacchette di rame fissate a supporti stabili ed indeformabili.
I conduttori schermati, dove lo schermo è tratteggiato, saranno realizzati con cavo coassiale.

I conduttori di alimentazione del ponte che lo collegano al generatore di tensione alternata G saranno realizzati con conduttori schermati con schermo a terra, in questo modo si eviterà che il campo elettrico prodotto dal conduttore sia risentito da armature o conduttori nudi (in verde). Essendo le correnti circolanti comunque basse, è da temere non tanto il disturbo "magnetico", ma solo quello "di potenziale elettrico" facilmente schermabile con schermi "a massa".

Ai due punti dei capi della “diagonale” dove si effettua la misura, sarà collegato un doppino schermato con lunghezza limitata che trasporta il segnale allo strumento misuratore (Voltmetro ad alta frequenza).

Per evitare problemi dovuti a tensioni di modo comune, entrambi i poli del generatore dovranno essere flottanti e collegati a terra da una stessa capacità. Per ottenere ciò, con un generatore tradizionale è sufficiente introdurre un trasformatore toroidale in ferrite ad avvolgimenti separati. Il rapporto diverso da 1:1 potrebbe consentire anche l’aumento di tensione.

Anche il voltmetro dovrà essere flottante e bilanciato rispetto a terra; se si usa l’oscilloscopio il “–“ è a terra ed in ogni caso ha un legame capacitivo con la terra diverso rispetto al “+”. Con un secondo trasformatore in ferrite con rapporto 1:1 si ottiene il completo disaccoppiamento ohmico e capacitivo.

La Figura 15 presenta uno schema del dispositivo rappresentato in Figura 13 ma con elettrodi a ridotta distanza attivati.

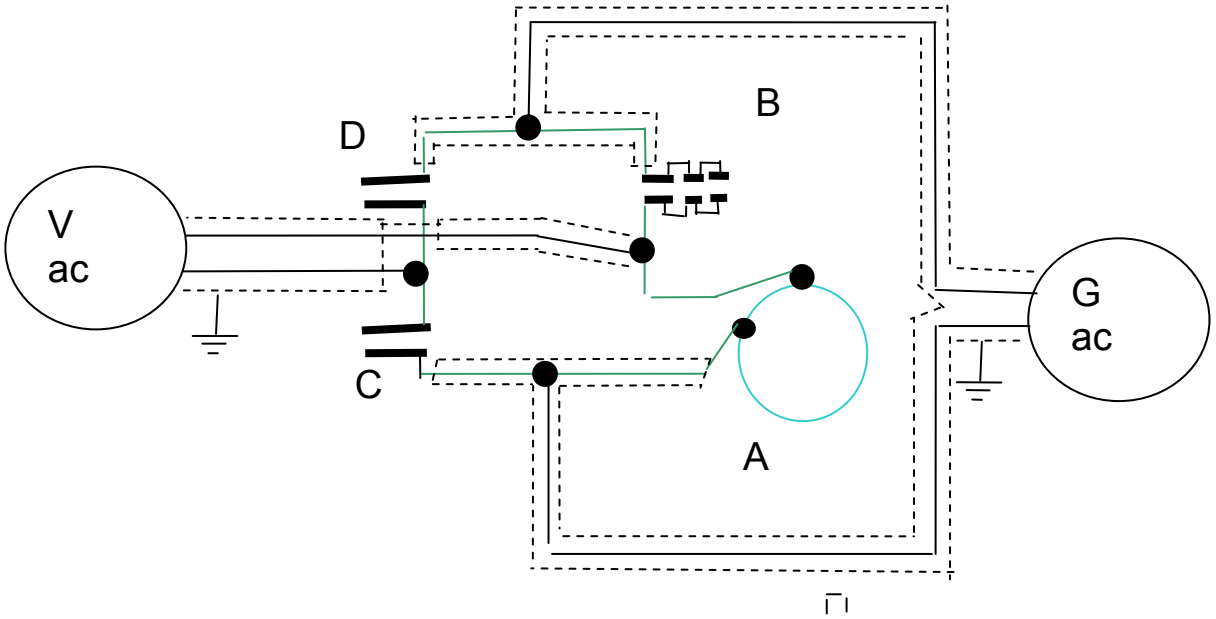


Figura 15: Schema del dispositivo con due elettrodi a ridotta distanza attivati

4.5. Strumenti di generazione e misura

La generazione della tensione alternata per l'alimentazione del ponte richiede uno strumento programmabile con un'uscita particolarmente stabile.

Presso SIET S.p.A. è disponibile un calibratore da banco dalle notevoli prestazioni: FLUKE mod. 5500

La massima tensione che può essere emessa a frequenze dell'ordine di 10 – 100 kHz è di 50 V.

La misura di tensione potrà essere realizzata con l'oscilloscopio digitale Hewlett Packard 54200A che è sempre disponibile presso SIET S.p.A..

Lo schema modificato con l'inserzione dei trasformatori d'isolamento è presentato in Figura 16.

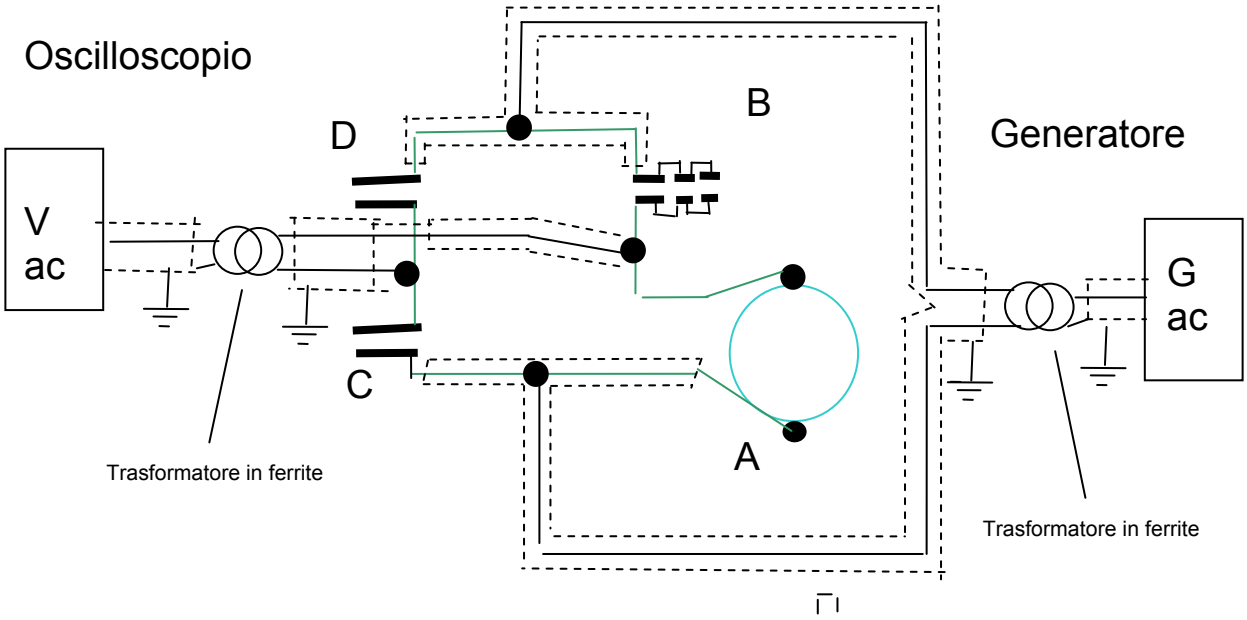


Figura 16: Schema del dispositivo con trasformatori per disaccoppiare i potenziali di modo comune

4.6. Schemi alternativi

Oltre allo schema che prevede la realizzazione di un ponte capacitivo completo sarà verificata la prestazione di uno schema semplificato che utilizza sempre strumentazione da banco ma che non richiede trasformatori d'isolamento.

Lo schema riportato nella Figura 17 è sostanzialmente un partitore capacitivo che comprende: il condensatore costituito dalla cella di misura rappresentata dal tubo e da una coppia di elettrodi (A), ed un condensatore (B) che avrà di capacità più elevata di quella della cella (indicativamente $1x10^{-9}$ F).
Il condensatore (B) potrà essere con capacità variabile a step discreti come rappresentato nel circuito a ponte di Figura 11 e Figura 12.

La differenza tra la tensione globale applicata al partitore (condensatori A + B) e la tensione parziale misurata ai capi del condensatore B, esprime il valore della tensione applicata alla sola cella A.

Il rapporto tra quest'ultimo valore e la corrente circolante proporzionale al solo valore di tensione, misurato ai capi di B, sarà proporzionale *all'impedenza* della cella di misura.

In sintesi il segnale che esprime la capacita della cella sarà dato dalla formula.

$$S_c = k\,\frac{V(A+B)-V(B)}{V(B)} \qquad (8)$$

Dove k rappresenta una costante di proporzionalità.

L'inverso rappresenterà invece un segnale proporzionale *all'impedenza*.

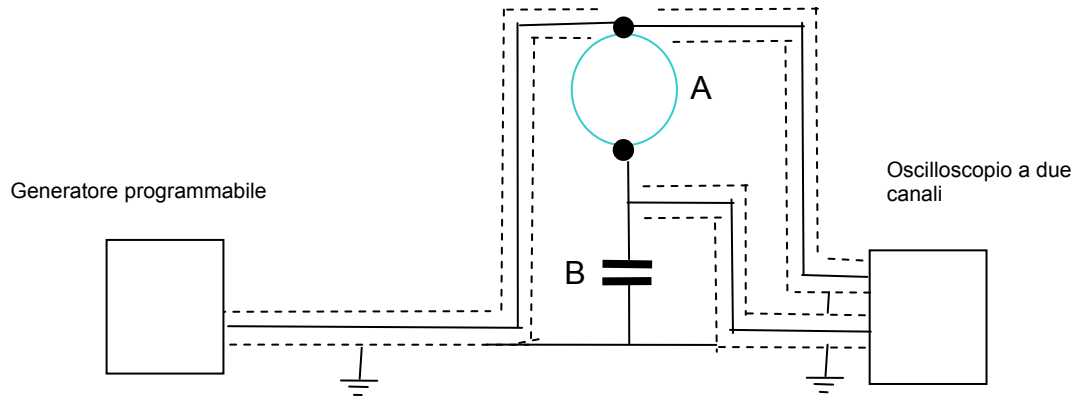


Figura 17: Schema circuitale alternativo

5. PROGETTO PRELIMINARE DI UN DISPOSITIVO AD ALTA PRESSIONE/TEMPERATURA

Per inserire il dispositivo sull'impianto SPES3 garantendo l'affidabilità e la sicurezza, si propone a livello preliminare uno strumento che, replicando la stessa struttura della versione a bassa pressione, si propone di racchiudere il tutto in un "tubo di forza" in acciaio in grado di contenere anche il ponte elettrico.

Da questo tubo uscirebbero solo i cavi schermati; il suo diametro interno dovrebbe essere almeno il doppio del diametro del tubo in materiale dielettrico, per alloggiare i condensatori B, C e D.
Il tubo dielettrico che convoglia il fluido non sarà più Plexiglas® ma Pyrex® o policarbonato ad alta resistenza.

Le estremità del tubo di forza in acciaio saranno vincolate a due testate che ospiteranno anche le tenute scorrevoli (con doppi O-Ring in Karlez® o teflon caricato) per le estremità del tubo dielettrico.
Le testate saranno flangiate al tubo di forza che rappresenterà anche l'elemento resistente alle sollecitazioni trasmesse dalle tubazioni.

L'intercapedine tra tubo dielettrico e tubo di forza sarà riempita con aria secca o gas inerte in pressione per ridurre le sollecitazioni di trazione circonferenziale sul tubo dielettrico.

All'interno del tubo di forza potrà essere posata una telecamera miniaturizzata con flash veloce per riprese del tipo di moto.

Il gas in pressione presente nell'intercapedine sarà raffreddato da uno scambiatore realizzato con tubi disposti lungo la parete interna del tubo di forza con andamento elicoidale, in modo da mantenere la temperatura all'interno della camicia sotto il valore di 70 °C che costituisce il valore limite per il funzionamento dei Reed relè commerciali.

La superficie totale dello scambiatore dovrà essere dell'ordine di 0.5 m^2, circa il quadruplo della superficie esterna del tubo in Pyrex®; lo scambio verso lo scambiatore potrà essere facilitato da ventilatori per la circolazione dell'aria all'interno dell'intercapedine.

L'accoppiamento del tubo in Pyrex® con la tubazione metallica sarà realizzato sempre con giunti a bicchiere ma, a differenza della versione a bassa temperatura, le guarnizioni saranno O-Ring esterni al tubo in vetro per evitare di comprimere assialmente il tubo in vetro Pyrex® favorendone la rottura.

Per consentire di raccogliere informazioni anche su correnti fluide non simmetriche rispetto al piano verticale, tutta la parte esterna del tubo sarà dotata di elettrodi che saranno in numero di 16; considerando anche l'elettrodo interno il numero totale degli elettrodi salirà a 17.

Il disegno in Allegato 3 raffigura una possibile struttura della cella di misura in versione per alta pressione e temperatura; le dimensioni rappresentate non sono state sottoposte a verifica strutturale ai fini delle sollecitazioni derivanti da pressione e temperatura.

6. CONCLUSIONI

Le simulazioni numeriche svolte hanno verificato l'affidabilità della routine sviluppata ed hanno consentito di dimostrare sia la fattibilità di uno strumento capacitivo sia la possibilità di sviluppare algoritmi idonei alla ricostruzione del profilo di moto bifase.

E' pertanto stato possibile progettare a livello esecutivo un prototipo per il funzionamento a bassa pressione e bassa temperatura che consentirà di ottimizzare e verificare sperimentalmente gli algoritmi per la ricostruzione di grado di vuoto medio e tipo di moto nonché le incertezze ottenibili.

E' stata infine definita la progettazione preliminare di un dispositivo in grado di operare a pressione dell'ordine dei 15 bar ed a temperature di saturazione.

Non si può escludere che l'eventuale fase sperimentale sul primo prototipo a bassa pressione/temperatura possa portare a risultati che richiederanno parziali modifiche della distribuzione degli elettrodi e che tali modifiche vengano realizzate anche per la versione per alta pressione.

Mentre la struttura meccanica della versione per alta pressione può essere considerata già sufficientemente robusta ed affidabile per poter passare direttamente alla fase di progettazione esecutiva.

7. BIBLIOGRAFIA

[1] SIET document 01 572 RT 09 Rev.0: Two-phase flow measurement for SPES3 facility: spool piece mathematical correlations, 14/07/2010

[2] SIET document 01 605 ST 10 Rev.0: Strumentazione Speciale per l'Impianto Sperimentale SPES-3, 14/07/2010

[3] SIET document 01 525 ST 09 Rev.0: SPES3 - Two-phase Mass Flow Measurements: Technical Specifications, 14/07/2010

[4] M. Uematsu, E. U. Franck, Static Dielectric Constant of Water and Steam, J. Phys. Chem. Ref. Data, Vol. 9, No. 4, 1980

Allegato 1

Calcoli eseguiti con il software che riproduce lo strumento virtuale

TABELLA RIASSUNTIVA

DEI CASI ANULARI

Allegato 1 tabella riassuntiva dei casi anulari

Angolo elettrodi 90°

Caso	Sottocaso	Descrizione	Impedenza (ohm)	grado di vuoto	**Segnale "S" (adim)**	Spessore del liquido T (adim)	1/T	Frazione di liquido
		Solo liquido	5138	0	0			
		Solo vapore	156848	1	100			
1	a	Bolla grande	5373	0.06383	0.15471	0.74735	1.3381	0
2	a	Bolla grandissima	5939	0.18085	0.52785	0.57473	1.7399	0
3	a	anulare spesso	7787	0.39362	1.74588	0.37261	2.6838	0
4	a	anulare medio	13881	0.63830	5.76280	0.20106	4.9735	0
5	a	anulare sottile	25304	0.77660	13.29262	0.11875	8.4208	0
6	a	Solo miscela	156848	1	100	0		0
7	a	Bolla grande	5368	0.04787	0.15158	0.74735	1.3381	0.25
8	a	Bolla grandissima	5921	0.13564	0.51651	0.57473	1.7399	0.25
9	a	Anulare spesso	7717	0.29521	1.70034	0.37261	2.6838	0.25
10	a	Anulare medio	13517	0.47872	5.52329	0.20106	4.9735	0.25
11	a	Anulare sottile	24004	0.58245	12.43564	0.11875	8.4208	0.25
12	a	Solo miscela	127012	0.75	80.33360	0		0.25
13	a	Bolla grande	5358.92	0.03191	0.14570	0.74735	1.3381	0.5
14	a	Bolla grandissima	5889.28	0.09043	0.49529	0.57473	1.7399	0.5
15	a	Anulare spesso	7590	0.19681	1.61625	0.37261	2.6838	0.5
16	a	Anulare medio	12879	0.31915	5.10270	0.20106	4.9735	0.5
17	a	Anulare sottile	21880	0.38830	11.03541	0.11875	8.4208	0.5
18	a	Solo miscela	93024	0.5	57.93046	0		0.5
19	a	Bolla grande	5336	0.01596	0.13063	0.74735	1.3381	0.75
20	a	Bolla grandissima	5807	0.04521	0.44130	0.57473	1.7399	0.75
21	a	Anulare spesso	7274.95	0.09840	1.40866	0.37261	2.6838	0.75
22	a	Anulare medio	11458.22	0.15957	4.16607	0.20106	4.9735	0.75
23	a	Anulare sottile	17747.61	0.19415	8.31172	0.11875	8.4208	0.75
24	a	Solo miscela	53327	0.25	31.76383	0		0.75

Angolo elettrodi 45°

Caso	Sottocaso	Descrizione	Impedenza (ohm)	grado di vuoto	**Segnale "S" (adim)**	Spessore del liquido T (adim)	1/T	Frazione di liquido
		Solo liquido	3886	0	0			
		Solo vapore	1.14425E+05	1	100			
1	b	Bolla grande	3957	0.063829787	0.063750821	0.747354424	1.3381	0
2	b	Bolla grandissima	4148	0.180851064	0.236979398	0.574734126	1.7399	0
3	b	anulare spesso	4896	0.393617021	0.913695333	0.372610949	2.6838	0
4	b	anulare medio	7727	0.638297872	3.474300597	0.201064538	4.9735	0
5	b	anulare sottile	13590	0.776595745	8.77823E+00	0.118753301	8.4208	0
6	b	Solo miscela	1.14425E+05	1	100	0		0
7	b	Bolla grande	3955	0.04787234	0.062444149	0.747354424	1.3381	0.25
8	b	Bolla grandissima	4142	0.135638298	0.231846367	0.574734126	1.7399	0.25
9	b	Anulare spesso	4871	0.295212766	0.891202904	0.372610949	2.6838	0.25
10	b	Anulare medio	7594.29	0.478723404	3.354595157	0.201064538	4.9735	0.25
11	b	Anulare sottile	13098	0.582446809	8.33396E+00	0.118753301	8.4208	0.25
12	b	Solo miscela	93362.16	0.75	80.94546645	0		0.25
13	b	Bolla grande	3952.46	0.031914894	0.059971529	0.747354424	1.3381	0.5
14	b	Bolla grandissima	4131.84	0.090425532	0.22224585	0.574734126	1.7399	0.5
15	b	Anulare spesso	4825	0.196808511	0.849528705	0.372610949	2.6838	0.5
16	b	Anulare medio	7357	0.319148936	3.140254931	0.201064538	4.9735	0.5
17	b	Anulare sottile	12265	0.388297872	7.58016E+00	0.118753301	8.4208	0.5
18	b	Solo miscela	68947	0.5	58.85796161	0		0.5
19	b	Bolla grande	3945	0.015957447	0.053649222	0.747354424	1.3381	0.75
20	b	Bolla grandissima	4105	0.045212766	0.197870419	0.574734126	1.7399	0.75
21	b	Anulare spesso	4710.58	0.098404255	0.745812336	0.372610949	2.6838	0.75
22	b	Anulare medio	6808.90	0.159574468	2.644081507	0.201064538	4.9735	0.75
23	b	Anulare sottile	10522.26	0.194148936	6.00342E+00	0.118753301	8.4208	0.75
24	b	Solo miscela	39893	0.25	32.57364112	0		0.75

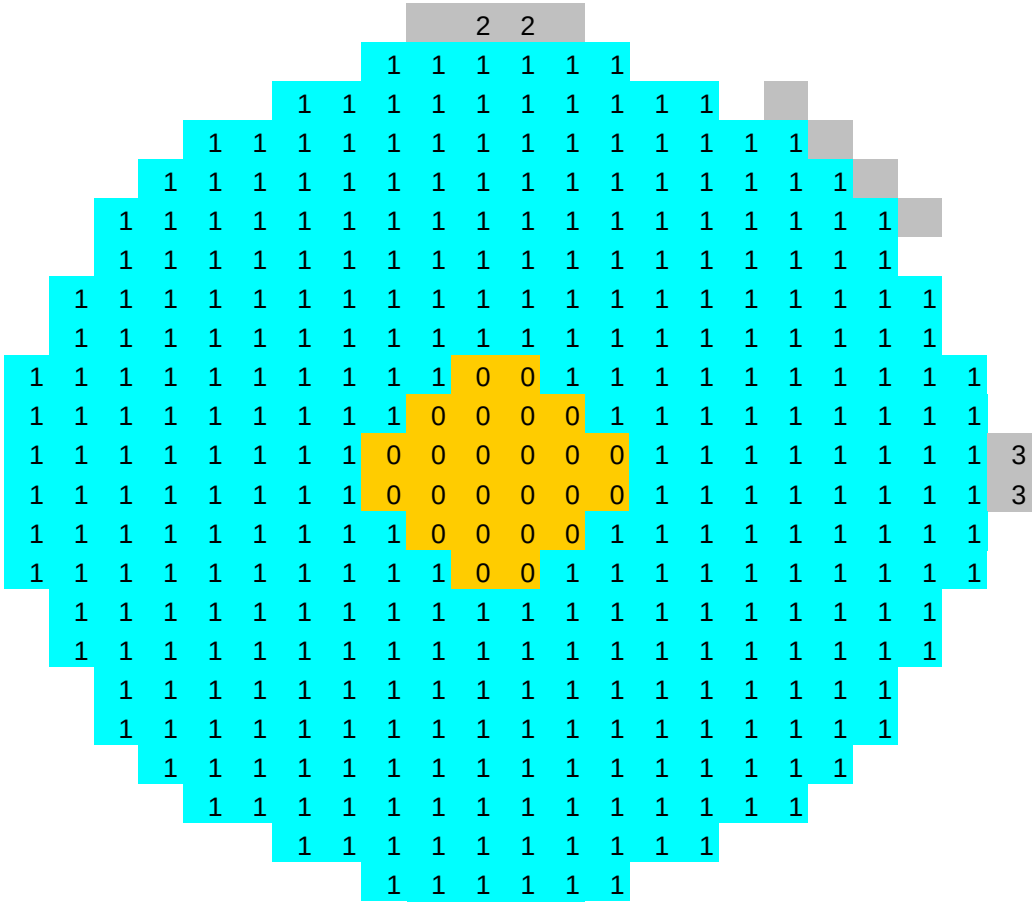
Angolo elettrodi 22.5°

Caso	Sottocaso	Descrizione	Impedenza (ohm)	grado di vuoto	**Segnale "S" (adim)**	Spessore del liquido T (adim)	1/T	Frazione di liquido
		Solo liquido	3462	0	0			
		Solo vapore	88747	1	100			
1	c	Bolla grande	3491	0.063829787	0.033716522	0.747354424	1.3381	0
2	c	Bolla grandissima	3575.11	0.180851064	0.132082579	0.574734126	1.7399	0
3	c	Anulare spesso	3930.96	0.393617021	0.549322482	0.372610949	2.6838	0
4	c	Anulare medio	5550	0.638297872	2.44715727	0.201064538	4.9735	0
5	c	Anulare sottile	9334	0.776595745	6.884932658	0.118753301	8.4208	0
6	c	Solo miscela	88747	1	100	0		0
7	c	Bolla grande	3491	0.04787234	0.032984268	0.747354424	1.3381	0.25
8	c	Bolla grandissima	3573	0.135638298	0.129142738	0.574734126	1.7399	0.25
9	c	Anulare spesso	3920	0.295212766	0.53612647	0.372610949	2.6838	0.25
10	c	Anulare medio	5483.16	0.478723404	2.369343119	0.201064538	4.9735	0.25
11	c	Anulare sottile	9075	0.582446809	6.581415616	0.118753301	8.4208	0.25
12	c	Solo miscela	74003.39	0.75	82.71207613	0		0.25
13	c	Bolla grande	3489.43	0.031914894	0.031613114	0.747354424	1.3381	0.5
14	c	Bolla grandissima	3567.93	0.090425532	0.123658759	0.574734126	1.7399	0.5
15	c	Anulare spesso	3899	0.196808511	0.511562751	0.372610949	2.6838	0.5
16	c	Anulare medio	5364	0.319148936	2.229121814	0.201064538	4.9735	0.5
17	c	Anulare sottile	8629	0.388297872	6.057766421	0.118753301	8.4208	0.5
18	c	Solo miscela	56172	0.5	61.80360019	0		0.5
19	c	Bolla grande	3486	0.015957447	0.028117639	0.747354424	1.3381	0.75
20	c	Bolla grandissima	3556	0.045212766	0.109788487	0.574734126	1.7399	0.75
21	c	Anulare spesso	3846.49	0.098404255	0.450280321	0.372610949	2.6838	0.75
22	c	Anulare medio	5082.40	0.159574468	1.899438883	0.201064538	4.9735	0.75
23	c	Anulare sottile	7661.88	0.194148936	4.923985877	0.118753301	8.4208	0.75
24	c	Solo miscela	33714	0.25	35.47084757	0		0.75

CASO A:

Elettrodi a 90°

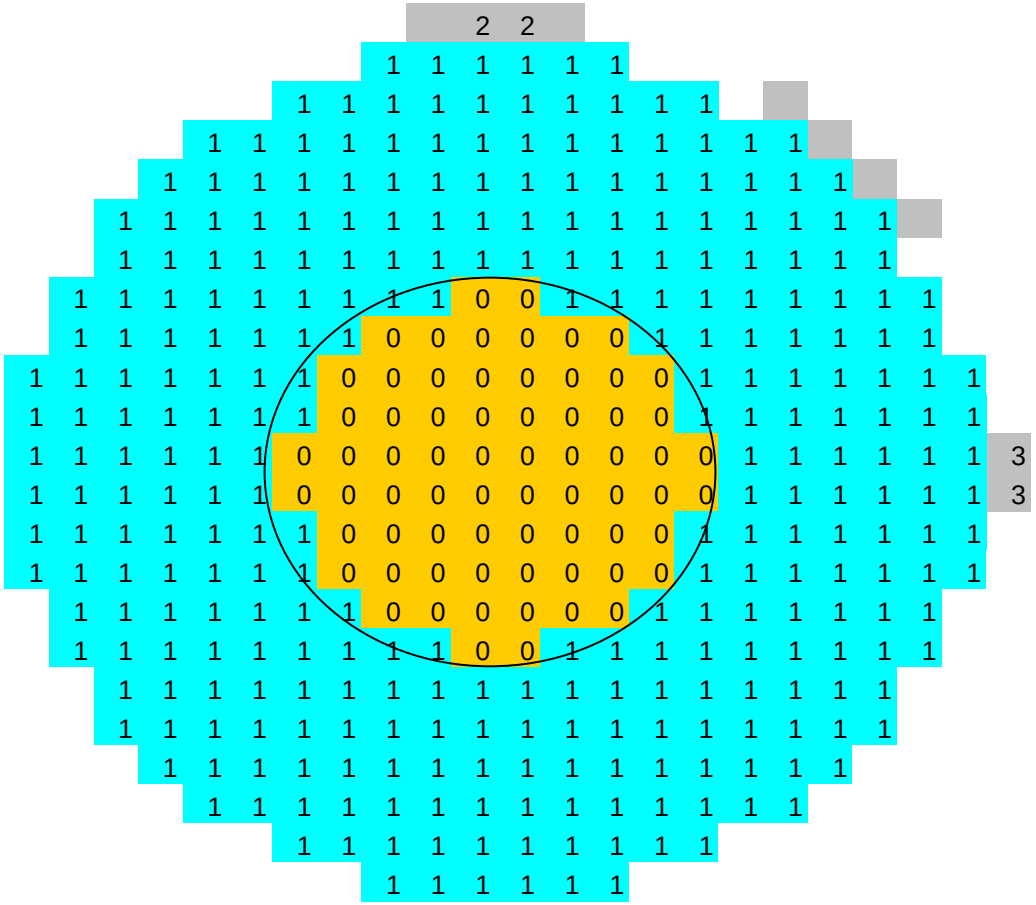
CASO 1A



Corrente in	A	3.72288E-02
Corrente out	A	-3.72234E-02
Differenza	A	5.46136E-06
"	%	1.46697E-02
Corrente media	A	3.72261E-02
Impedenza	ohm	5.37258E+03

Somma dei gradi di "pieno"elementari	352
Numero di elementi	376
Grado di "pieno" medio	0.936170213
Grado di vuoto medio	0.063829787

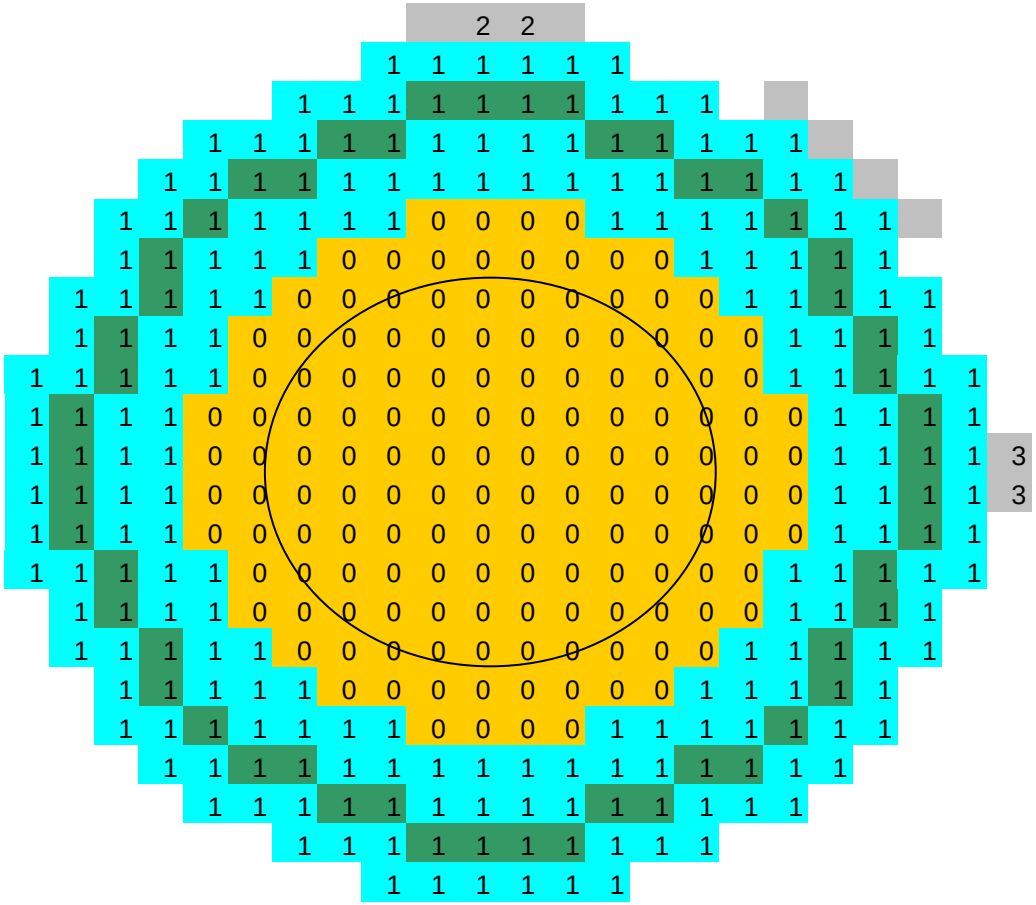
CASO 2A



Corrente in	A	3.36785E-02
Corrente out	A	-3.36766E-02
Differenza	A	1.89171E-06
"	%	5.61697E-03
Corrente media	A	3.36776E-02
Impedenza	ohm	5.93867E+03

Somma dei gradi di "pieno"elementari	308
Numero di elementi	376
Grado di "pieno" medio	0.819148936
Grado di vuoto medio	0.180851064

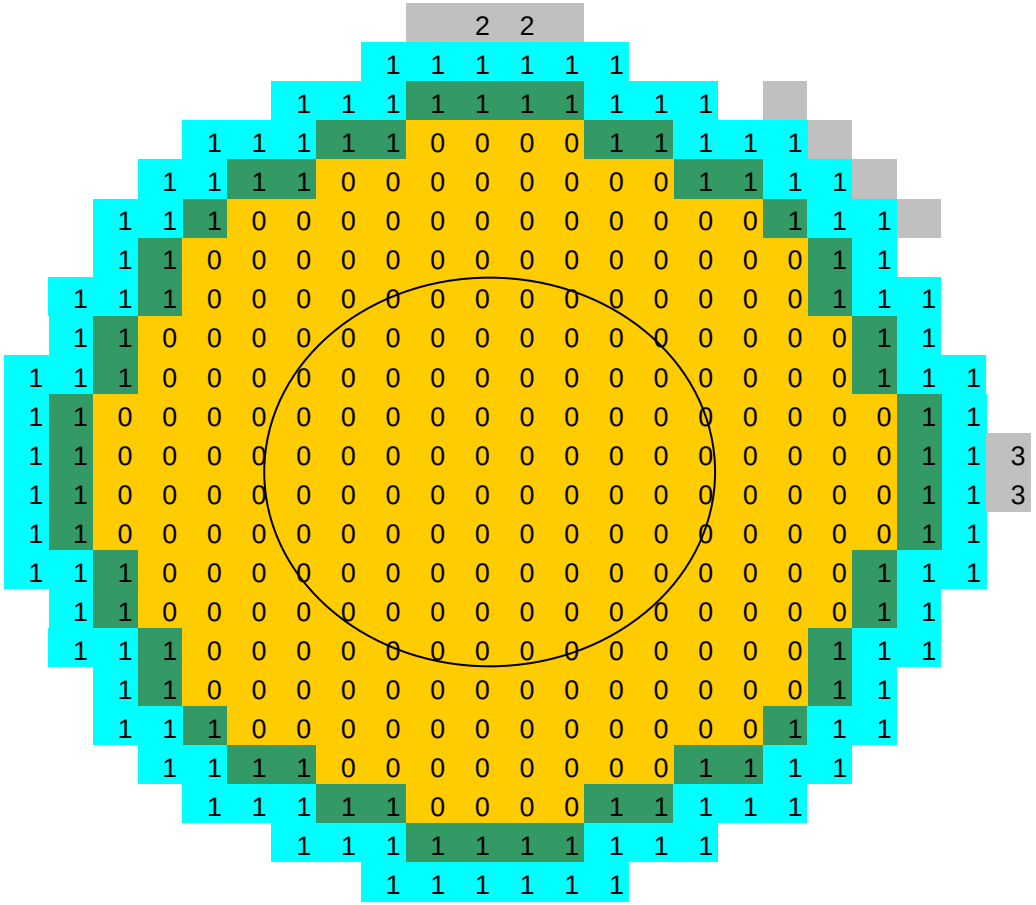
CASO 3A



Corrente in	A	2.56854E-02
Corrente out	A	-2.56852E-02
Differenza	A	1.48325E-07
"	%	5.77471E-04
Corrente media	A	2.56853E-02
Impedenza	ohm	7.78655E+03

Somma dei gradi di "pieno"elementari	228
Numero di elementi	376
Grado di "pieno" medio	0.606382979
Grado di vuoto medio	0.393617021

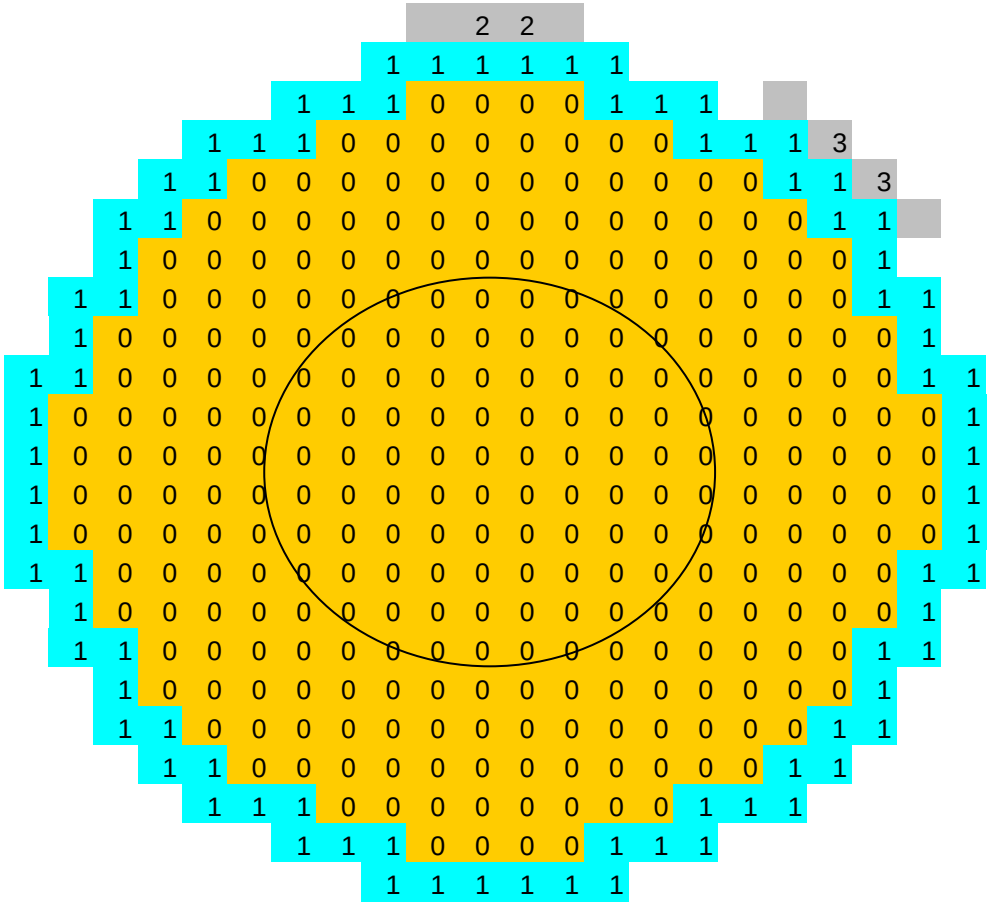
CASO 4A



Corrente in	A	1.43877E-02
Corrente out	A	-1.44295E-02
Differenza	A	-4.18096E-05
"	%	-2.90593E-01
Corrente media	A	1.44086E-02
Impedenza	ohm	1.38806E+04

Somma dei gradi di "pieno"elementari	136
Numero di elementi	376
Grado di "pieno" medio	0.361702128
Grado di vuoto medio	0.638297872

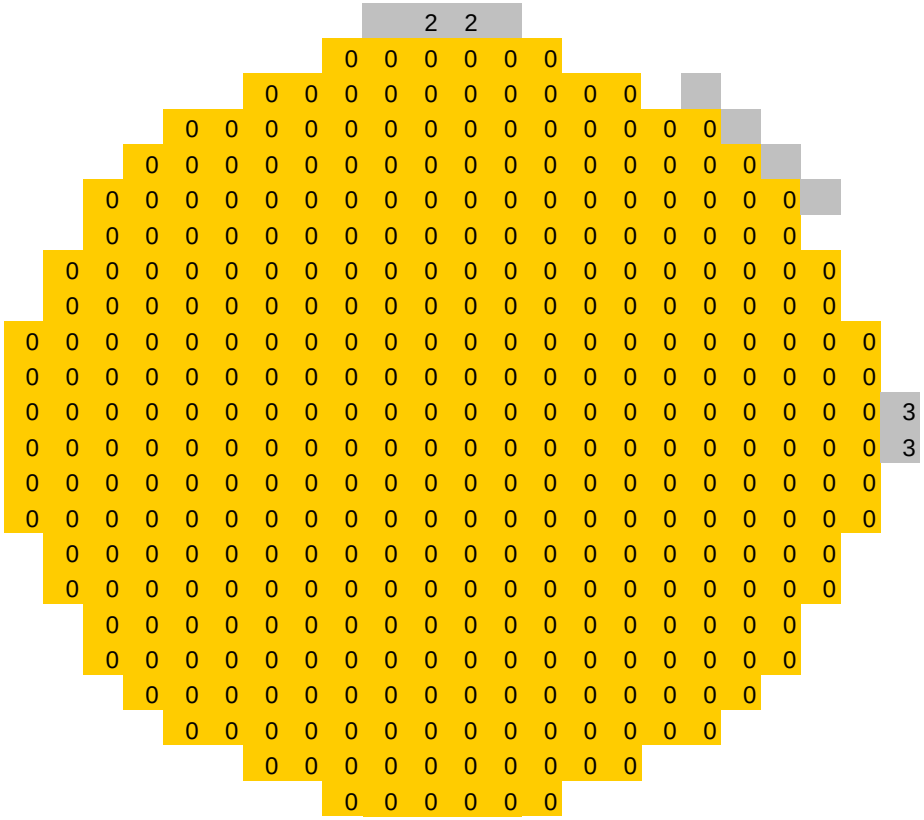
CASO 5A



Corrente in	A	1.47212E-02
Corrente out	A	-1.47198E-02
Differenza	A	1.41669E-06
"	%	9.62350E-03
Corrente media	A	1.47205E-02
Impedenza	ohm	1.35865E+04

Somma dei gradi di "pieno"elementari	84
Numero di elementi	376
Grado di "pieno" medio	0.223404255
Grado di vuoto medio	0.776595745

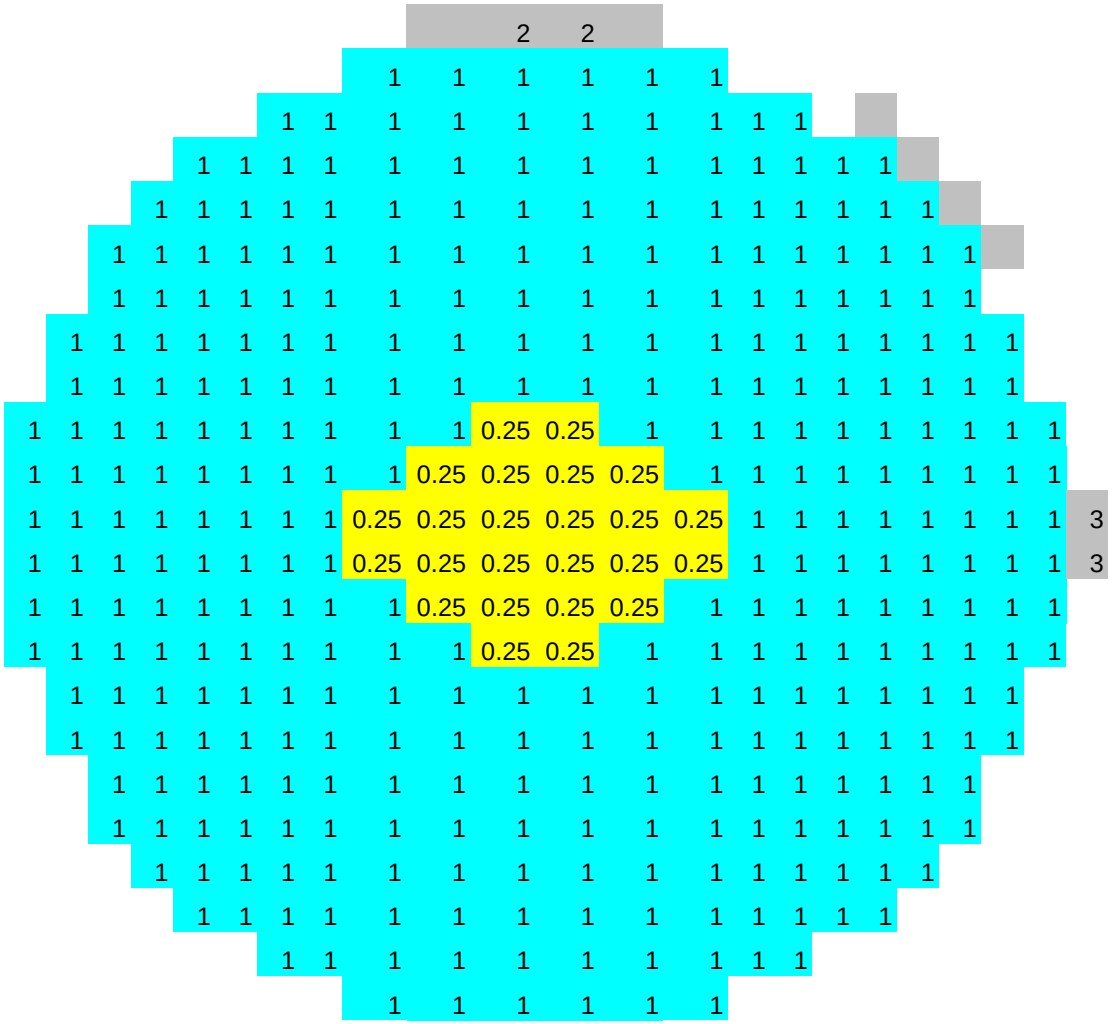
CASO 6A



Corrente in	A	1.27534E-03
Corrente out	A	-1.27490E-03
Differenza	A	4.45248E-07
"	%	3.49121E-02
Corrente media	A	1.27512E-03
Impedenza	ohm	1.56848E+05

Somma dei gradi di "pieno"elementari	0
Numero di elementi	376
Grado di "pieno" medio	0

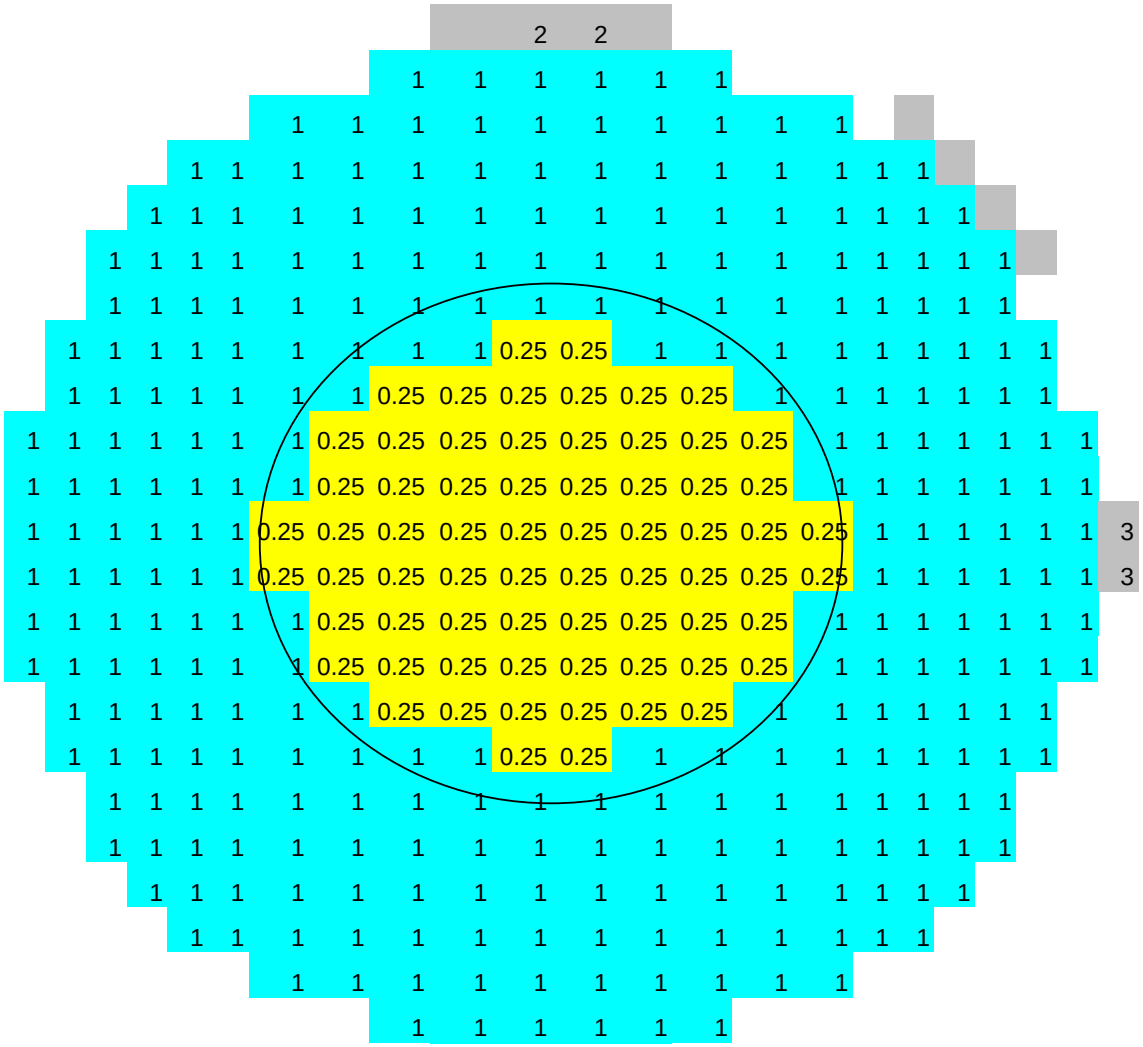
CASO 7A



Corrente in	A	3.72771E-02
Corrente out	A	-3.72568E-02
Differenza	A	2.03317E-05
"	%	5.45422E-02
Corrente media	A	3.72670E-02
Impedenza	ohm	5.36668E+03

Somma dei gradi di "pieno"elementari	358
Numero di elementi	376
Grado di "pieno" medio	0.95212766
Grado di vuoto medio	0.04787234

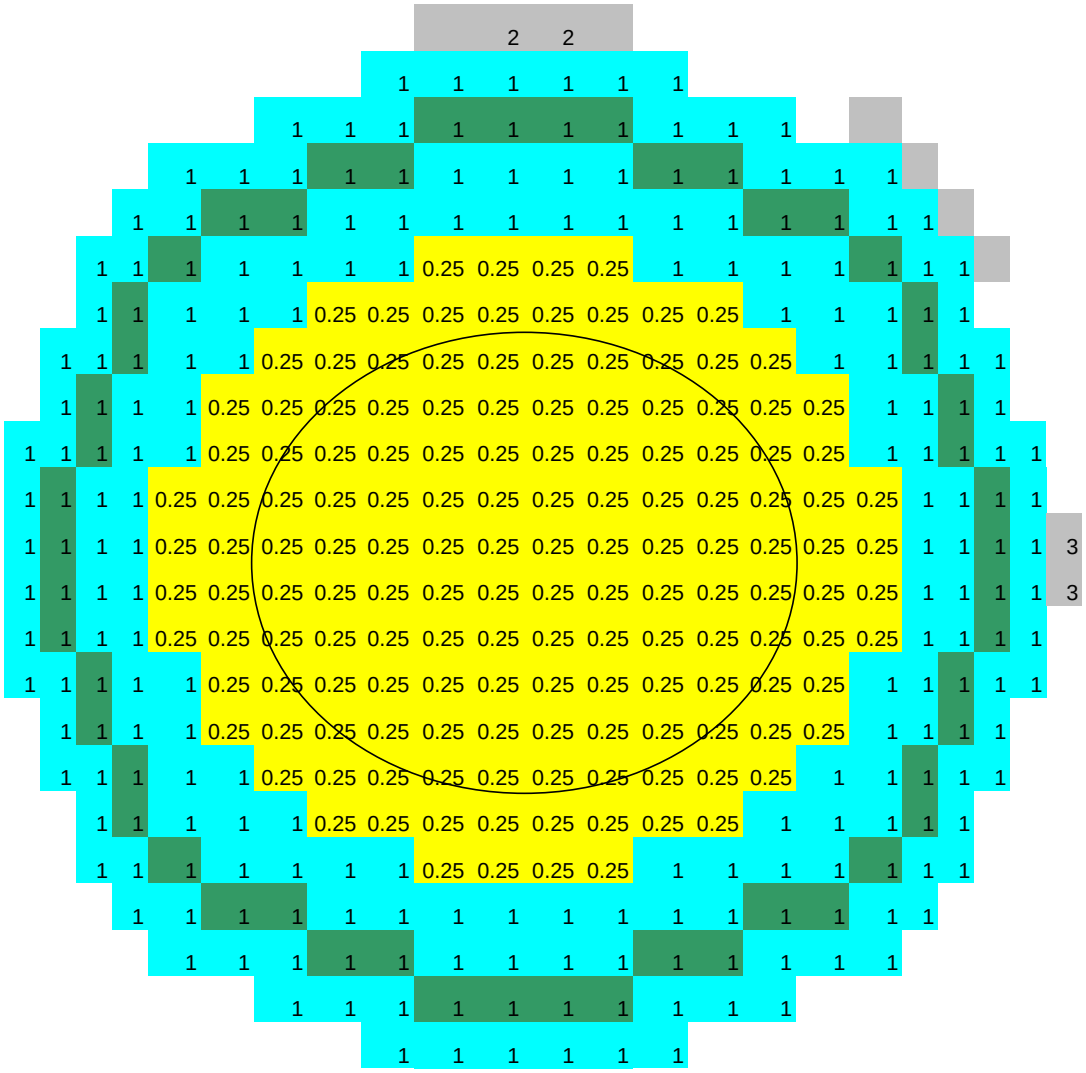
CASO 8A



Corrente in	A	3.37916E-02
Corrente out	A	-3.37717E-02
Differenza	A	1.99153E-05
"	%	5.89355E-02
Corrente media	A	3.37817E-02
Impedenza	ohm	5.92037E+03

Somma dei gradi di "pieno"elementari	325
Numero di elementi	376
Grado di "pieno" medio	0.864361702
Grado di vuoto medio	0.135638298

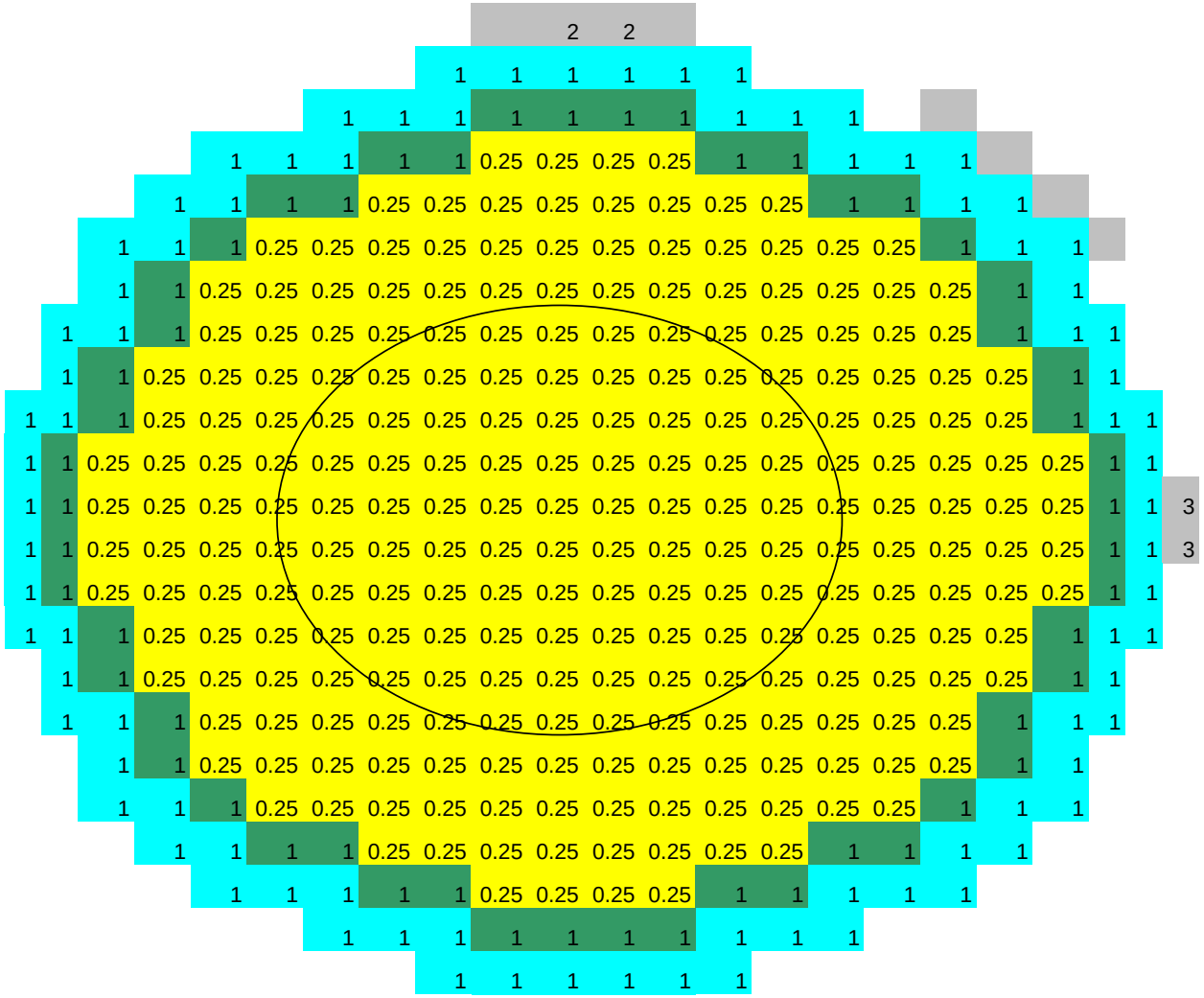
CASO 9A



Corrente in	A	2.59217E-02
Corrente out	A	-2.59160E-02
Differenza	A	5.76197E-06
"	%	2.22283E-02
Corrente media	A	2.59188E-02
Impedenza	ohm	7.71640E+03

Somma dei gradi di "pieno"elementari	265
Numero di elementi	376
Grado di "pieno" medio	0.704787234
Grado di vuoto medio	0.295212766

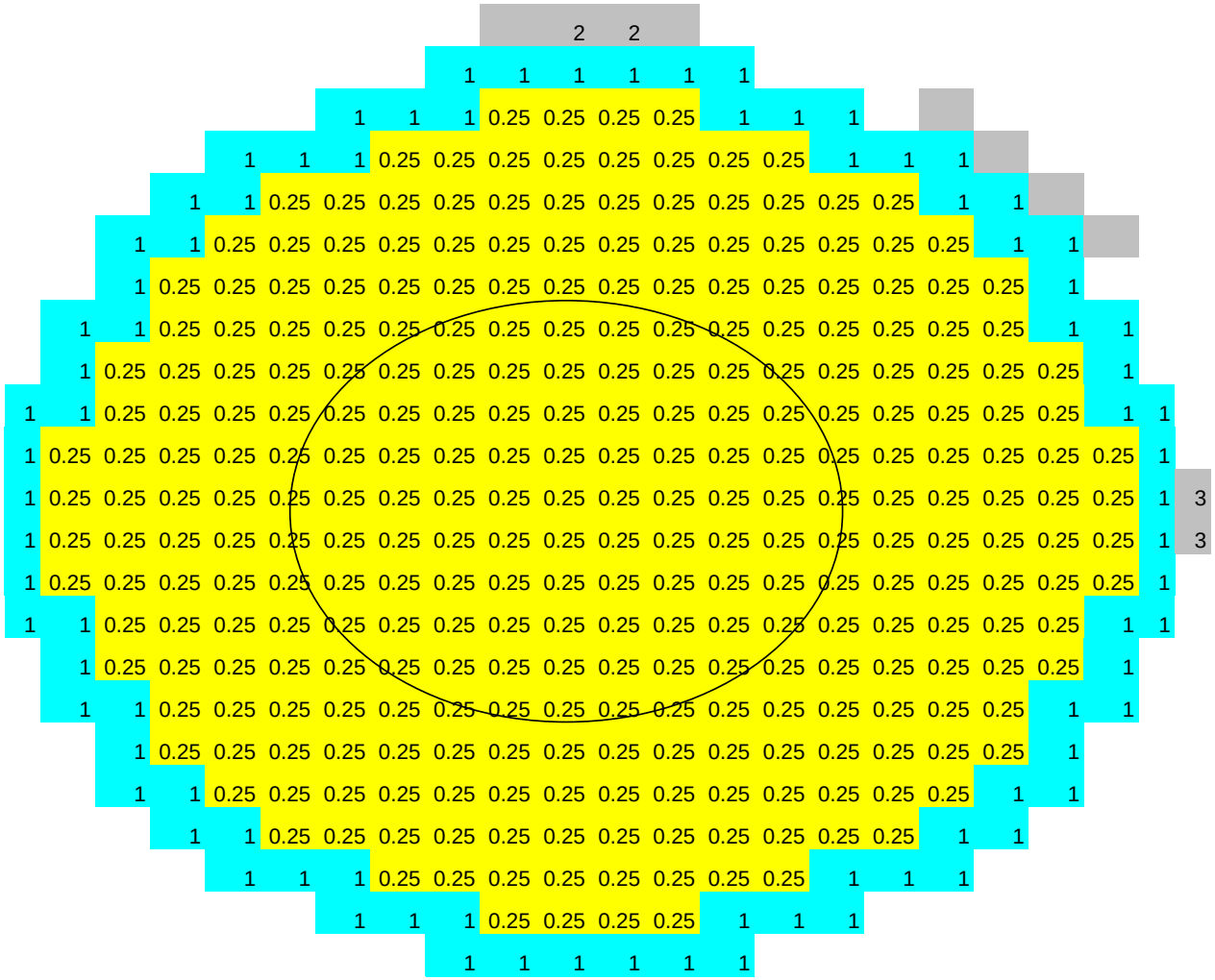
CASO 10A



Corrente in	A	1.47959E-02
Corrente out	A	-1.47959E-02
Differenza	A	-9.04306E-09
"	%	-6.11187E-05
Corrente media	A	1.47959E-02
Impedenza	ohm	1.35173E+04

Somma dei gradi di "pieno"elementari	196
Numero di elementi	376
Grado di "pieno" medio	0.521276596
Grado di vuoto medio	0.478723404

CASO 11A



Corrente in	A	8.33184E-03
Corrente out	A	-8.33203E-03
Differenza	A	-1.83150E-07
"	%	-2.19819E-03
Corrente media	A	8.33194E-03
Impedenza	ohm	2.40040E+04

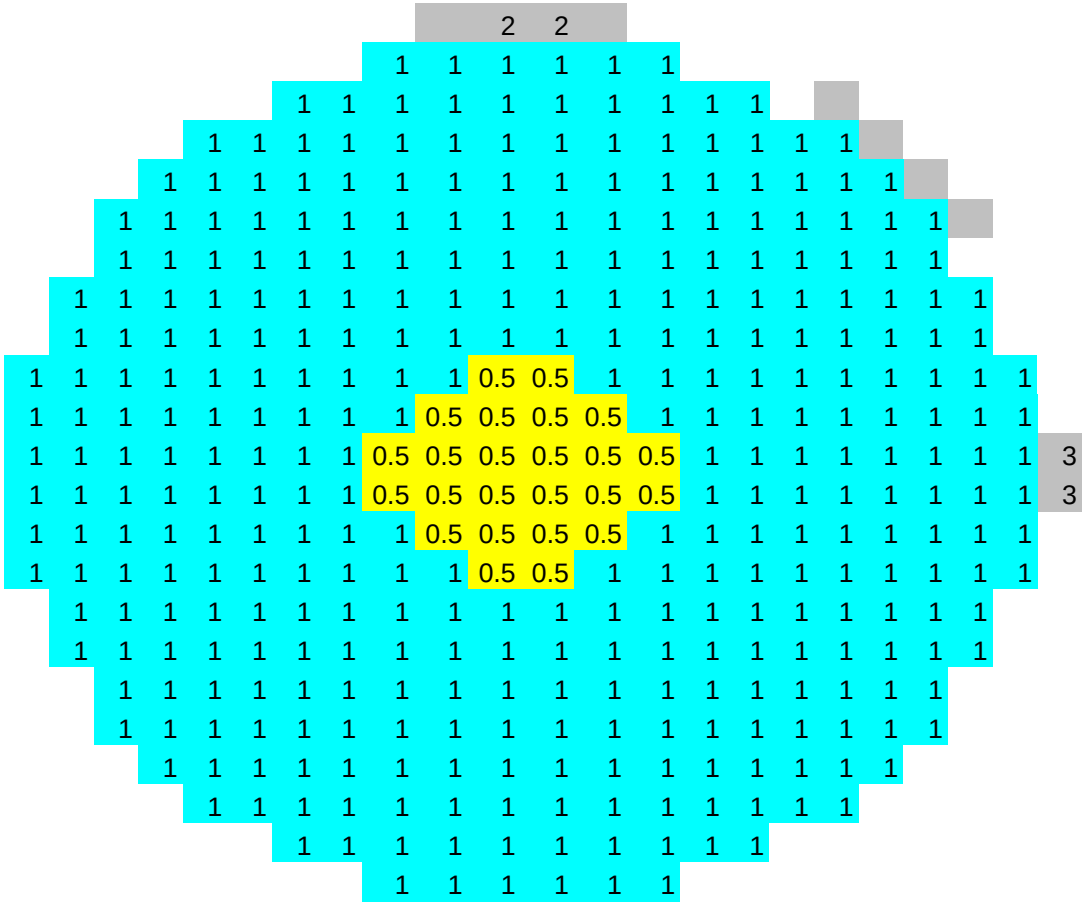
Somma dei gradi di "pieno"elementari	157
Numero di elementi	376
Grado di "pieno" medio	0.417553191
Grado di vuoto medio	0.582446809

CASO 12A

Corrente in	A	1.57478E-03
Corrente out	A	-1.57452E-03
Differenza	A	2.54245E-07
"	%	1.61448E-02
Corrente media	A	1.57465E-03
Impedenza	ohm	1.27012E+05

Somma dei gradi di "pieno"elementari	94
Numero di elementi	376
Grado di "pieno" medio	0.25
Grado di vuoto medio	0.75

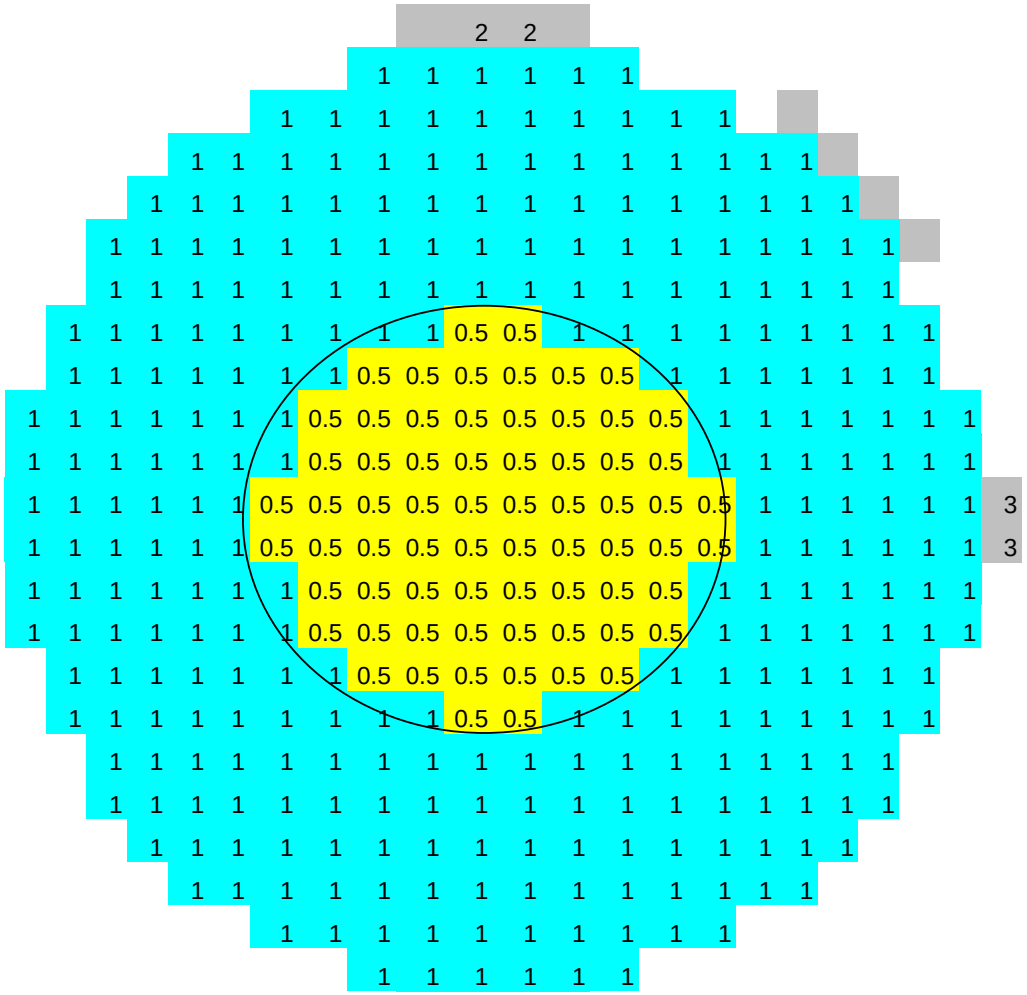
CASO 13A



Corrente in	A	3.73271E-02
Corrente out	A	-3.73149E-02
Differenza	A	1.21773E-05
"	%	3.26232E-02
Corrente media	A	3.73210E-02
Impedenza	ohm	5.35892E+03

Somma dei gradi di "pieno"elementari	364
Numero di elementi	376
Grado di "pieno" medio	0.968085106
Grado di vuoto medio	0.031914894

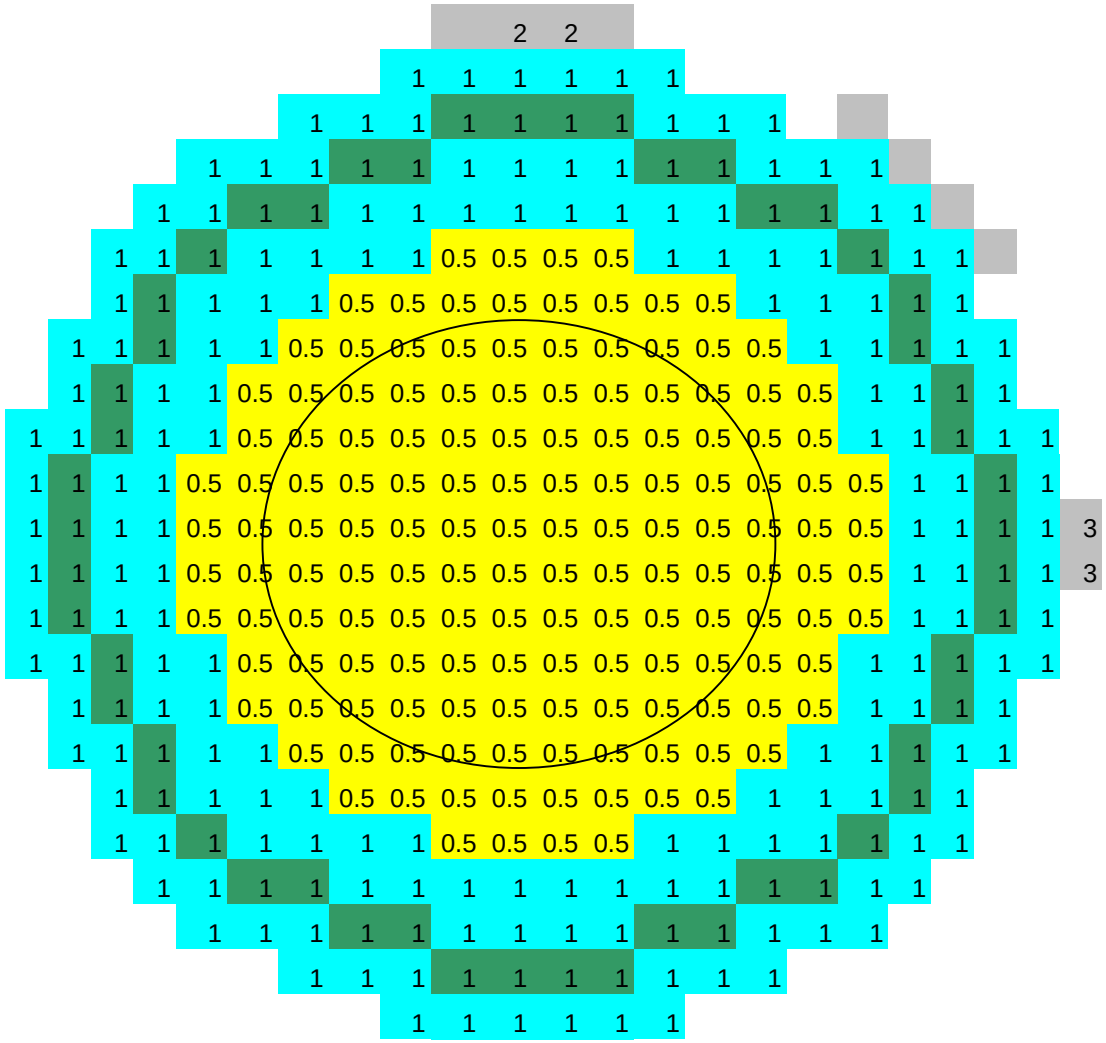
CASO 14A



Corrente in	A	3.39685E-02
Corrente out	A	-3.39516E-02
Differenza	A	1.68369E-05
"	%	4.95663E-02
Corrente media	A	3.39600E-02
Impedenza	ohm	5.88928E+03

Somma dei gradi di "pieno"elementari	342
Numero di elementi	376
Grado di "pieno" medio	0.909574468
Grado di vuoto medio	0.090425532

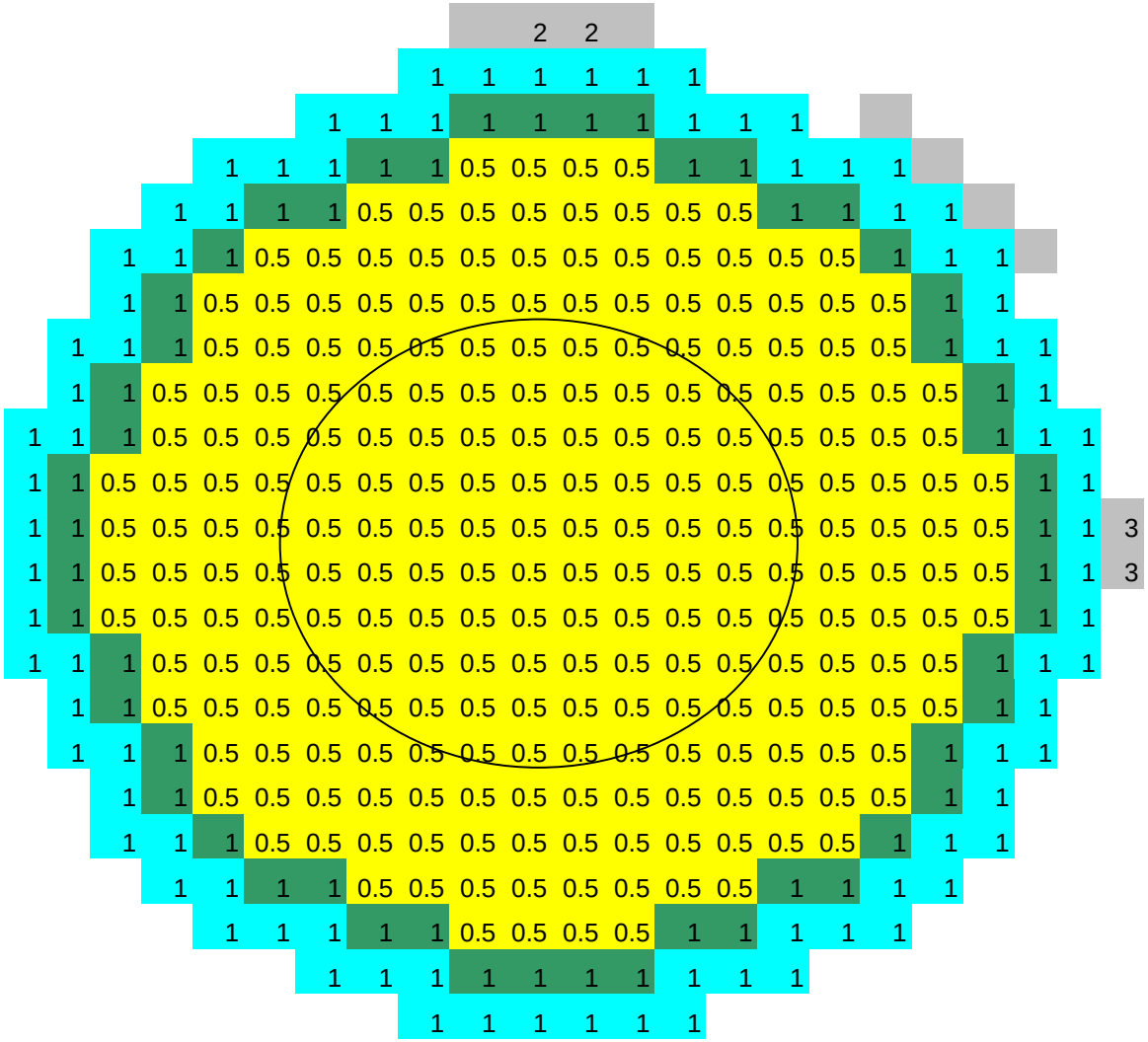
CASO 15A



Corrente in	A	2.63520E-02
Corrente out	A	-2.63497E-02
Differenza	A	2.21900E-06
"	%	8.42063E-03
Corrente media	A	2.63508E-02
Impedenza	ohm	7.58989E+03

Somma dei gradi di "pieno"elementari	302
Numero di elementi	376
Grado di "pieno" medio	0.803191489
Grado di vuoto medio	0.196808511

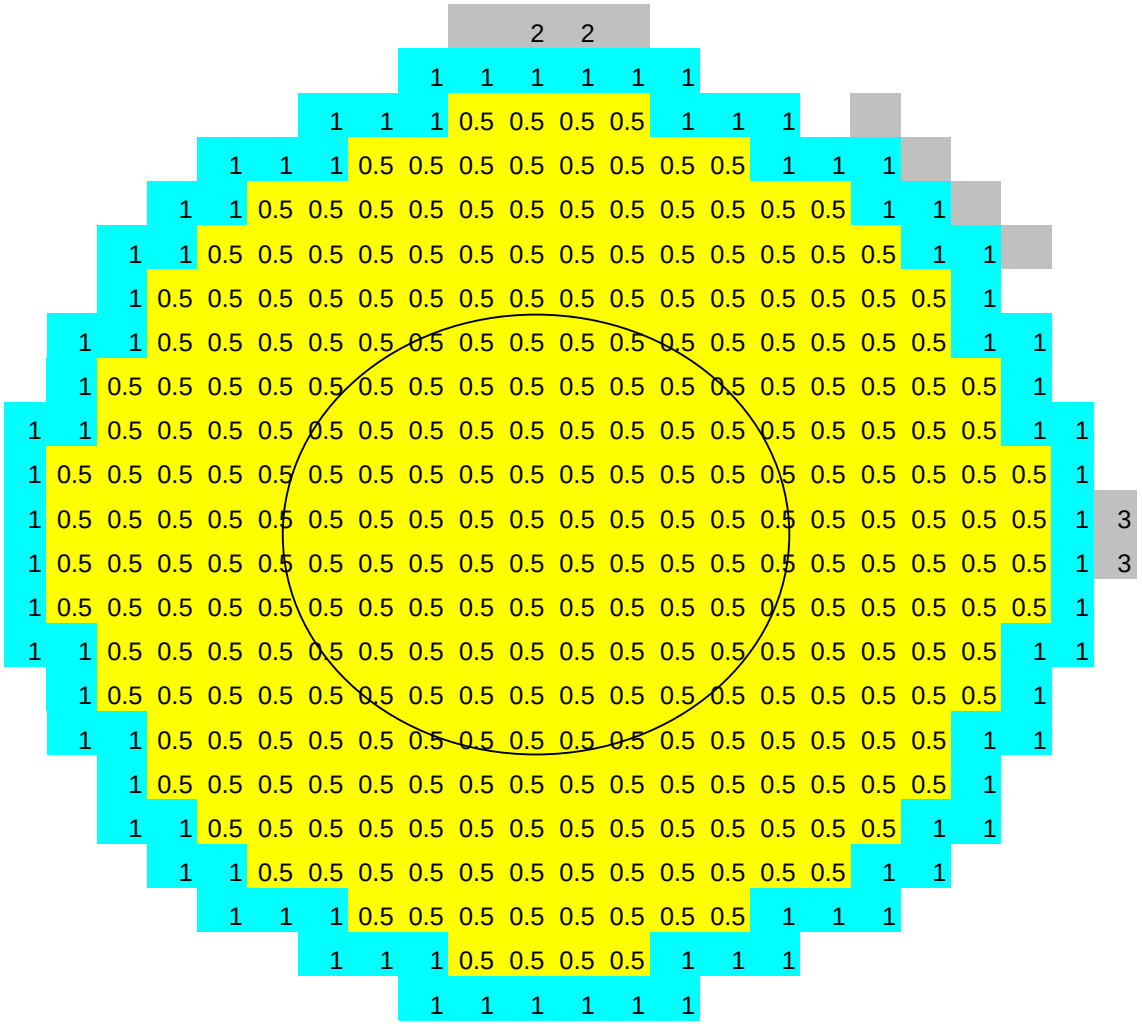
CASO 16A



Corrente in	A	1.55288E-02
Corrente out	A	-1.55290E-02
Differenza	A	-2.09695E-07
"	%	-1.35036E-03
Corrente media	A	1.55289E-02
Impedenza	ohm	1.28792E+04

Somma dei gradi di "pieno"elementari	256
Numero di elementi	376
Grado di "pieno" medio	0.680851064
Grado di vuoto medio	0.319148936

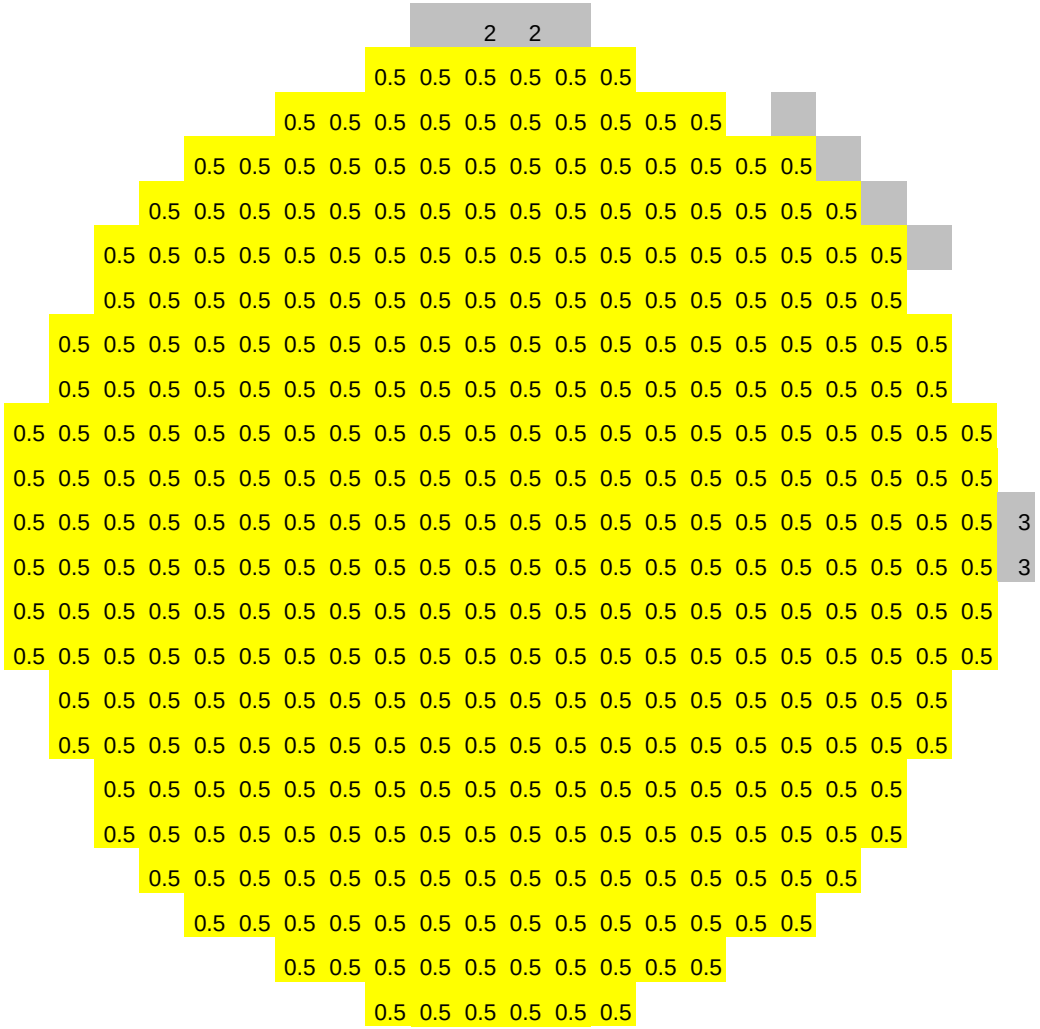
CASO 17A



Corrente in	A	9.14087E-03
Corrente out	A	-9.14089E-03
Differenza	A	-1.88687E-08
"	%	-2.06422E-04
Corrente media	A	9.14088E-03
Impedenza	ohm	2.18797E+04

Somma dei gradi di "pieno"elementari	230
Numero di elementi	376
Grado di "pieno" medio	0.611702128
Grado di vuoto medio	0.388297872

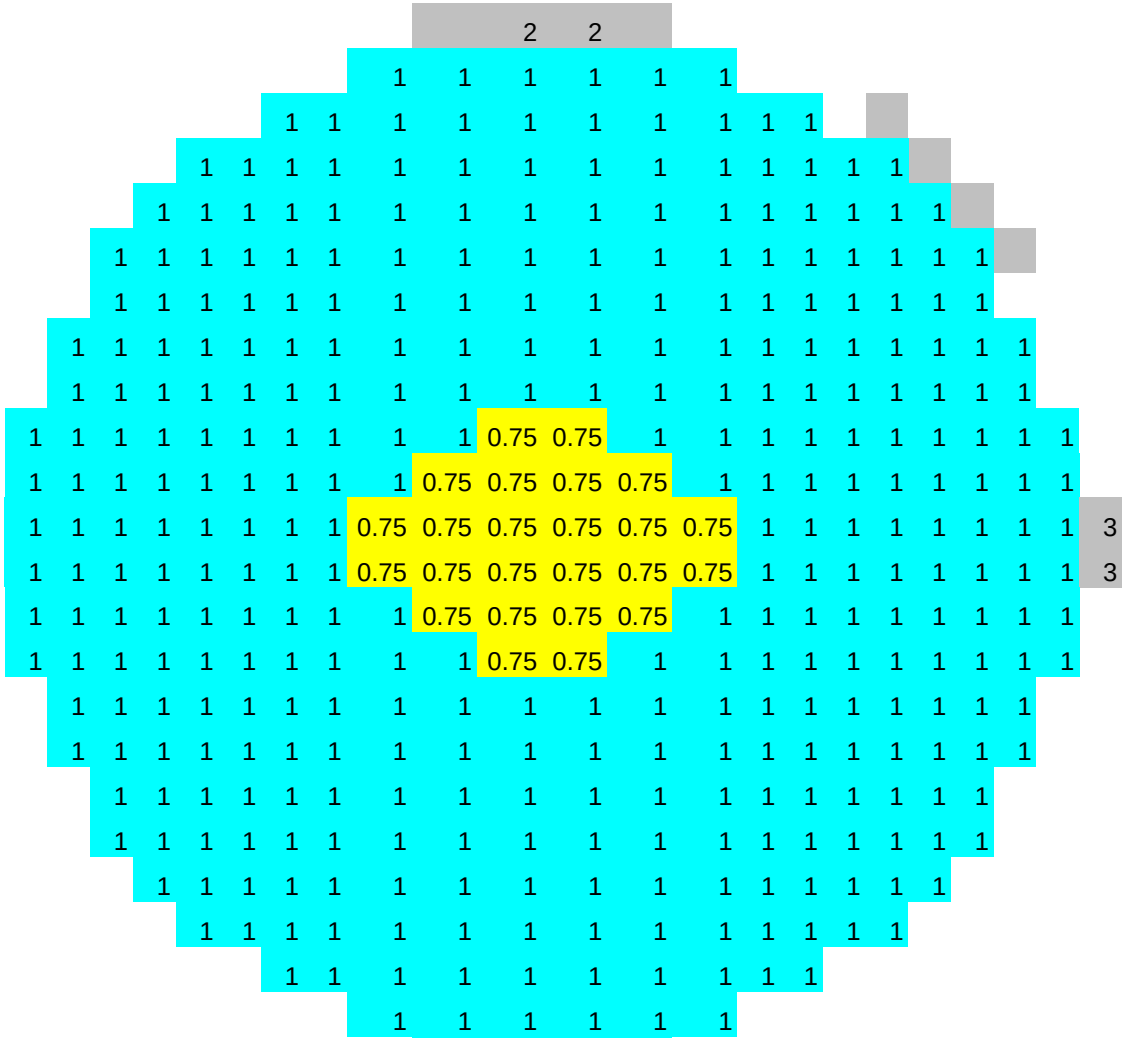
CASO 18A



Corrente in	A	2.15024E-03
Corrente out	A	-2.14971E-03
Differenza	A	5.36899E-07
"	%	2.49692E-02
Corrente media	A	2.14997E-03
Impedenza	ohm	9.30244E+04

Somma dei gradi di "pieno"elementari	188
Numero di elementi	376
Grado di "pieno" medio	0.5
Grado di vuoto medio	0.5

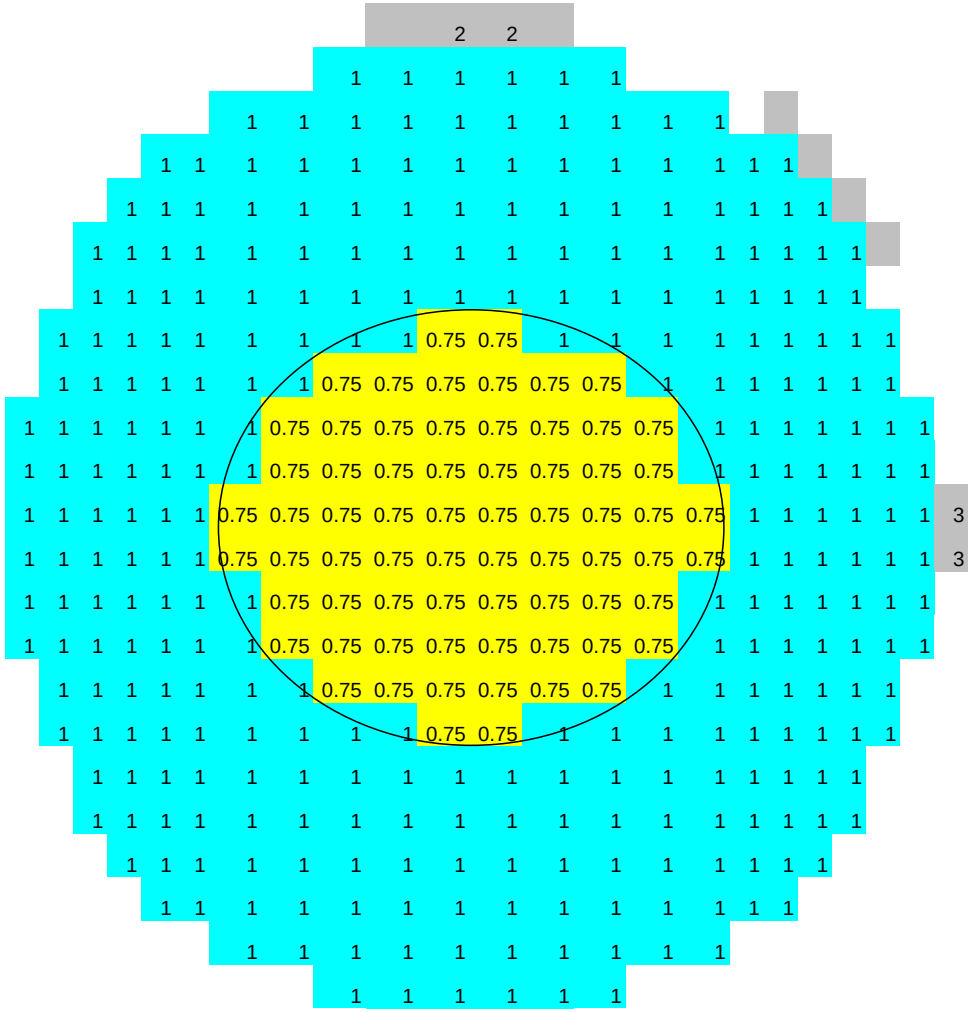
CASO 19A



Corrente in	A	3.74886E-02
Corrente out	A	-3.74732E-02
Differenza	A	1.54335E-05
"	%	4.11684E-02
Corrente media	A	3.74809E-02
Impedenza	ohm	5.33605E+03

Somma dei gradi di "pieno"elementari	370
Numero di elementi	376
Grado di "pieno" medio	0.984042553
Grado di vuoto medio	0.015957447

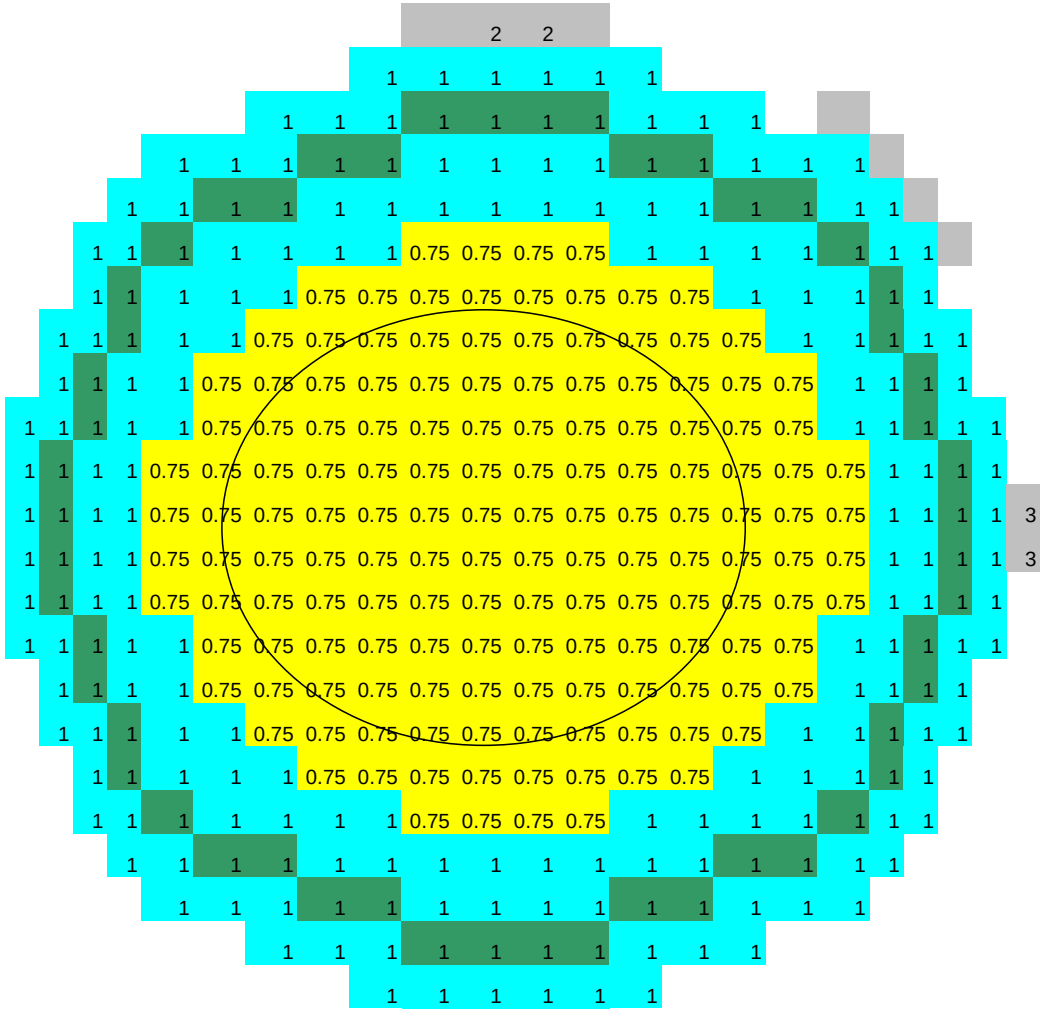
CASO 20A



Corrente in	A	3.44497E-02
Corrente out	A	-3.44283E-02
Differenza	A	2.14107E-05
"	%	6.21507E-02
Corrente media	A	3.44390E-02
Impedenza	ohm	5.80737E+03

Somma dei gradi di "pieno"elementari	359
Numero di elementi	376
Grado di "pieno" medio	0.954787234
Grado di vuoto medio	0.045212766

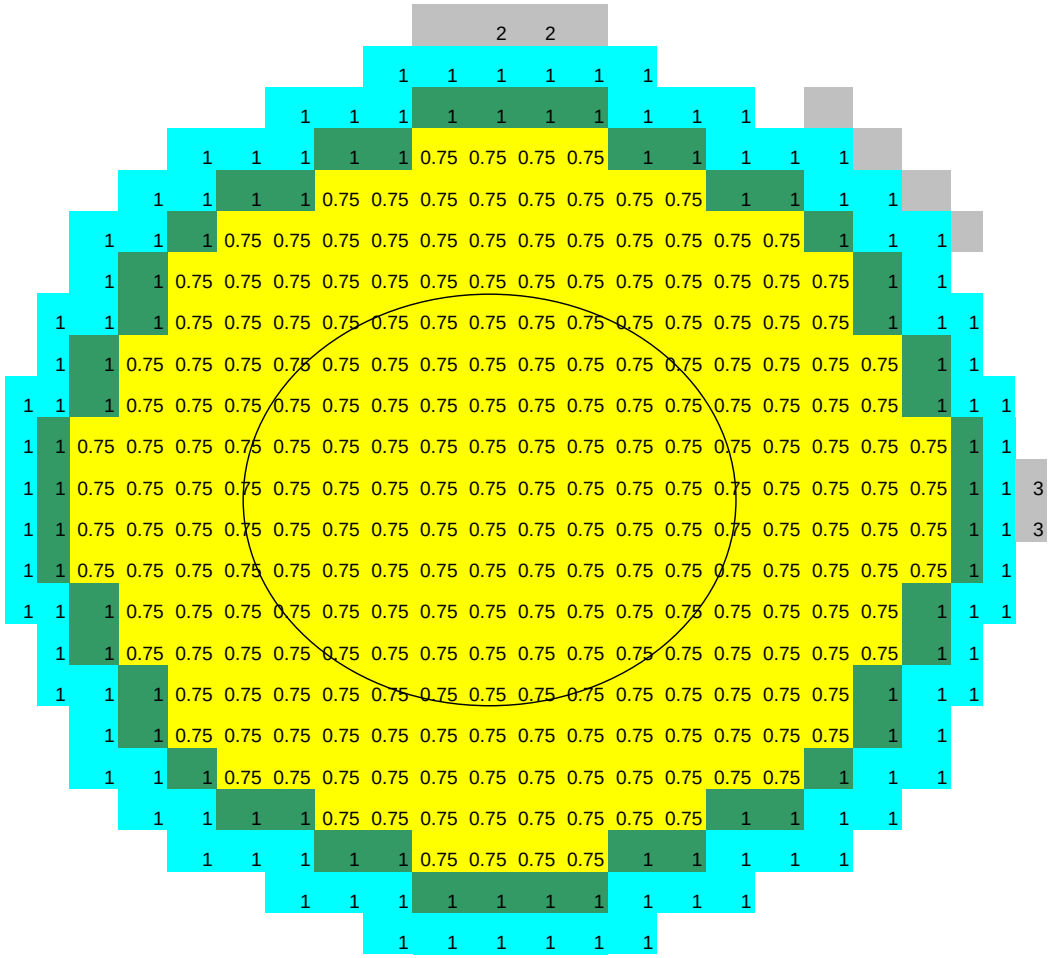
CASO 21A



Corrente in	A	2.74934E-02
Corrente out	A	-2.74897E-02
Differenza	A	3.69717E-06
"	%	1.34475E-02
Corrente media	A	2.74916E-02
Impedenza	ohm	7.27495E+03

Somma dei gradi di "pieno"elementari	339
Numero di elementi	376
Grado di "pieno" medio	0.901595745
Grado di vuoto medio	0.098404255

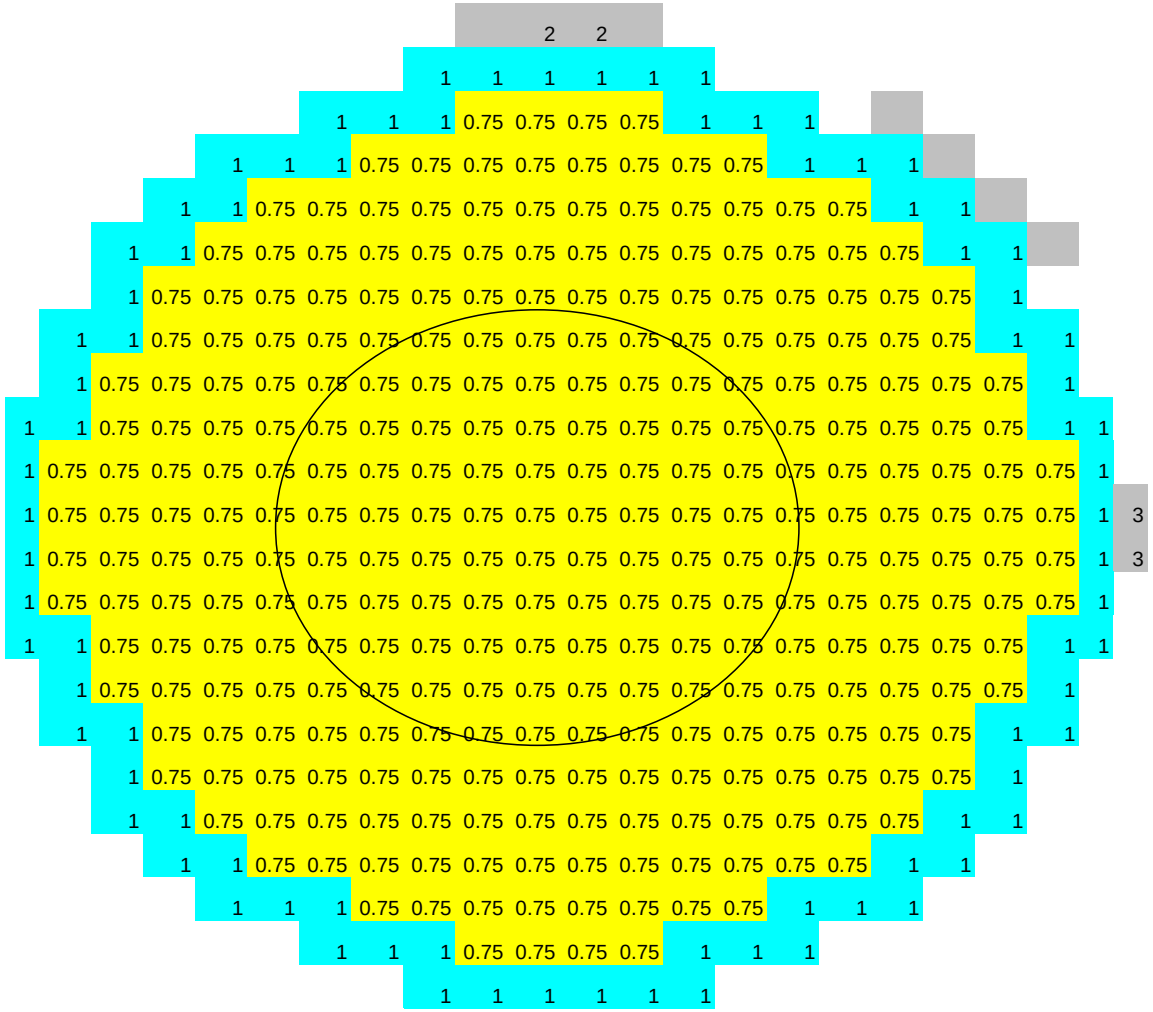
CASO 22A



Corrente in	A	1.74550E-02	
Corrente out	A	-1.74544E-02	
Differenza	A	6.28655E-07	
"	%	3.60157E-03	
Corrente media	A	1.74547E-02	
Impedenza	ohm	1.14582E+04	0.159574468

Somma dei gradi di "pieno"elementari	316
Numero di elementi	376
Grado di "pieno" medio	0.840425532
Grado di vuoto medio	0.159574468

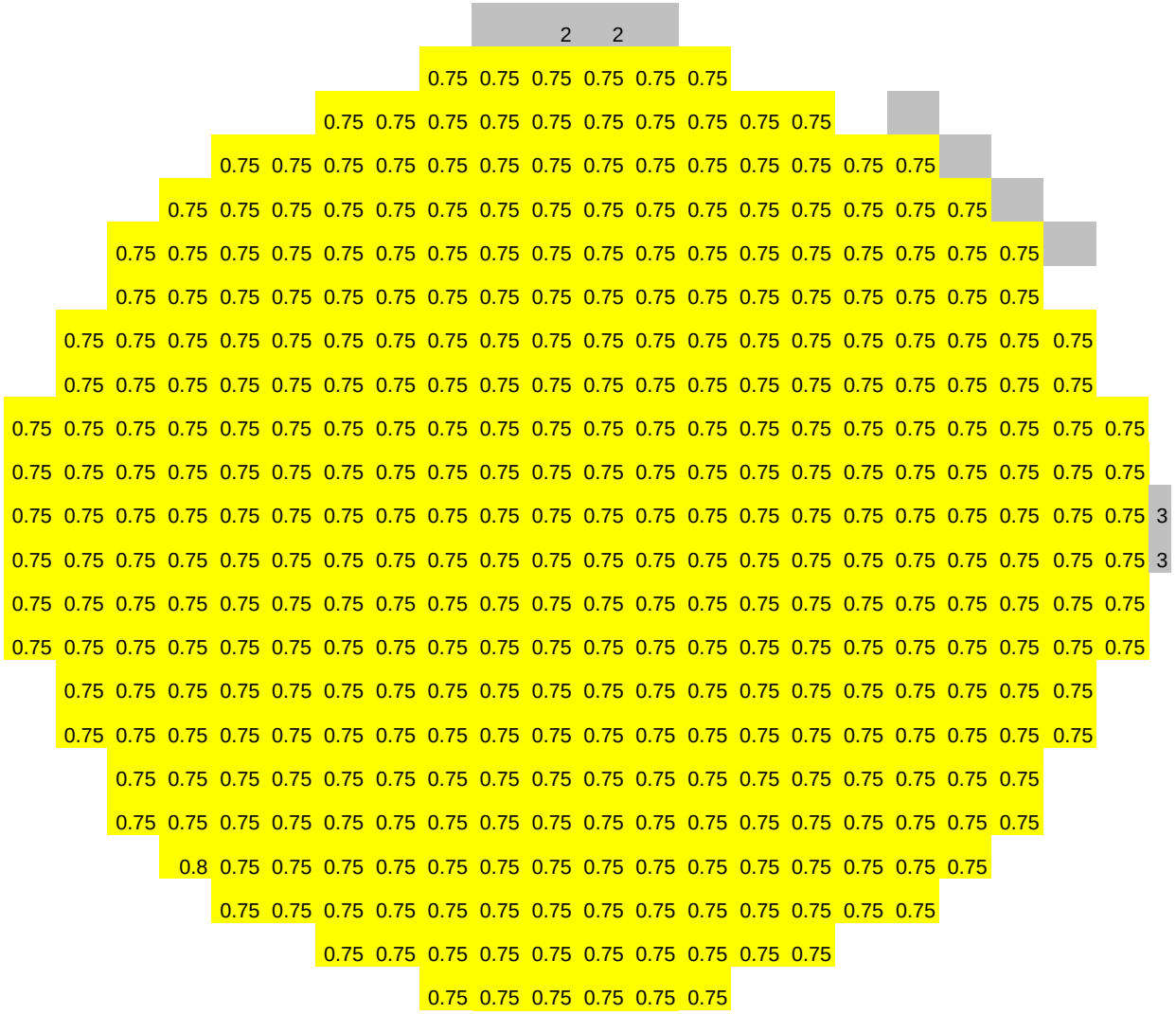
CASO 23A



Corrente in	A	1.12694E-02
Corrente out	A	-1.12688E-02
Differenza	A	6.11548E-07
"	%	5.42661E-03
Corrente media	A	1.12691E-02
Impedenza	ohm	1.77476E+04

Somma dei gradi di "pieno"elementari	303
Numero di elementi	376
Grado di "pieno" medio	0.805851064
Grado di vuoto medio	0.194148936

CASO 24A



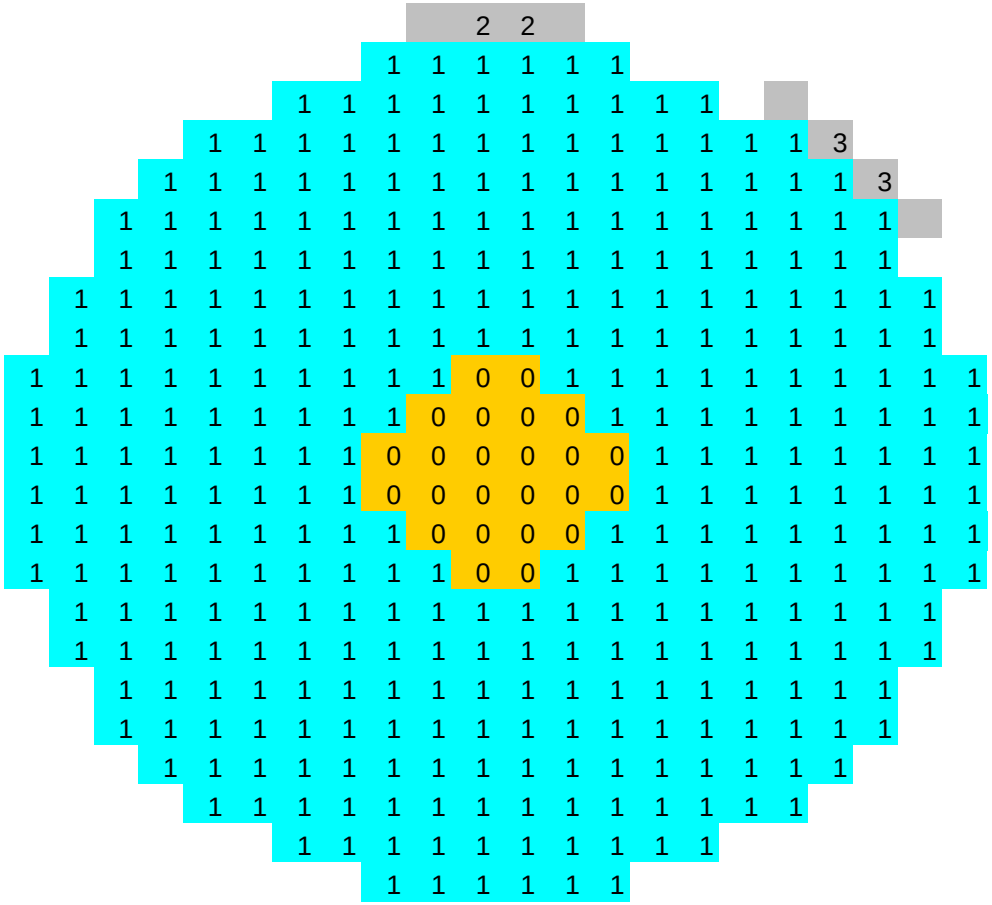
Corrente in	A	3.75114E-03
Corrente out	A	-3.74976E-03
Differenza	A	1.37697E-06
"	%	3.67079E-02
Corrente media	A	3.75045E-03
Impedenza	ohm	5.33269E+04

Somma dei gradi di "pieno"elementari	282
Numero di elementi	376
Grado di "pieno" medio	0.75
Grado di vuoto medio	0.25

CASO B:

Elettrodi a 45°

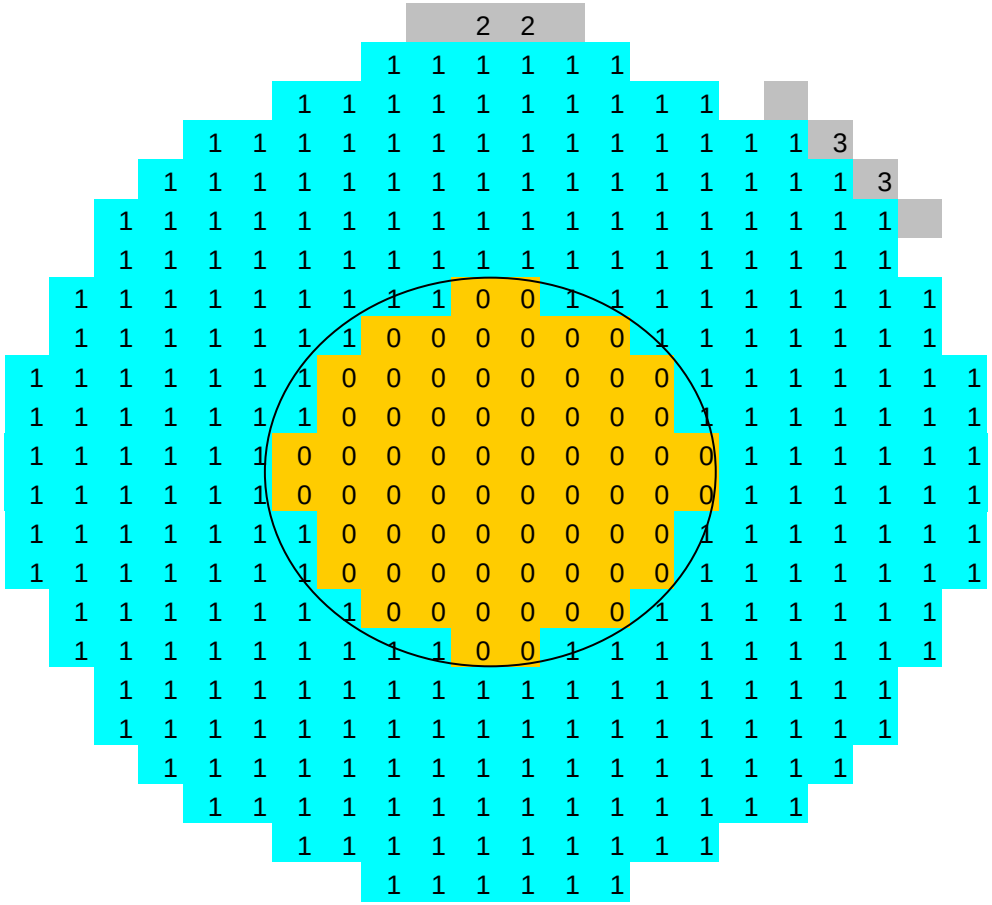
CASO 1B



Corrente in	A	5.05470E-02
Corrente out	A	-5.05489E-02
Differenza	A	-1.90911E-06
"	%	-3.77691E-03
Corrente media	A	5.05479E-02
Impedenza	ohm	3.95664E+03

Somma dei gradi di "pieno"elementari	352
Numero di elementi	376
Grado di "pieno" medio	0.936170213
Grado di vuoto medio	0.063829787

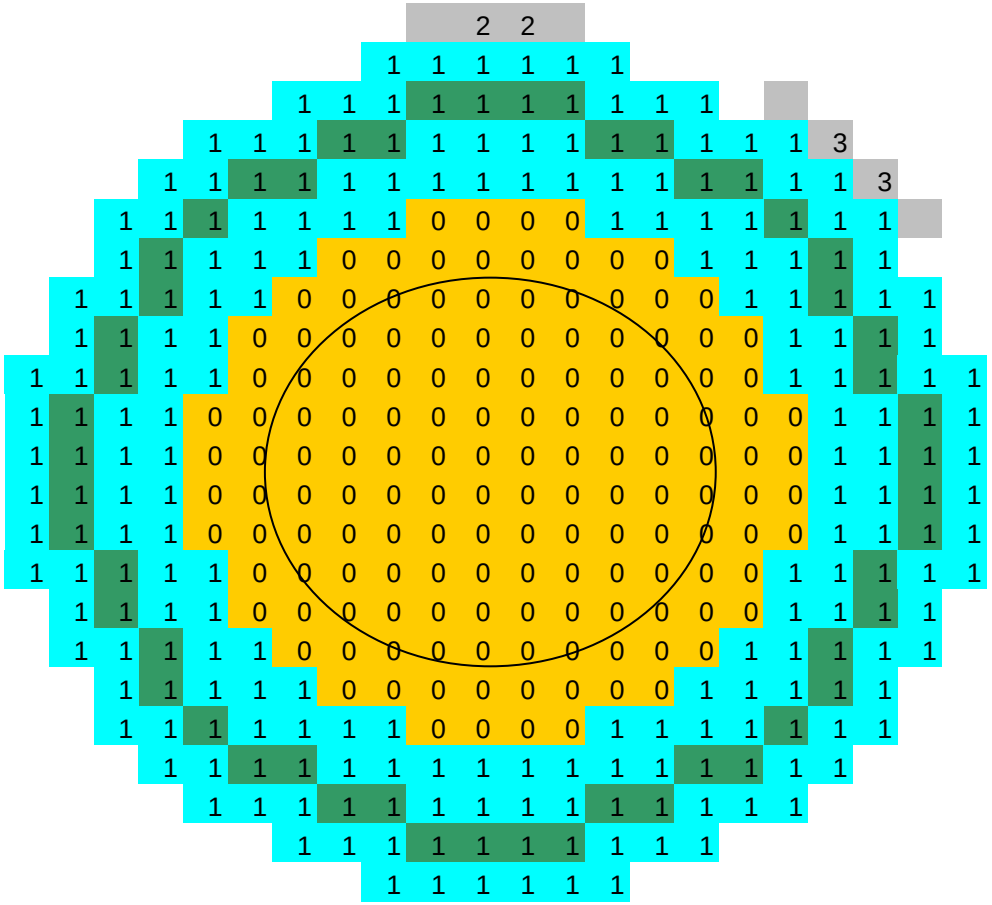
CASO 2B



Corrente in	A	4.82137E-02
Corrente out	A	-4.82154E-02
Differenza	A	-1.62560E-06
"	%	-3.37165E-03
Corrente media	A	4.82146E-02
Impedenza	ohm	4.14812E+03

Somma dei gradi di "pieno"elementari	308
Numero di elementi	376
Grado di "pieno" medio	0.819148936
Grado di vuoto medio	0.180851064

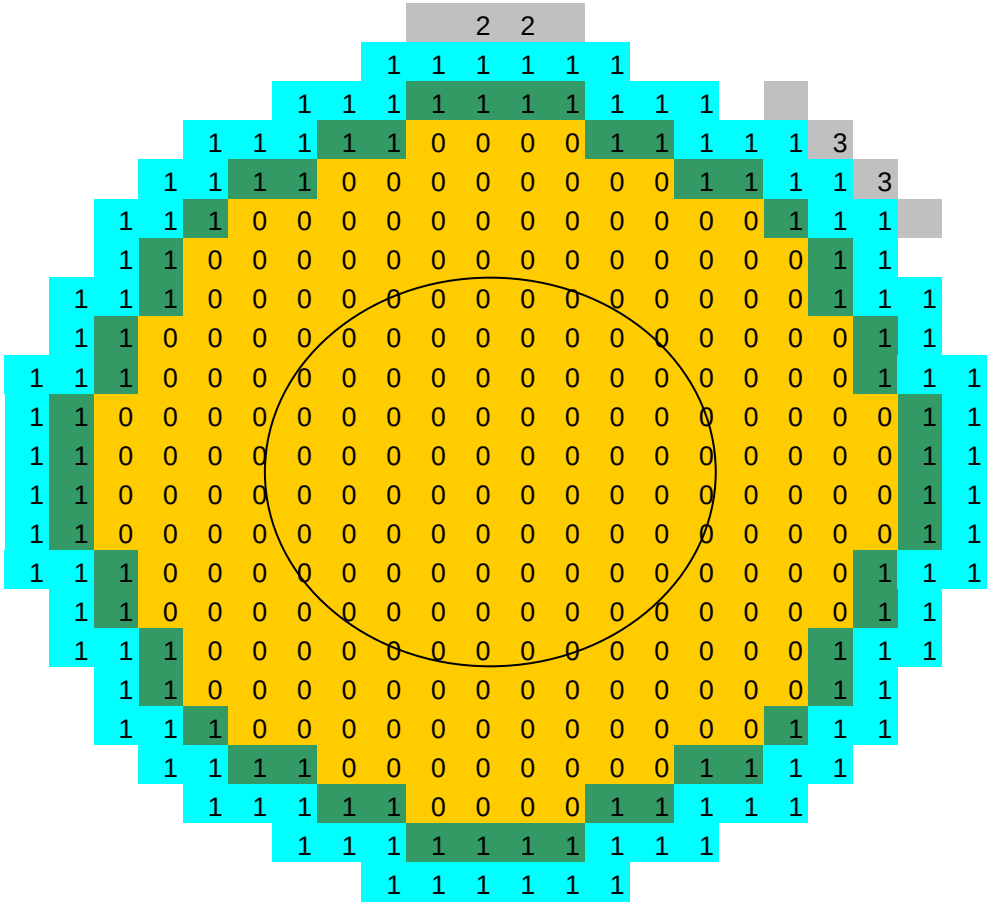
CASO 3B



Corrente in	A	4.08479E-02
Corrente out	A	-4.08488E-02
Differenza	A	-9.16726E-07
"	%	-2.24424E-03
Corrente media	A	4.08484E-02
Impedenza	ohm	4.89615E+03

Somma dei gradi di "pieno"elementari	228
Numero di elementi	376
Grado di "pieno" medio	0.606382979
Grado di vuoto medio	0.393617021

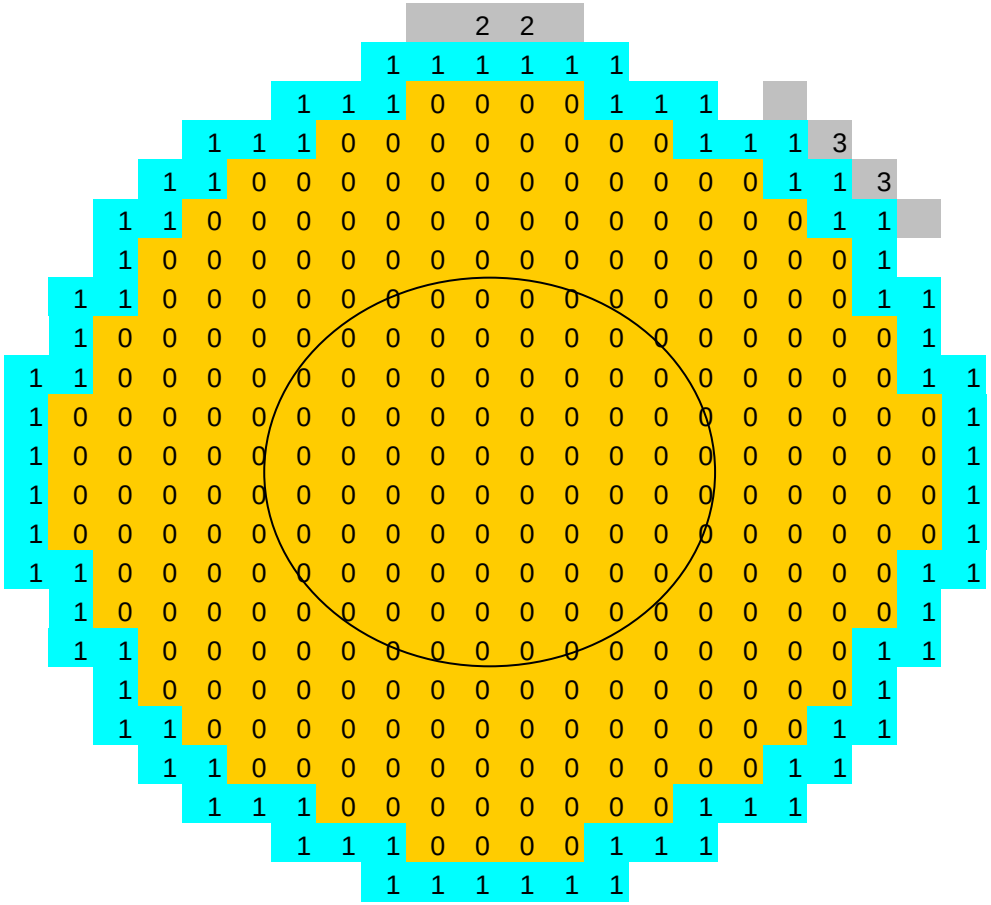
CASO 4B



Corrente in	A	2.58844E-02
Corrente out	A	-2.58847E-02
Differenza	A	-3.18300E-07
"	%	-1.22970E-03
Corrente media	A	2.58846E-02
Impedenza	ohm	7.72661E+03

Somma dei gradi di "pieno"elementari	136
Numero di elementi	376
Grado di "pieno" medio	0.361702128
Grado di vuoto medio	0.638297872

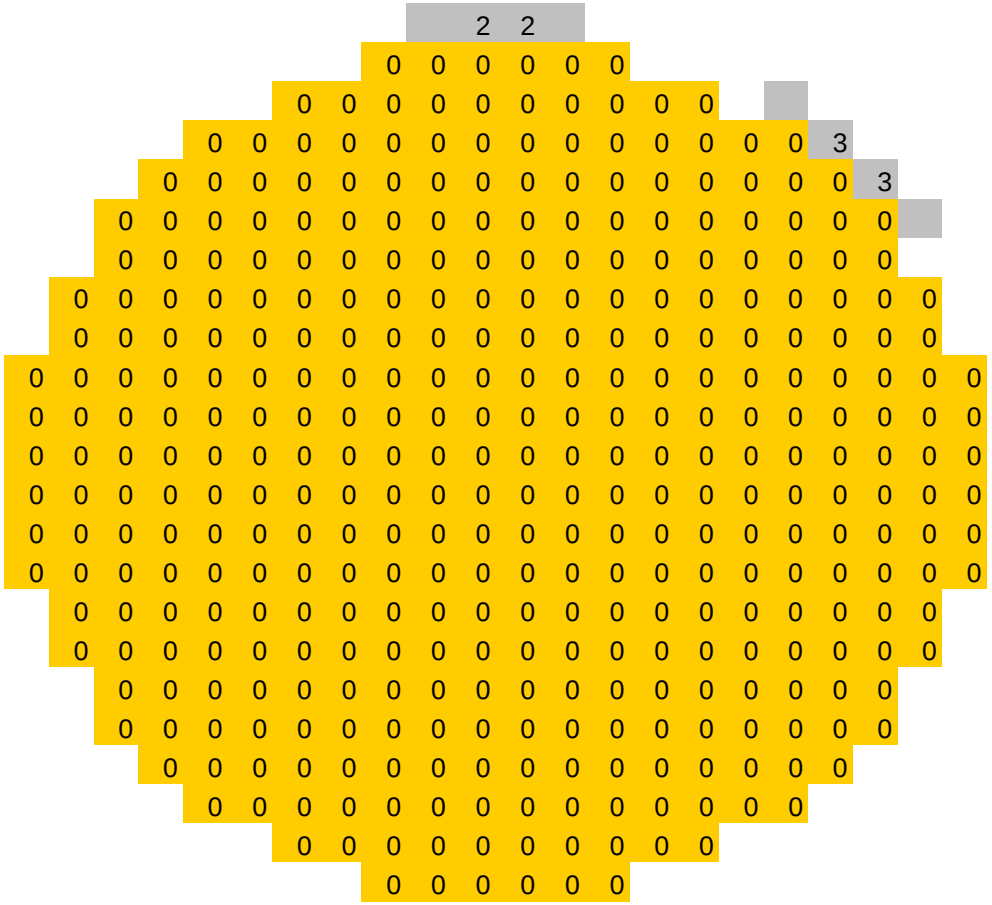
CASO 5B



Corrente in	A	1.47171E-02
Corrente out	A	-1.47174E-02
Differenza	A	-3.12638E-07
"	%	-2.12432E-03
Corrente media	A	1.47172E-02
Impedenza	ohm	1.35895E+04

Somma dei gradi di "pieno"elementari	84
Numero di elementi	376
Grado di "pieno" medio	0.223404255
Grado di vuoto medio	0.776595745

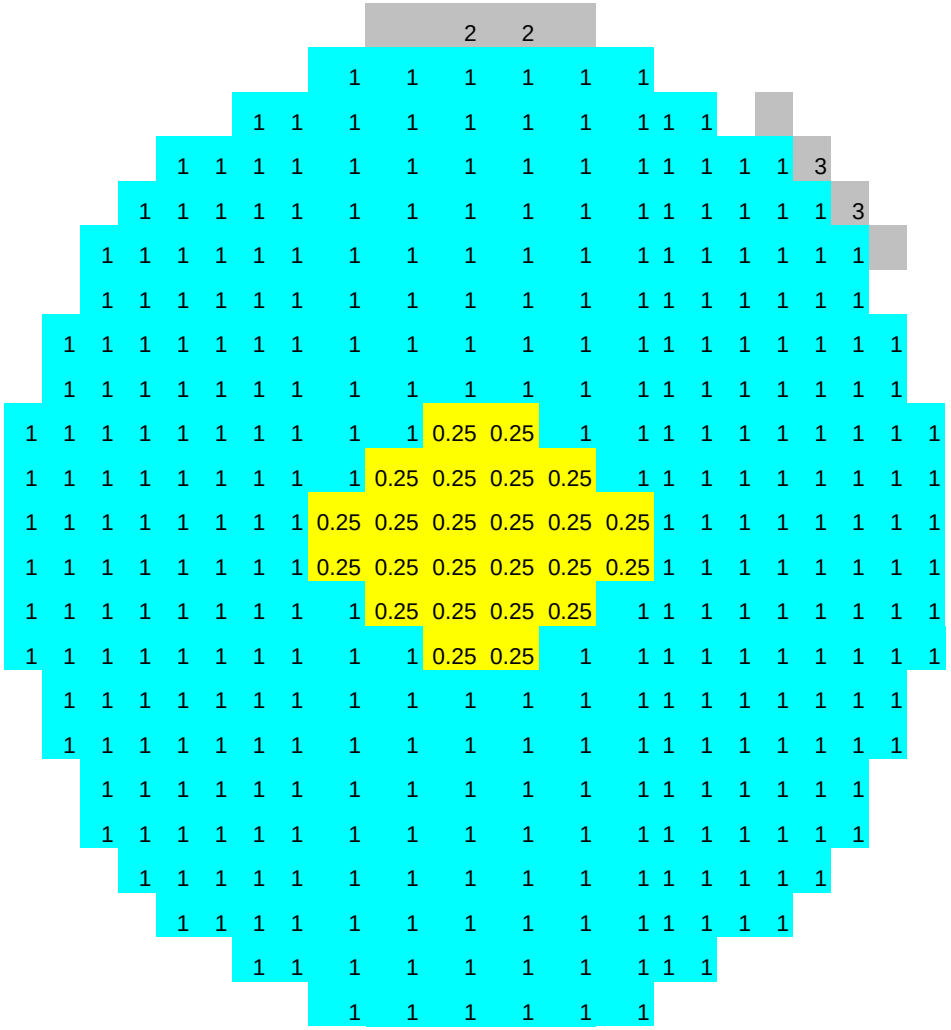
CASO 6B



Corrente in	A	1.74785E-03
Corrente out	A	-1.74789E-03
Differenza	A	-4.44396E-08
"	%	-2.54253E-03
Corrente media	A	1.74787E-03
Impedenza	ohm	1.14425E+05

Somma dei gradi di "pieno"elementari	0
Numero di elementi	376
Grado di "pieno" medio	0

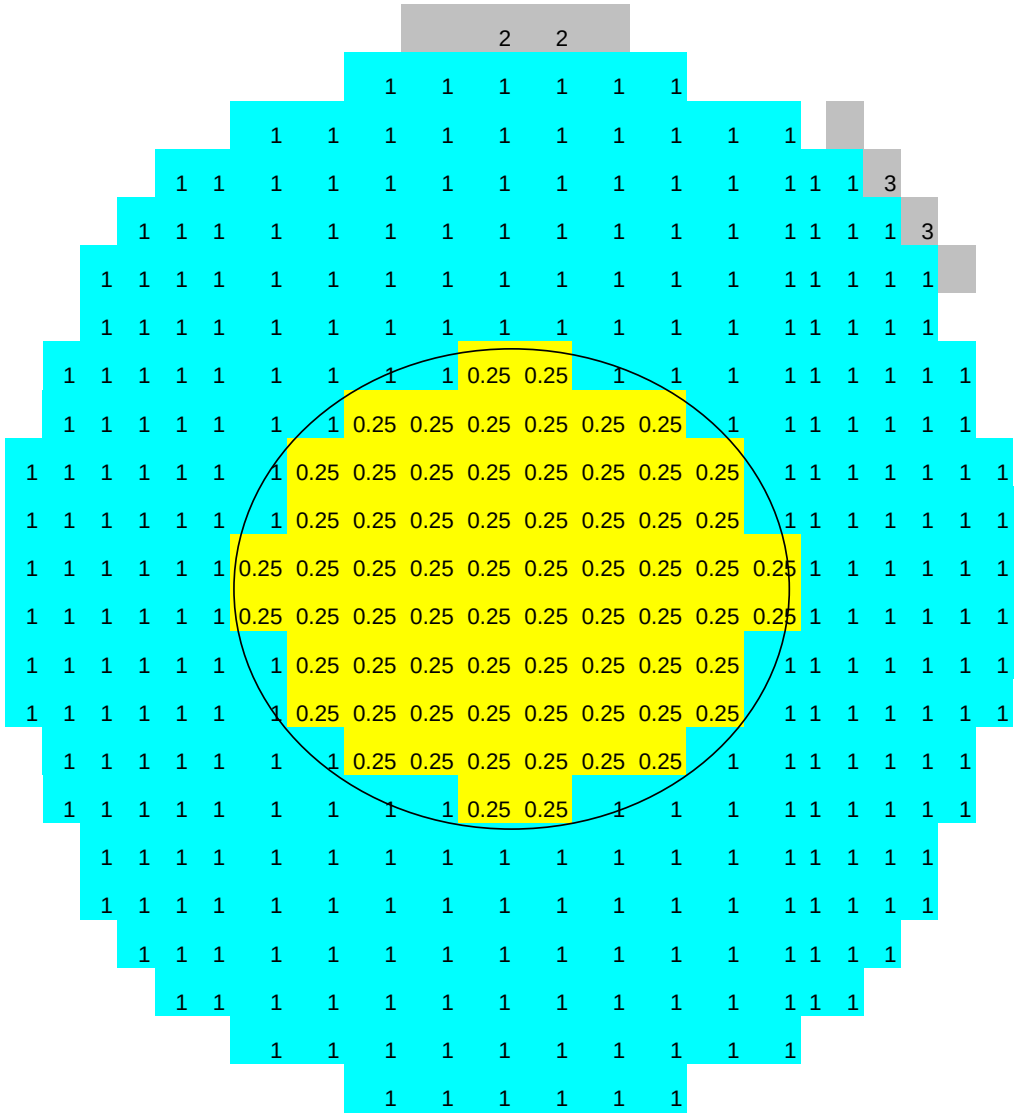
CASO 7B



Corrente in	A	5.05664E-02
Corrente out	A	-5.05665E-02
Differenza	A	-7.54636E-08
"	%	-1.49237E-04
Corrente media	A	5.05664E-02
Impedenza	ohm	3.95519E+03

Somma dei gradi di "pieno"elementari	358
Numero di elementi	376
Grado di "pieno" medio	0.95212766
Grado di vuoto medio	0.04787234

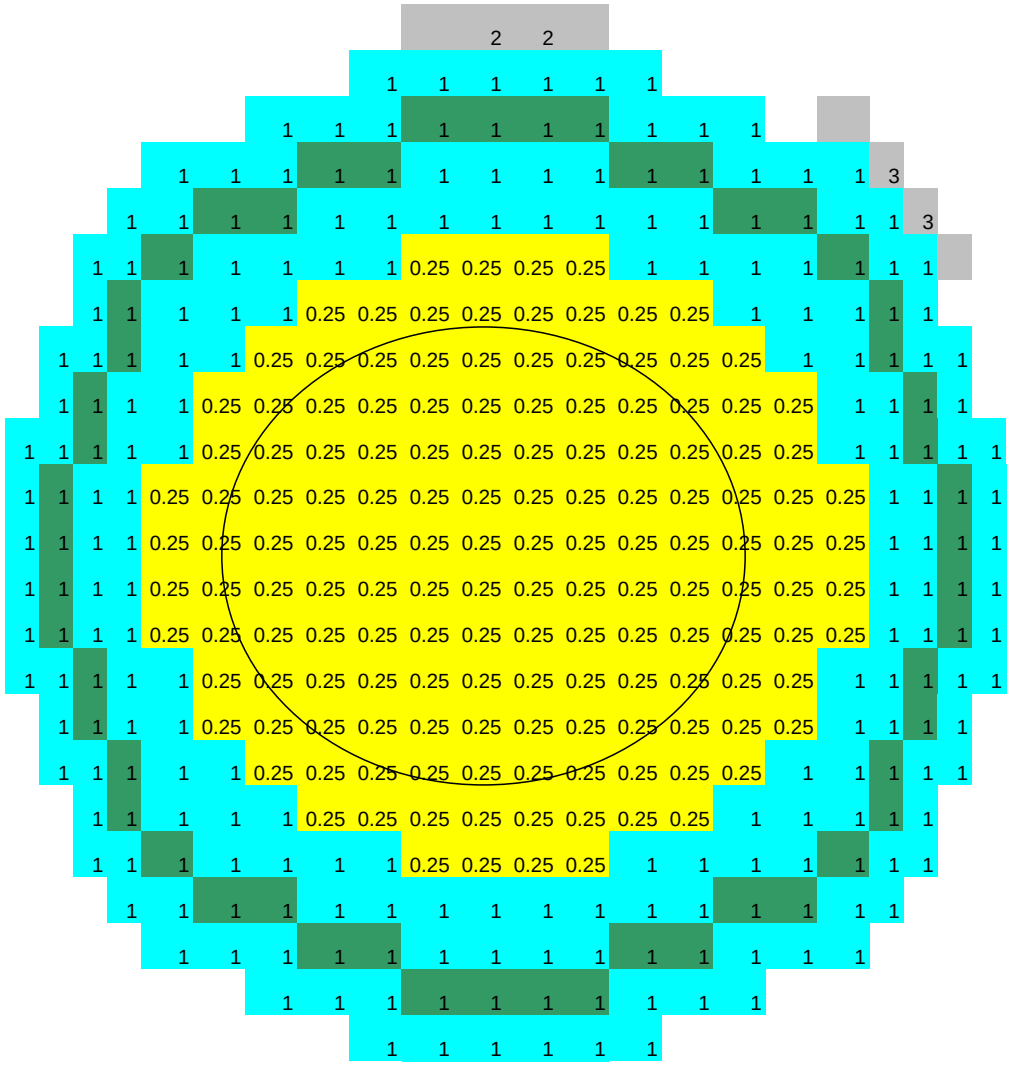
CASO 8B



Corrente in	A	4.82805E-02
Corrente out	A	-4.82808E-02
Differenza	A	-2.92231E-07
"	%	-6.05277E-04
Corrente media	A	4.82806E-02
Impedenza	ohm	4.14245E+03

Somma dei gradi di "pieno"elementari	325
Numero di elementi	376
Grado di "pieno" medio	0.864361702
Grado di vuoto medio	0.135638298

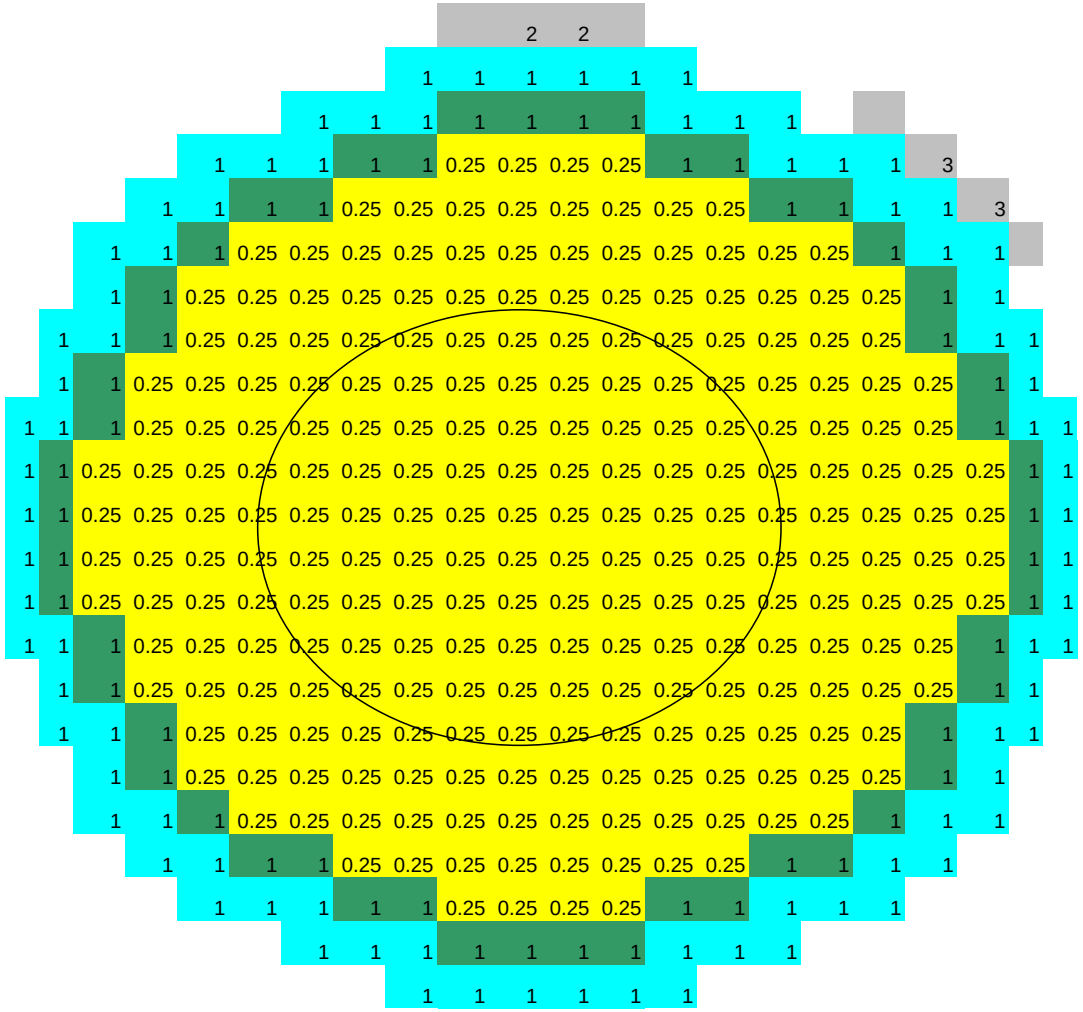
CASO 9B



Corrente in	A	4.10569E-02
Corrente out	A	-4.10569E-02
Differenza	A	-3.50833E-08
"	%	-8.54505E-05
Corrente media	A	4.10569E-02
Impedenza	ohm	4.87129E+03

Somma dei gradi di "pieno"elementari	265
Numero di elementi	376
Grado di "pieno" medio	0.704787234
Grado di vuoto medio	0.295212766

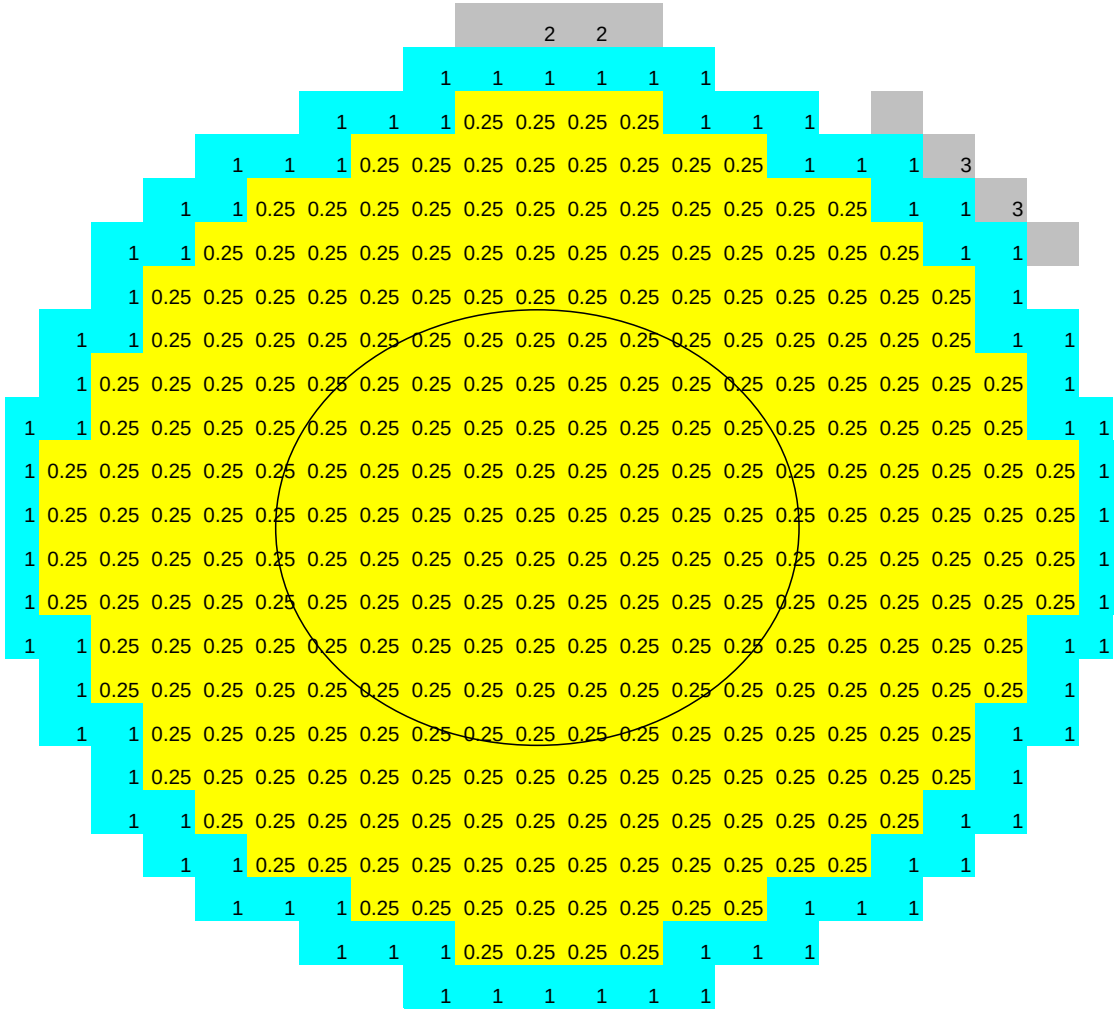
CASO 10B



Corrente in	A	2.63393E-02
Corrente out	A	-2.63319E-02
Differenza	A	7.40551E-06
"	%	2.81158E-02
Corrente media	A	2.63356E-02
Impedenza	ohm	7.59429E+03

Somma dei gradi di "pieno"elementari	196
Numero di elementi	376
Grado di "pieno" medio	0.521276596
Grado di vuoto medio	0.478723404

CASO 11B



Corrente in	A	1.52690E-02
Corrente out	A	-1.52691E-02
Differenza	A	-4.57871E-08
"	%	-2.99869E-04
Corrente media	A	1.52690E-02
Impedenza	ohm	1.30984E+04

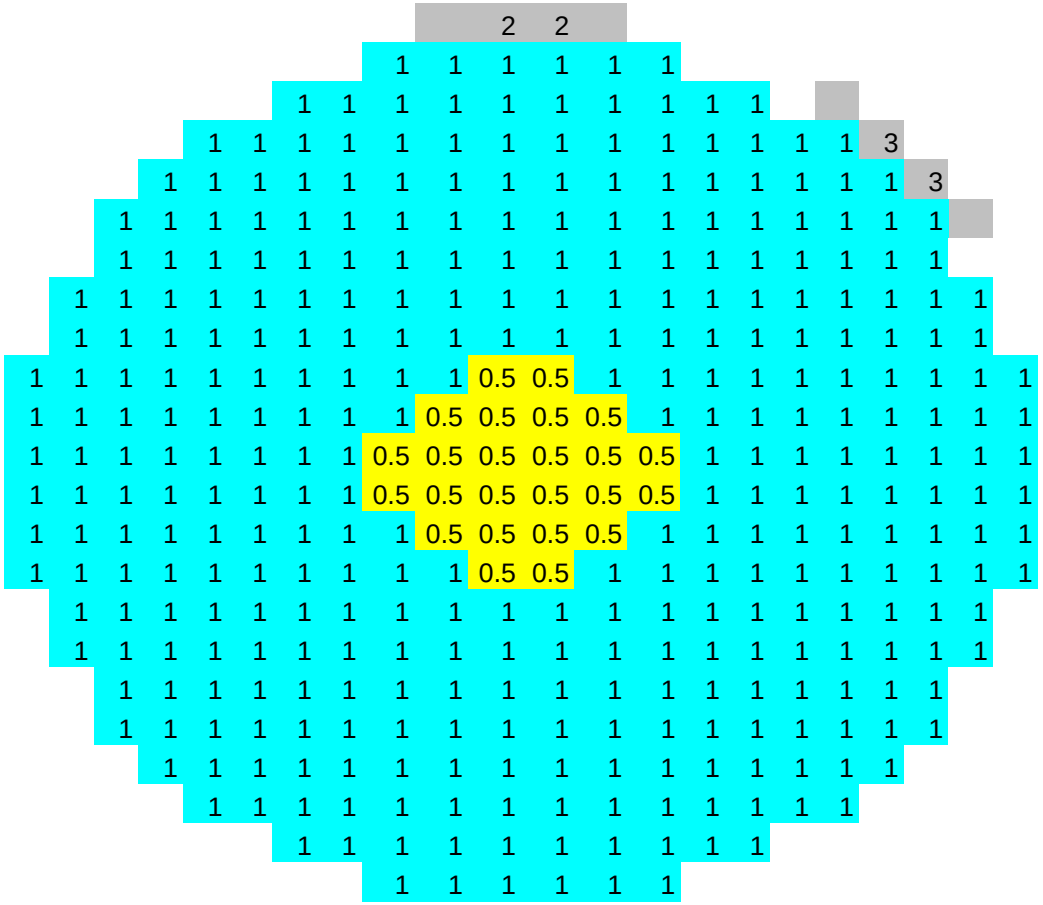
Somma dei gradi di "pieno"elementari	157
Numero di elementi	376
Grado di "pieno" medio	0.417553191
Grado di vuoto medio	0.582446809

CASO 12B

Corrente in	A	2.14219E-03
Corrente out	A	-2.14220E-03
Differenza	A	-3.11668E-09
"	%	-1.45490E-04
Corrente media	A	2.14220E-03
Impedenza	ohm	9.33622E+04

Somma dei gradi di "pieno"elementari	94
Numero di elementi	376
Grado di "pieno" medio	0.25
Grado di vuoto medio	0.75

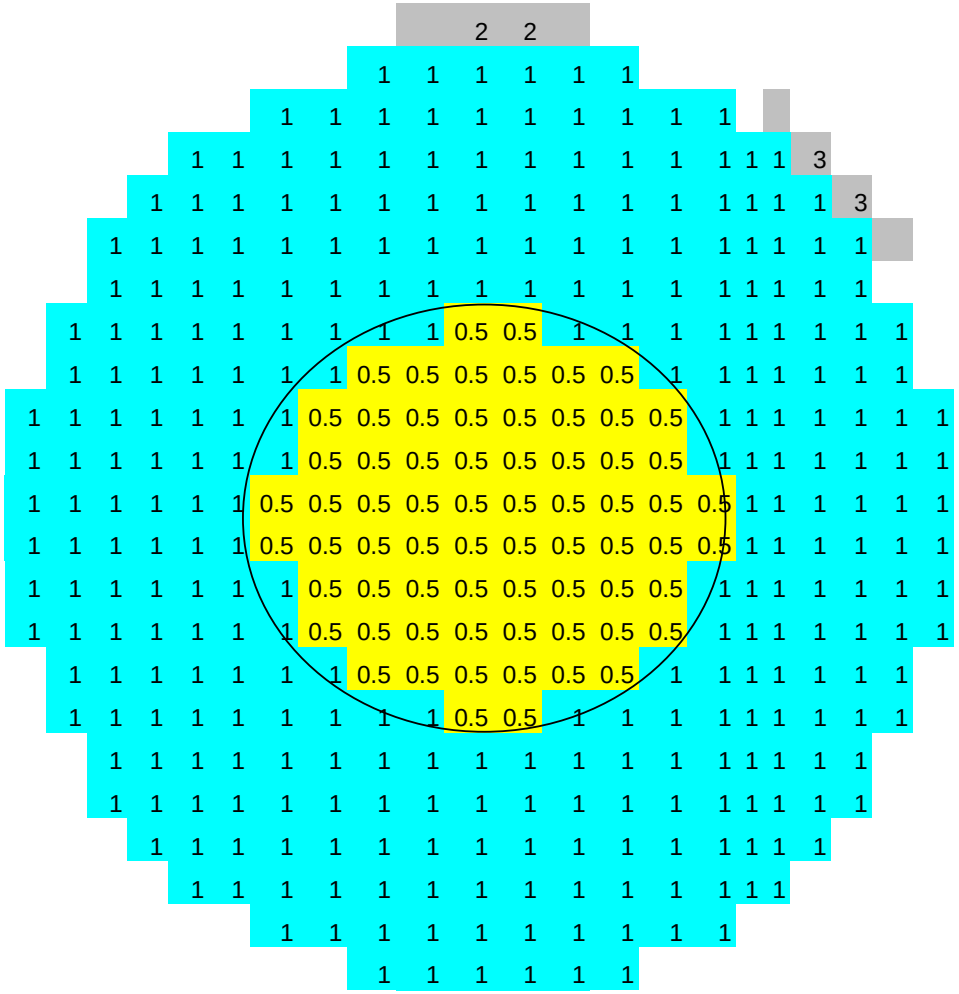
CASO 13B



Corrente in	A	5.06010E-02
Corrente out	A	-5.06017E-02
Differenza	A	-6.51933E-07
"	%	-1.28838E-03
Corrnete media	A	5.06014E-02
Impedenza	ohm	3.95246E+03

Somma dei gradi di "pieno"elementari	364
Numero di elementi	376
Grado di "pieno" medio	0.968085106
Grado di vuoto medio	0.031914894

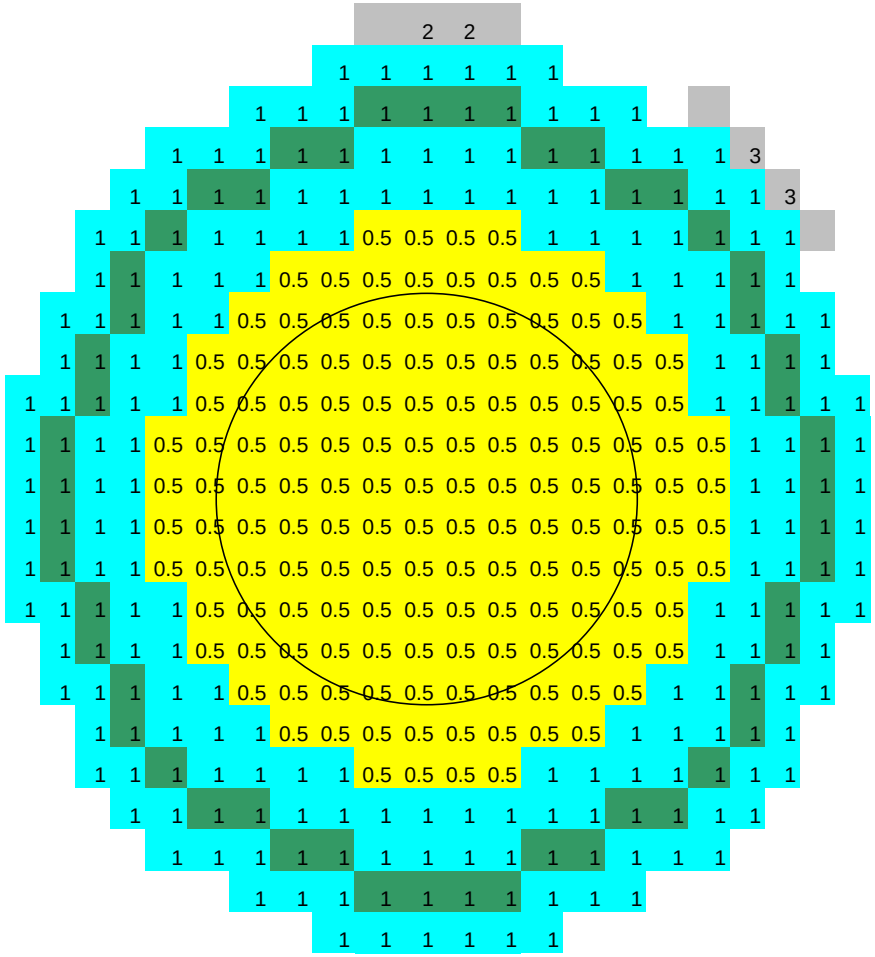
CASO 14B



Corrente in	A	4.84045E-02
Corrente out	A	-4.84048E-02
Differenza	A	-2.48906E-07
"	%	-5.14221E-04
Corrente media	A	4.84046E-02
Impedenza	ohm	4.13184E+03

Somma dei gradi di "pieno"elementari	342
Numero di elementi	376
Grado di "pieno" medio	0.909574468
Grado di vuoto medio	0.090425532

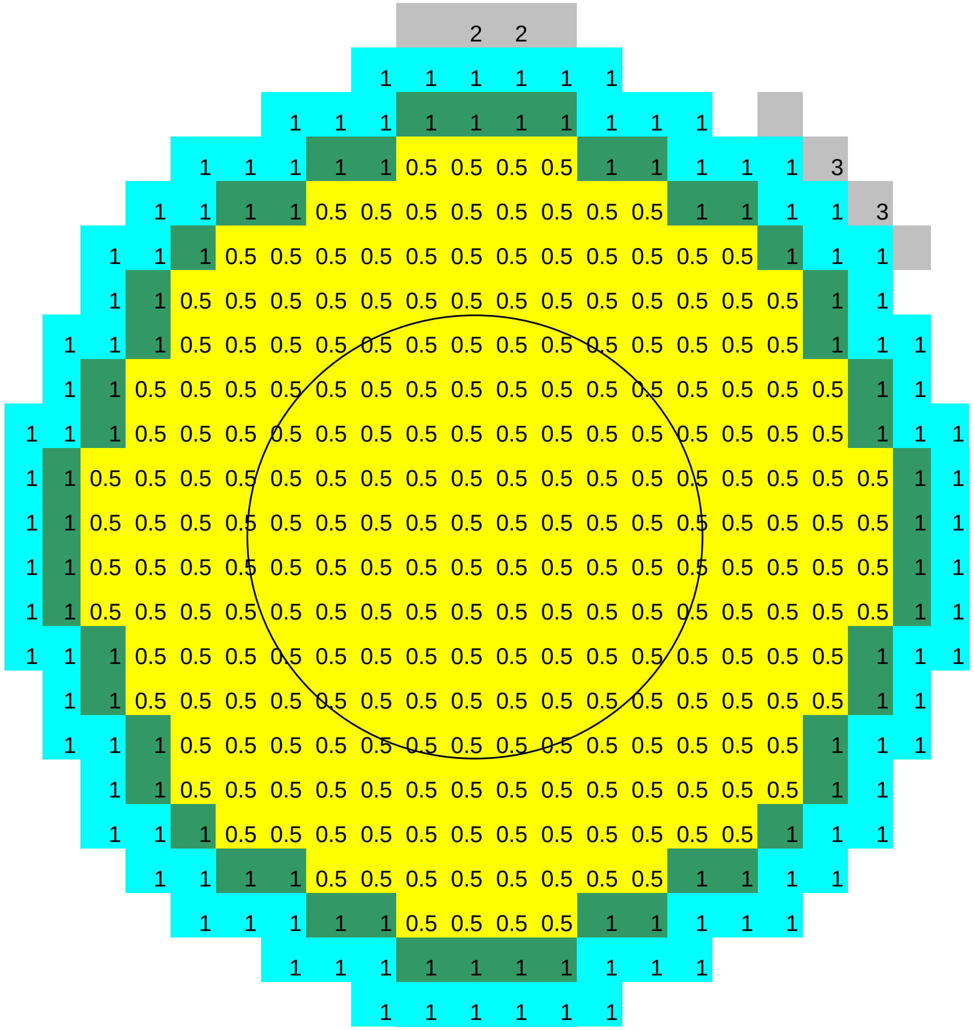
CASO 15B



Corrente in	A	4.14486E-02
Corrente out	A	-4.14491E-02
Differenza	A	-4.40716E-07
"	%	-1.06328E-03
Corrente media	A	4.14488E-02
Impedenza	ohm	4.82523E+03

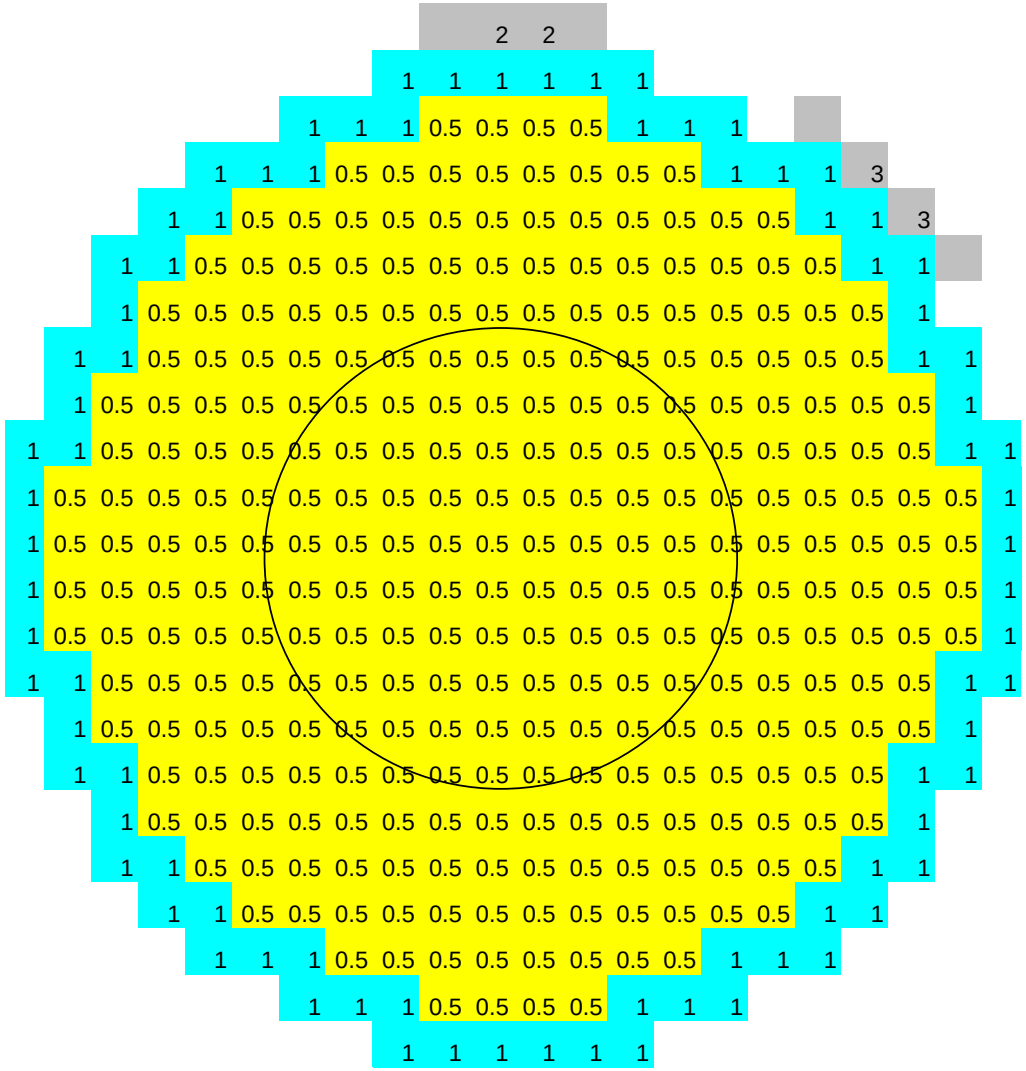
Somma dei gradi di "pieno"elementari	302
Numero di elementi	376
Grado di "pieno" medio	0.803191489
Grado di vuoto medio	0.196808511

CASO 16B



Corrente in	A	2.71835E-02
Corrente out	A	-2.71838E-02
Differenza	A	-2.46624E-07
"	%	-9.07257E-04
Corrente media	A	2.71837E-02
Impedenza	ohm	7.35736E+03
Somma dei gradi di "pieno"elementari		256
Numero di elementi		376
Grado di "pieno" medio		0.680851064
Grado di vuoto medio		0.319148936

CASO 17B



Corrente in	A	1.63063E-02
Corrente out	A	-1.63064E-02
Differenza	A	-5.32678E-08
"	%	-3.26670E-04
Corrente media	A	1.63063E-02
Impedenza	ohm	1.22652E+04

Somma dei gradi di "pieno"elementari	230
Numero di elementi	376
Grado di "pieno" medio	0.611702128
Grado di vuoto medio	0.388297872

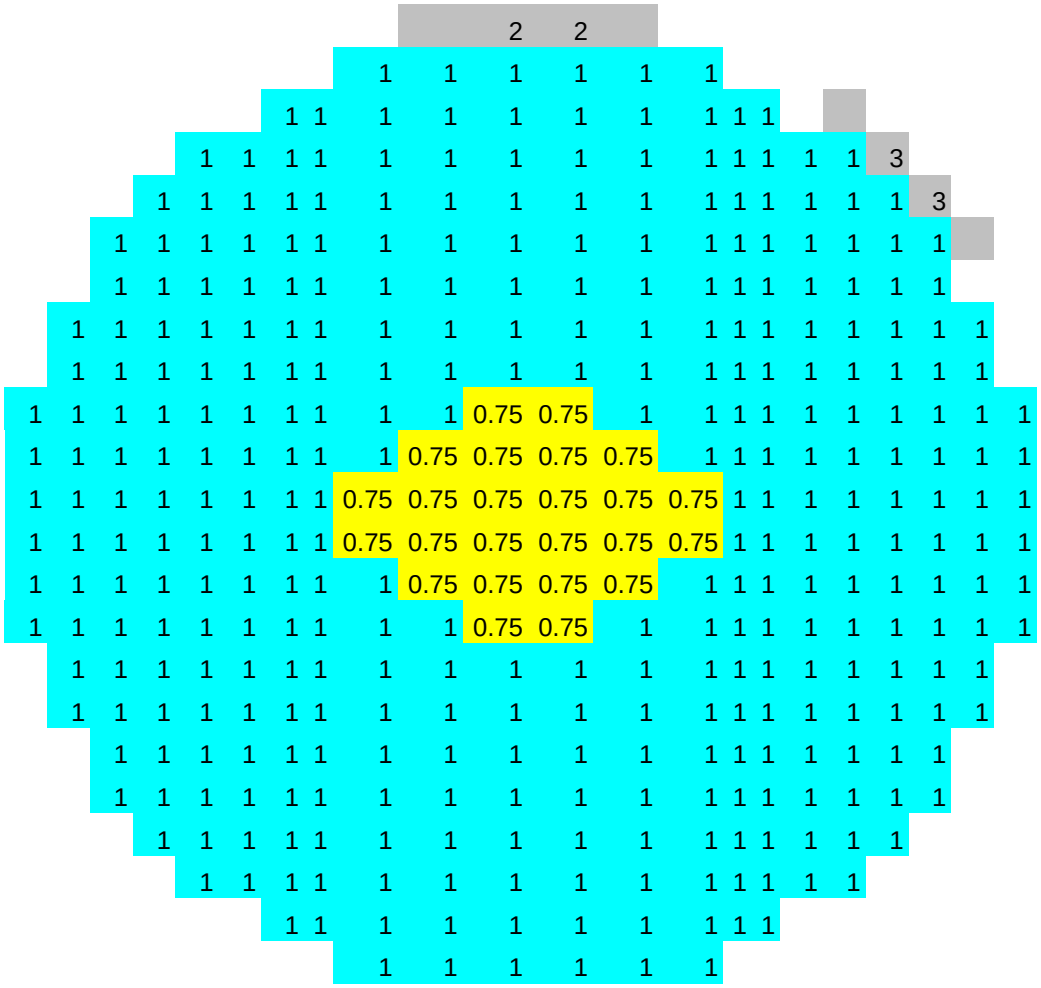
CASO 18B

										2	2										
								0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5								
						0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5						
				0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	3			
			0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	3		
		0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5		
		0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5		
	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	
	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	
0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	
	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	
		0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5		
		0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5		
			0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5			
				0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5				
						0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5						
								0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5								

Corrente in	A	2.90077E-03
Corrente out	A	-2.90079E-03
Differenza	A	-1.43859E-08
"	%	-4.95932E-04
Corrente media	A	2.90078E-03
Impedenza	ohm	6.89470E+04

Somma dei gradi di "pieno"elementari	188
Numero di elementi	376
Grado di "pieno" medio	0.5
Grado di vuoto medio	0.5

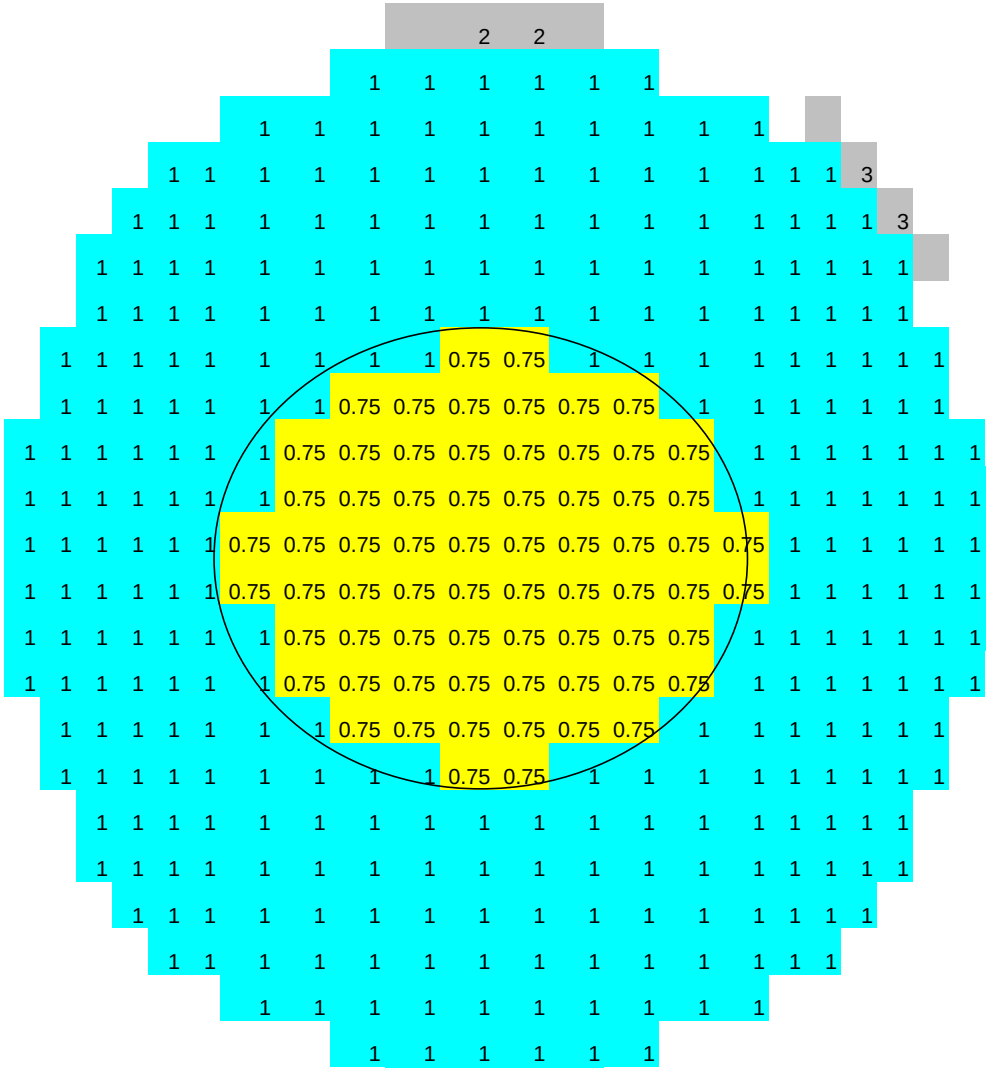
CASO 19B



Corrente in	A	5.06900E-02
Corrente out	A	-5.06918E-02
Differenza	A	-1.79317E-06
"	%	-3.53752E-03
Corrente media	A	5.06909E-02
Impedenza	ohm	3.94548E+03

Somma dei gradi di "pieno"elementari	370
Numero di elementi	376
Grado di "pieno" medio	0.984042553
Grado di vuoto medio	0.015957447

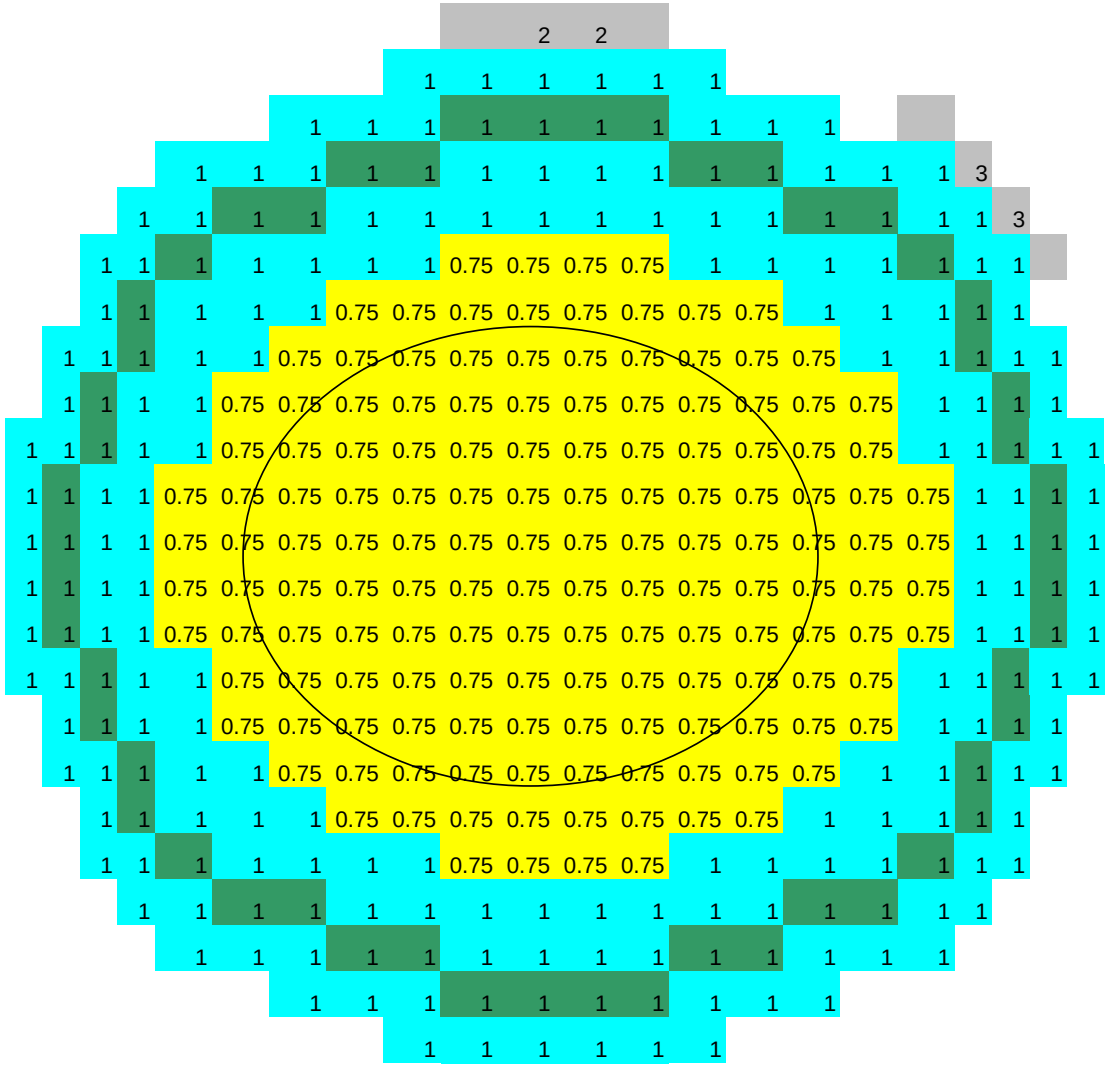
CASO 20B



Corrente in	A	4.87219E-02
Corrente out	A	-4.87228E-02
Differenza	A	-8.88630E-07
"	%	-1.82388E-03
Corrente media	A	4.87224E-02
Impedenza	ohm	4.10489E+03

Somma dei gradi di "pieno"elementari	359
Numero di elementi	376
Grado di "pieno" medio	0.954787234
Grado di vuoto medio	0.045212766

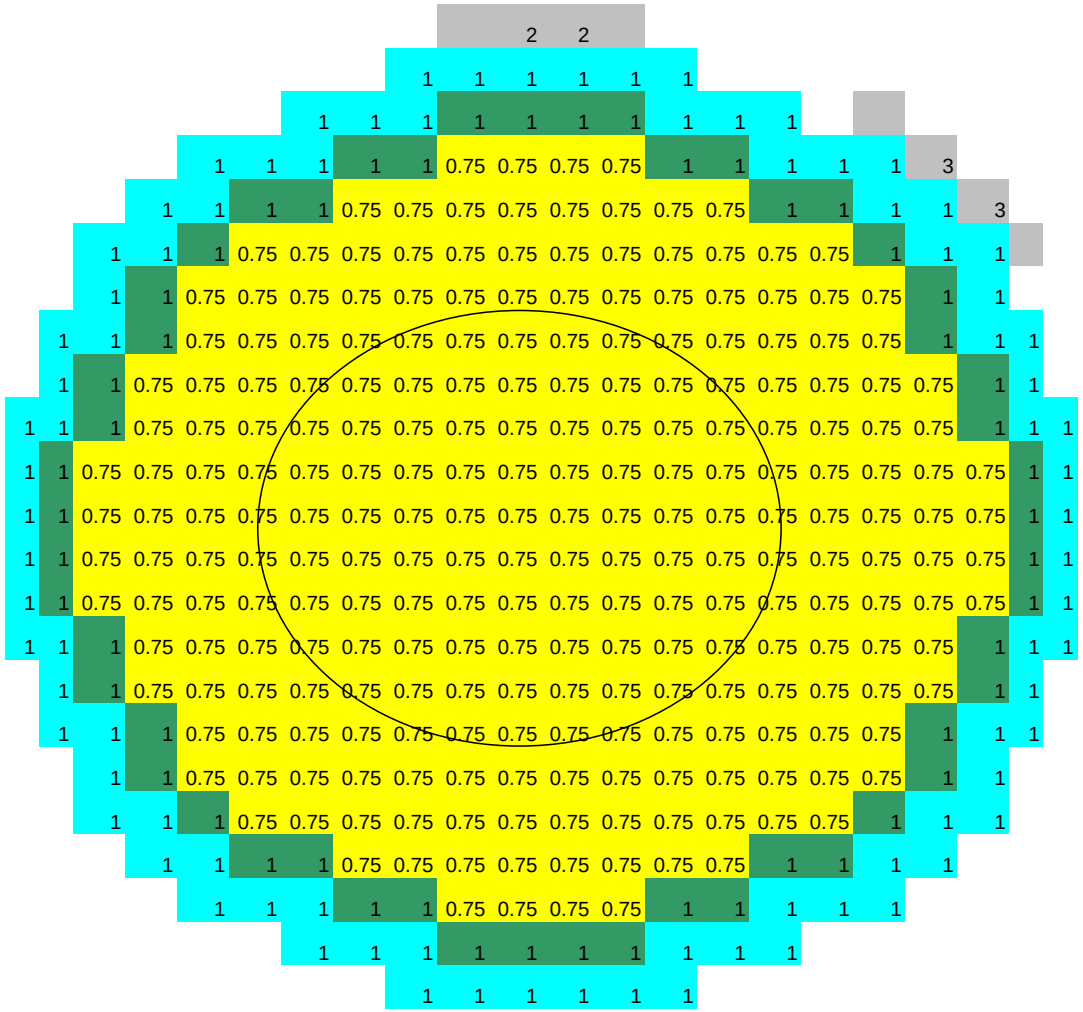
CASO 21B



Corrente in	A	4.24570E-02
Corrente out	A	-4.24582E-02
Differenza	A	-1.24794E-06
"	%	-2.93930E-03
Corrente media	A	4.24576E-02
Impedenza	ohm	4.71058E+03

Somma dei gradi di "pieno"elementari	339
Numero di elementi	376
Grado di "pieno" medio	0.901595745
Grado di vuoto medio	0.098404255

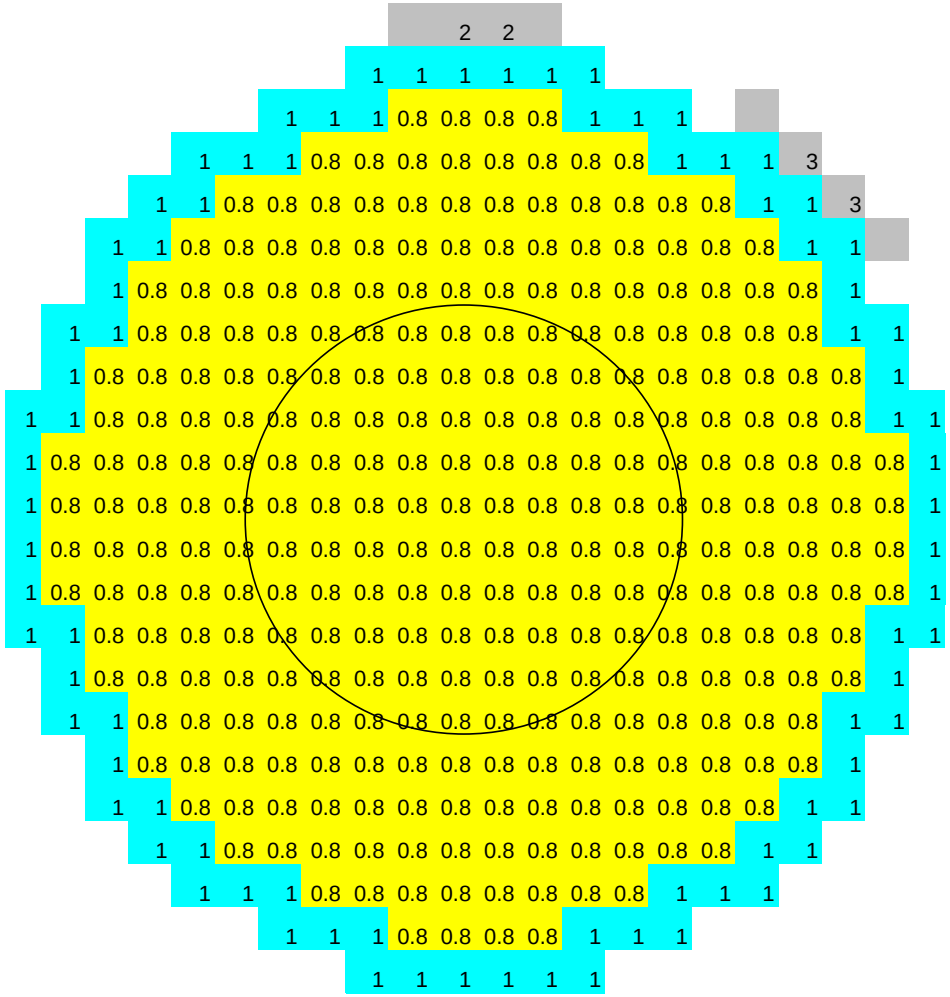
CASO 22B



Corrente in	A	2.93730E-02
Corrente out	A	-2.93736E-02
Differenza	A	-5.79248E-07
"	%	-1.97204E-03
Corrente media	A	2.93733E-02
Impedenza	ohm	6.80890E+03

Somma dei gradi di "pieno"elementari	316
Numero di elementi	376
Grado di "pieno" medio	0.840425532
Grado di vuoto medio	0.159574468

CASO 23B



Corrente in	A	1.90072E-02
Corrente out	A	-1.90074E-02
Differenza	A	-1.41523E-07
"	%	-7.44574E-04
Corrente media	A	1.90073E-02
Impedenza	ohm	1.05223E+04

Somma dei gradi di "pieno"elementari	303
Numero di elementi	376
Grado di "pieno" medio	0.805851064
Grado di vuoto medio	0.194148936

CASO 24B

										2	2										
								0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75								
						0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75						
				0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	3			
			0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	3		
		0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75		
		0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75		
	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	
	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	
0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	
	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	
		0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75		
		0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75		
			0.8	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75			
				0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75				
						0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75						
								0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75								

Corrente in	A	5.01340E-03
Corrente out	A	-5.01350E-03
Differenza	A	-1.01640E-07
"	%	-2.02737E-03
Corrente media	A	5.01345E-03
Impedenza	ohm	3.98927E+04

Somma dei gradi di "pieno"elementari	282
Numero di elementi	376
Grado di "pieno" medio	0.75
Grado di vuoto medio	0.25

CASO C:

Elettrodi a 22.5°

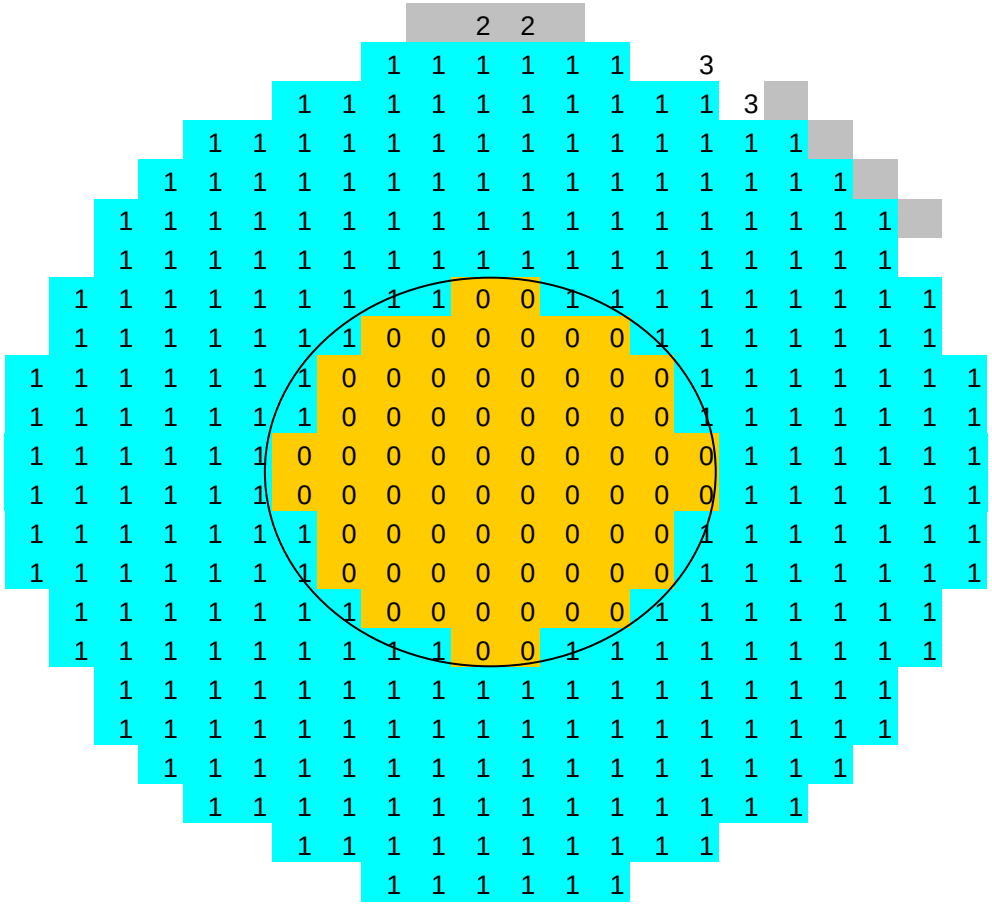
CASO 1C

										2	2										
								1	1	1	1	1	1		3						
						1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3					
				1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1				
			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1			
		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1			
				1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1				
						1	1	1	1	1	1	1	1	1	1						
								1	1	1	1	1	1								

Corrente in	A	5.72693E-02
Corrente out	A	-5.73062E-02
Differenza	A	-3.68461E-05
"	%	-6.43383E-02
Corrente media	A	5.72878E-02
Impedenza	ohm	3.49115E+03

Somma dei gradi di "pieno"elementari	352
Numero di elementi	376
Grado di "pieno" medio	0.936170213
Grado di vuoto medio	0.063829787

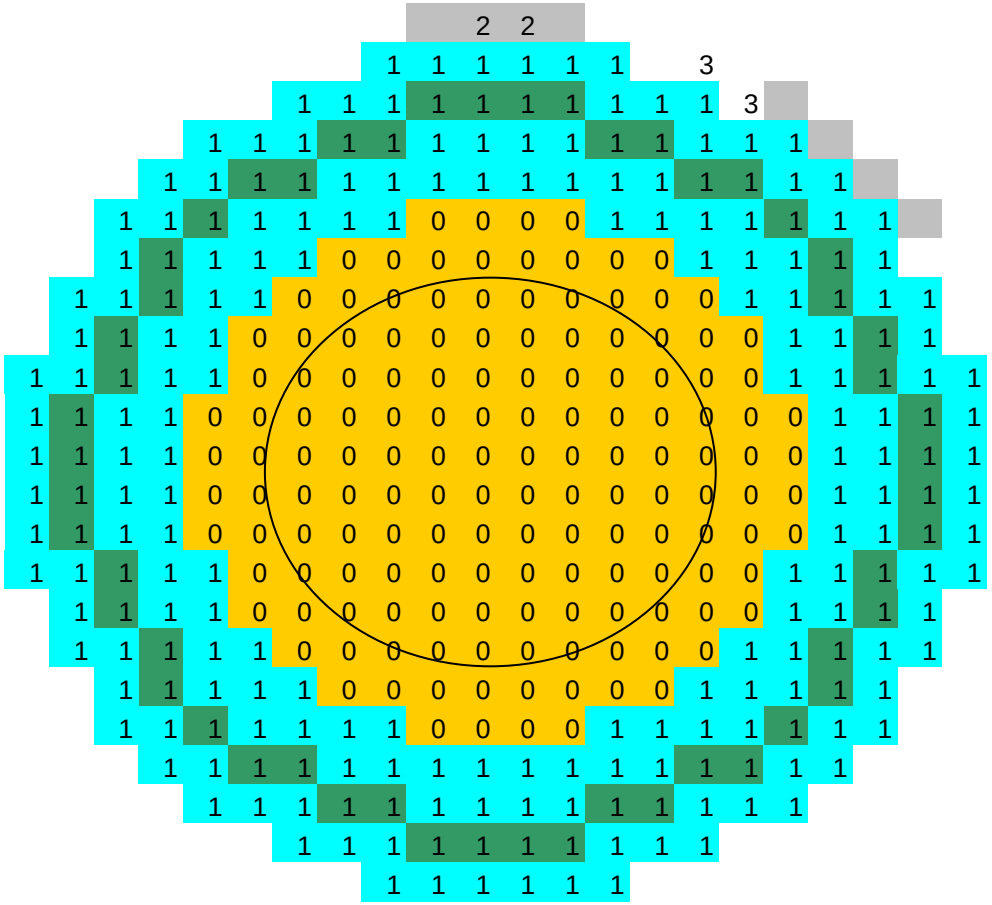
CASO 2C



Corrente in	A	5.59423E-02
Corrente out	A	-5.59423E-02
Differenza	A	-5.84947E-09
"	%	-1.04563E-05
Corrente media	A	5.59423E-02
Impedenza	ohm	3.57511E+03

Somma dei gradi di "pieno"elementari	308
Numero di elementi	376
Grado di "pieno" medio	0.819148936
Grado di vuoto medio	0.180851064

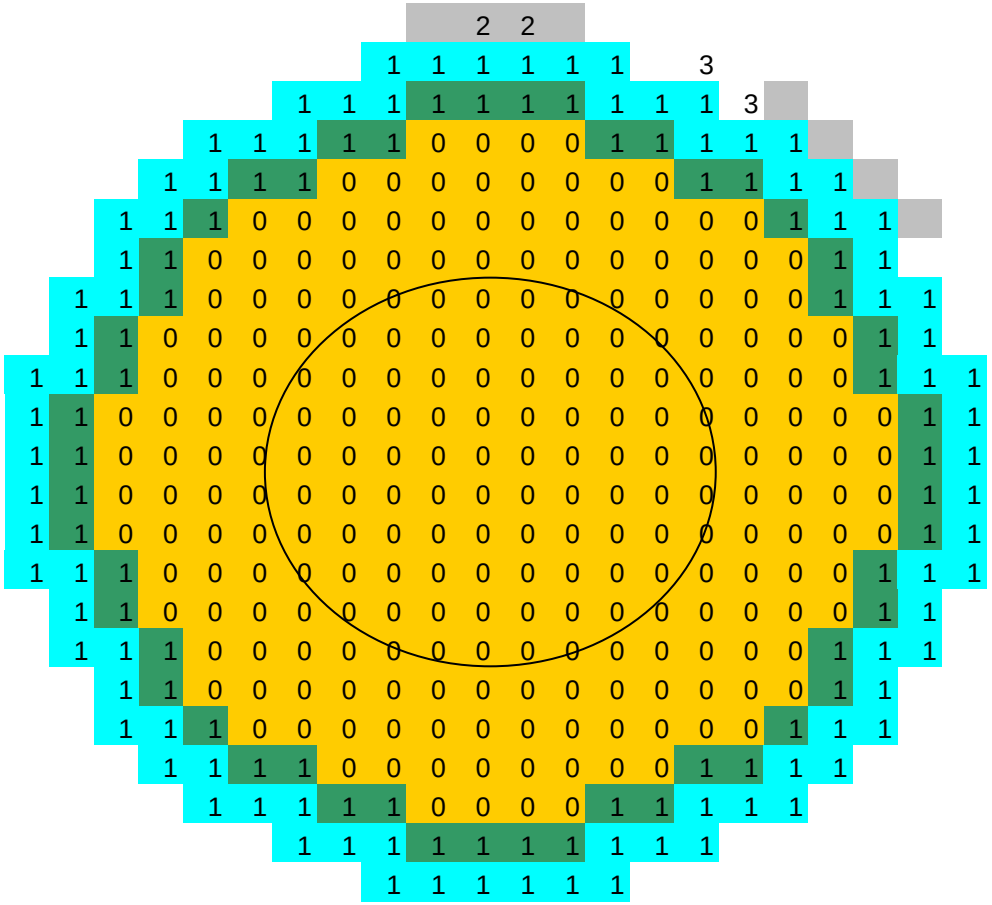
CASO 3C



Corrente in	A	5.08760E-02
Corrente out	A	-5.08795E-02
Differenza	A	-3.47633E-06
"	%	-6.83294E-03
Corrente media	A	5.08777E-02
Impedenza	ohm	3.93099E+03

Somma dei gradi di "pieno"elementari	228
Numero di elementi	376
Grado di "pieno" medio	0.606382979
Grado di vuoto medio	0.393617021

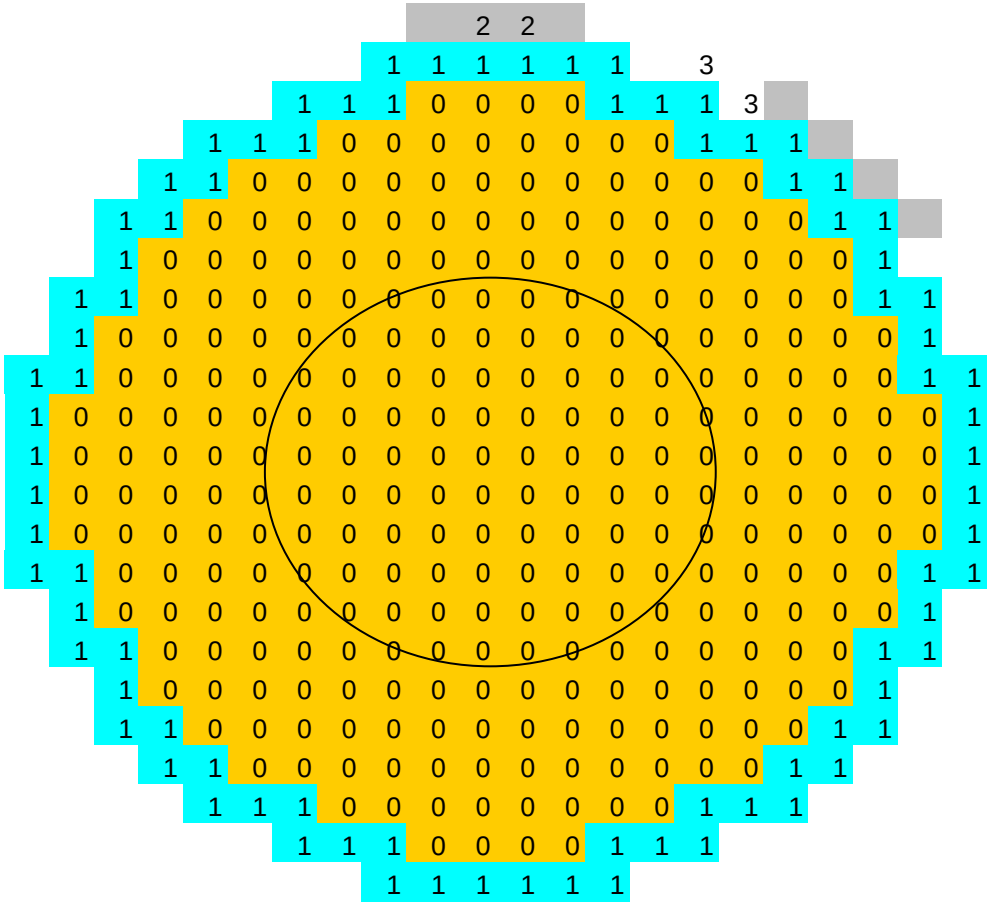
CASO 4C



Corrente in	A	3.60391E-02
Corrente out	A	-3.60391E-02
Differenza	A	2.35853E-14
"	%	6.54436E-11
Corrente media	A	3.60391E-02
Impedenza	ohm	5.54952E+03

Somma dei gradi di "pieno"elementari	136
Numero di elementi	376
Grado di "pieno" medio	0.361702128
Grado di vuoto medio	0.638297872

CASO 5C



Corrente in	A	2.14264E-02
Corrente out	A	-2.14264E-02
Differenza	A	3.53884E-16
"	%	1.65162E-12
Corrente media	A	2.14264E-02
Impedenza	ohm	9.33428E+03

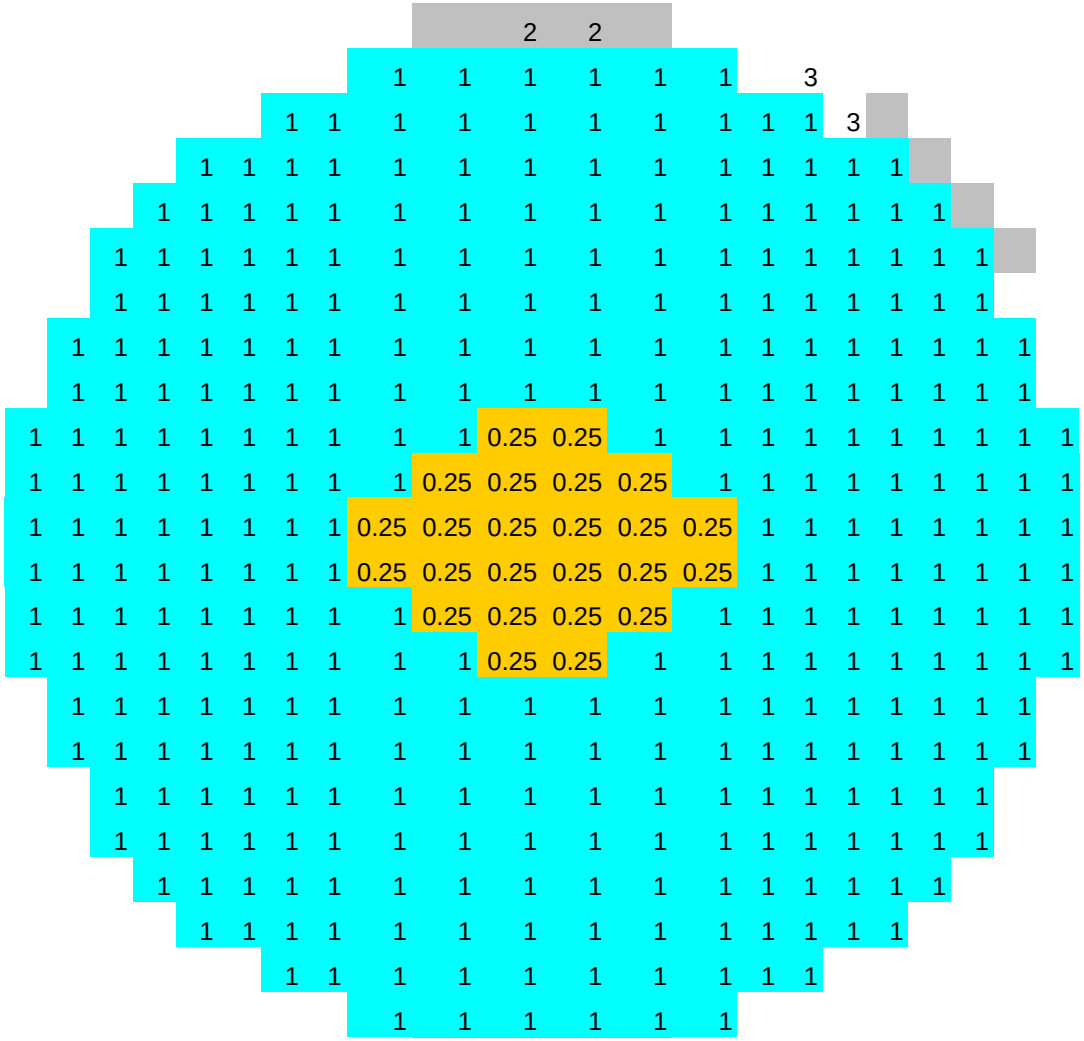
Somma dei gradi di "pieno"elementari	84
Numero di elementi	376
Grado di "pieno" medio	0.223404255
Grado di vuoto medio	0.776595745

CASO 6C

										2	2										
								0	0	0	0	0	0		3						
						0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3					
				0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
				0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
						0	0	0	0	0	0	0	0	0	0						
								0	0	0	0	0	0								

Corrente in	A	2.25261E-03
Corrente out	A	-2.25361E-03
Differenza	A	-9.96386E-07
"	%	-4.42325E-02
Corrente media	A	2.25311E-03
Impedenza	ohm	8.87662E+04
Somma dei gradi di "pieno"elementari		0
Numero di elementi		376
Grado di "pieno" medio		0

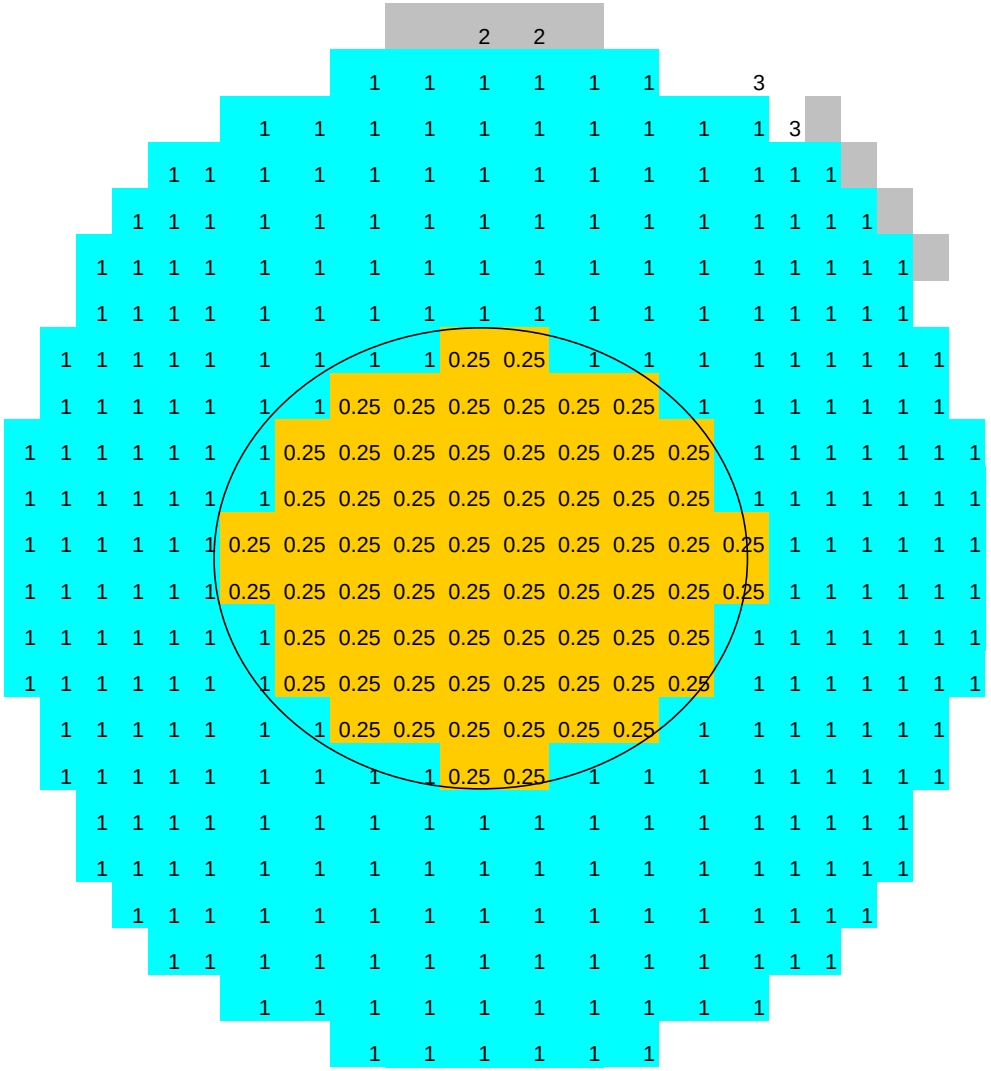
CAS0 7C



Corrente in	A	5.72968E-02
Corrente out	A	-5.72968E-02
Differenza	A	-1.59150E-09
"	%	-2.77764E-06
Corrente media	A	5.72968E-02
Impedenza	ohm	3.49060E+03

Somma dei gradi di "pieno"elementari	358
Numero di elementi	376
Grado di "pieno" medio	0.95212766
Grado di vuoto medio	0.04787234

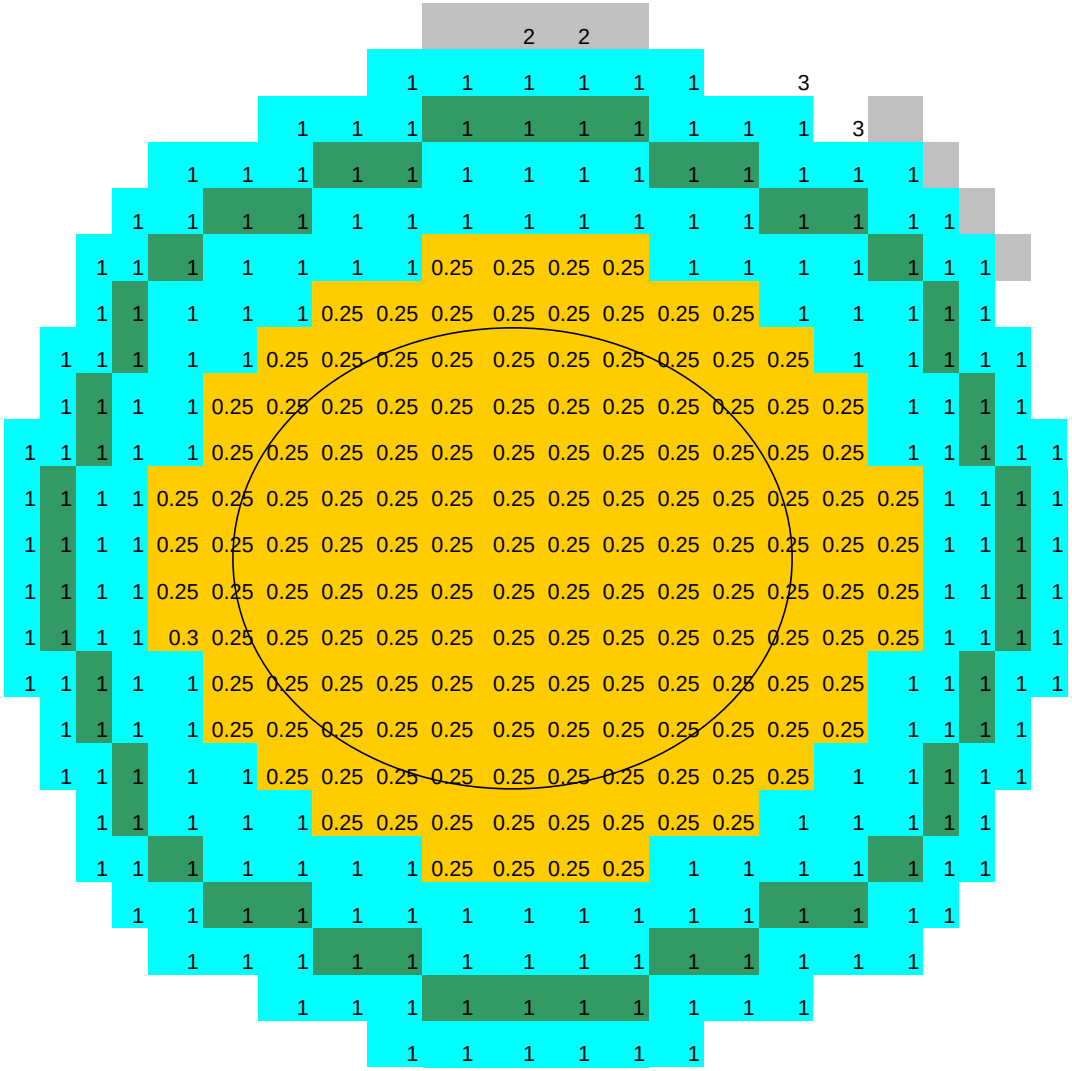
CASO 8C



Corrente in	A	5.59815E-02
Corrente out	A	-5.59815E-02
Differenza	A	-1.50995E-09
"	%	-2.69723E-06
Corrente media	A	5.59815E-02
Impedenza	ohm	3.57261E+03

Somma dei gradi di "pieno"elementari	325
Numero di elementi	376
Grado di "pieno" medio	0.864361702
Grado di vuoto medio	0.135638298

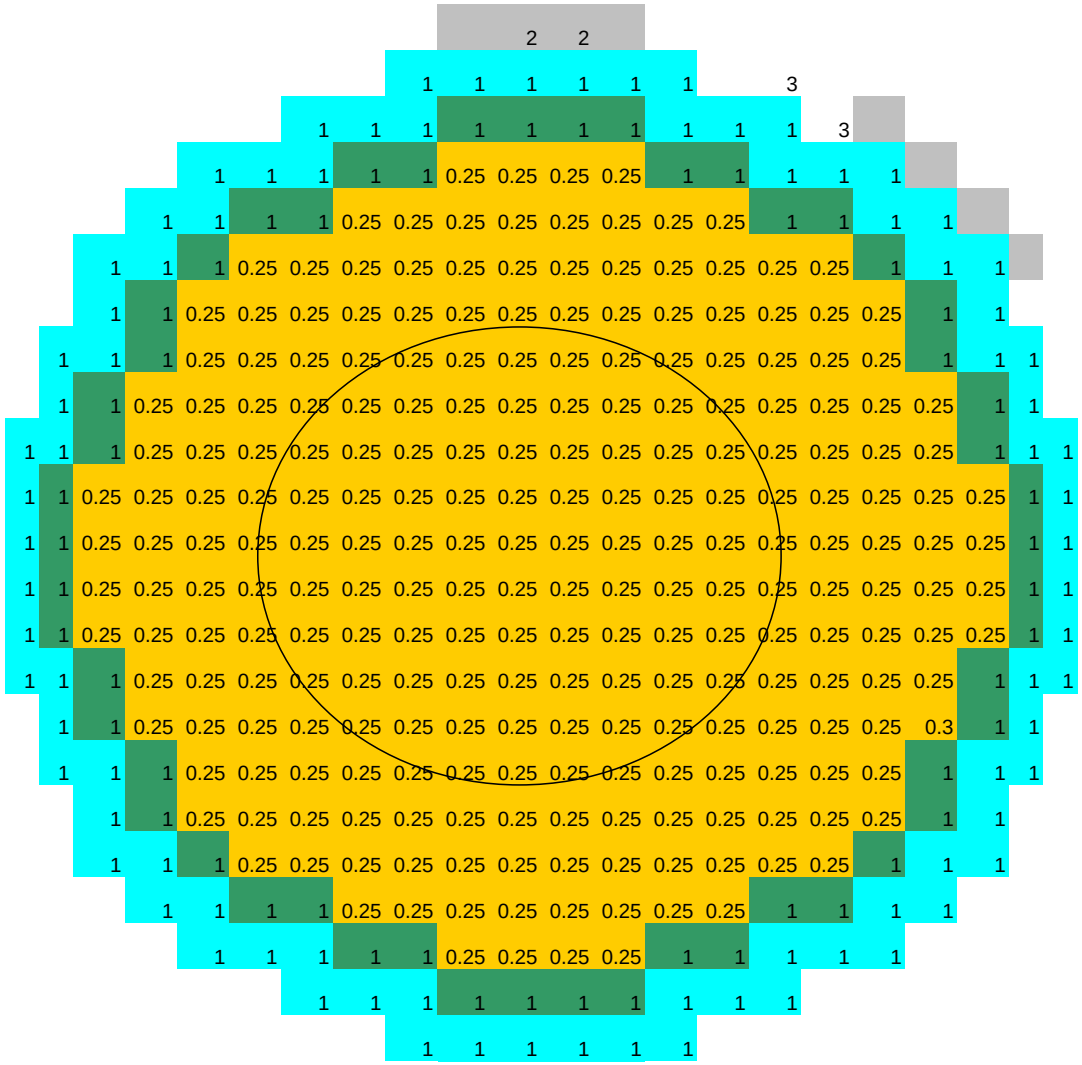
CASO 9C



Corrente in	A	5.10243E-02
Corrente out	A	-5.10243E-02
Differenza	A	-3.27352E-09
"	%	-6.41562E-06
Corrente media	A	5.10243E-02
Impedenza	ohm	3.91970E+03

Somma dei gradi di "pieno"elementari	265
Numero di elementi	376
Grado di "pieno" medio	0.704787234
Grado di vuoto medio	0.295212766

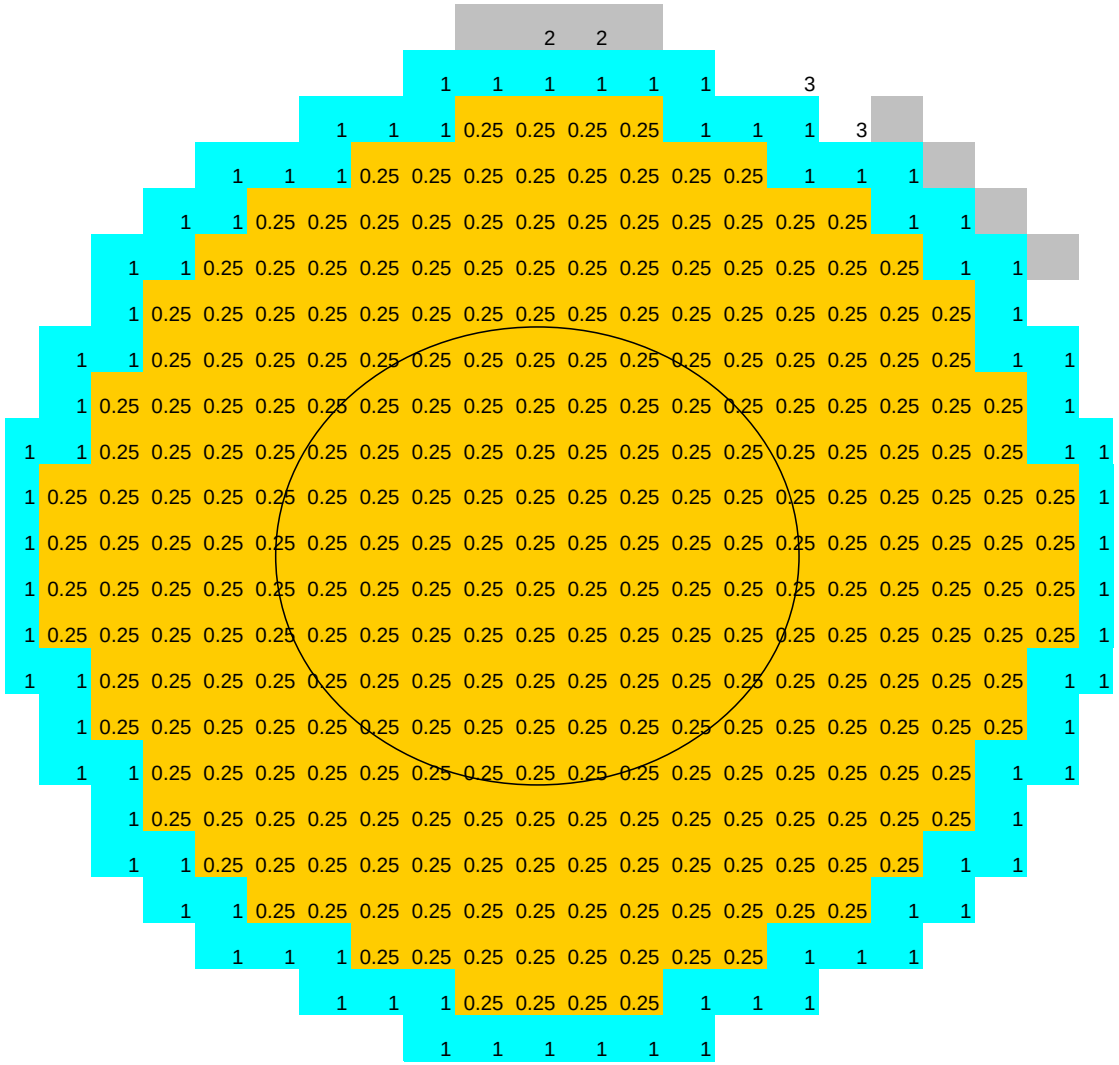
CASO 10C



Corrente in	A	3.64753E-02
Corrente out	A	-3.64753E-02
Differenza	A	-1.10046E-08
"	%	-3.01701E-05
Corrente media	A	3.64753E-02
Impedenza	ohm	5.48316E+03

Somma dei gradi di "pieno"elementari	196
Numero di elementi	376
Grado di "pieno" medio	0.521276596
Grado di vuoto medio	0.478723404

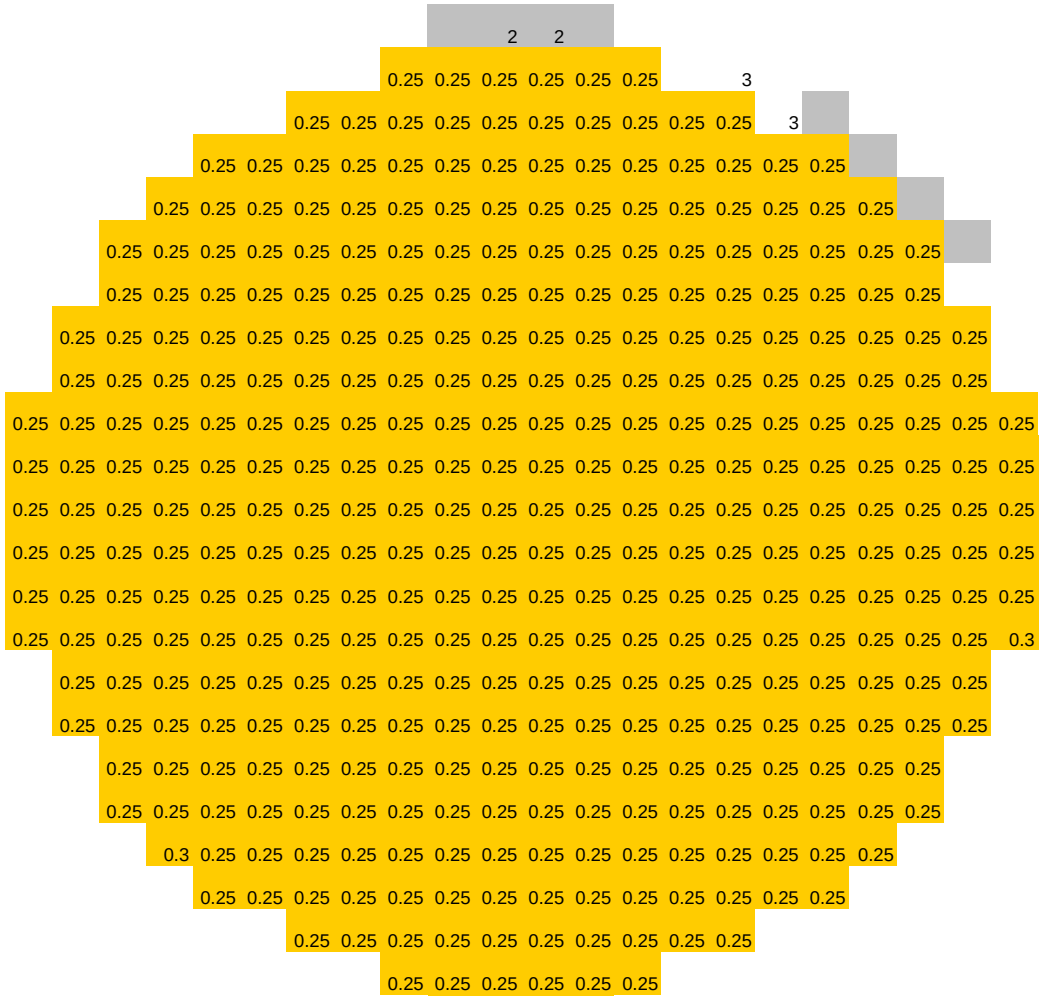
CASO 11C



Corrente in	A	2.20375E-02
Corrente out	A	-2.20375E-02
Differenza	A	-1.12811E-09
"	%	-5.11902E-06
Corrente media	A	2.20375E-02
Impedenza	ohm	9.07542E+03

Somma dei gradi di "pieno"elementari	157
Numero di elementi	376
Grado di "pieno" medio	0.417553191
Grado di vuoto medio	0.582446809

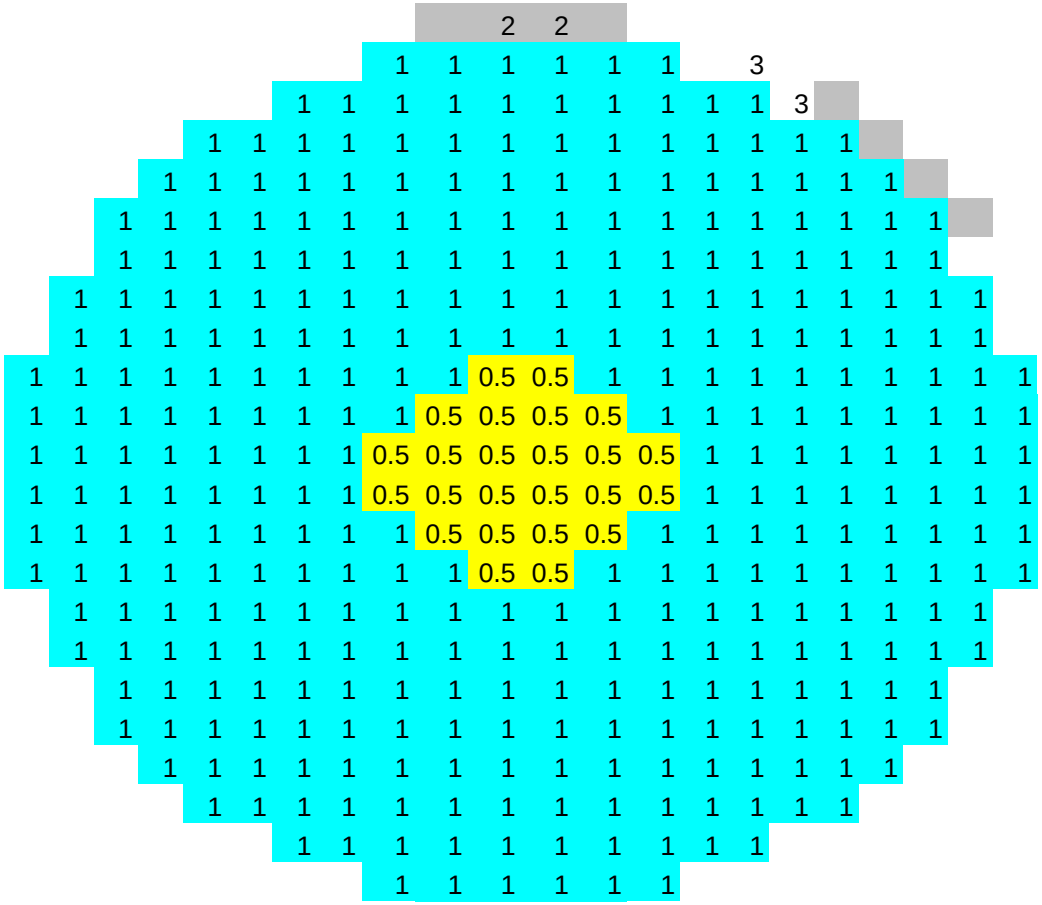
CASO 12C



Corrente in	A	2.70257E-03
Corrente out	A	-2.70259E-03
Differenza	A	-2.38826E-08
"	%	-8.83702E-04
Corrnete media	A	2.70258E-03
Impedenza	ohm	7.40034E+04

Somma dei gradi di "pieno"elementari	94
Numero di elementi	376
Grado di "pieno" medio	0.25
Grado di vuoto medio	0.75

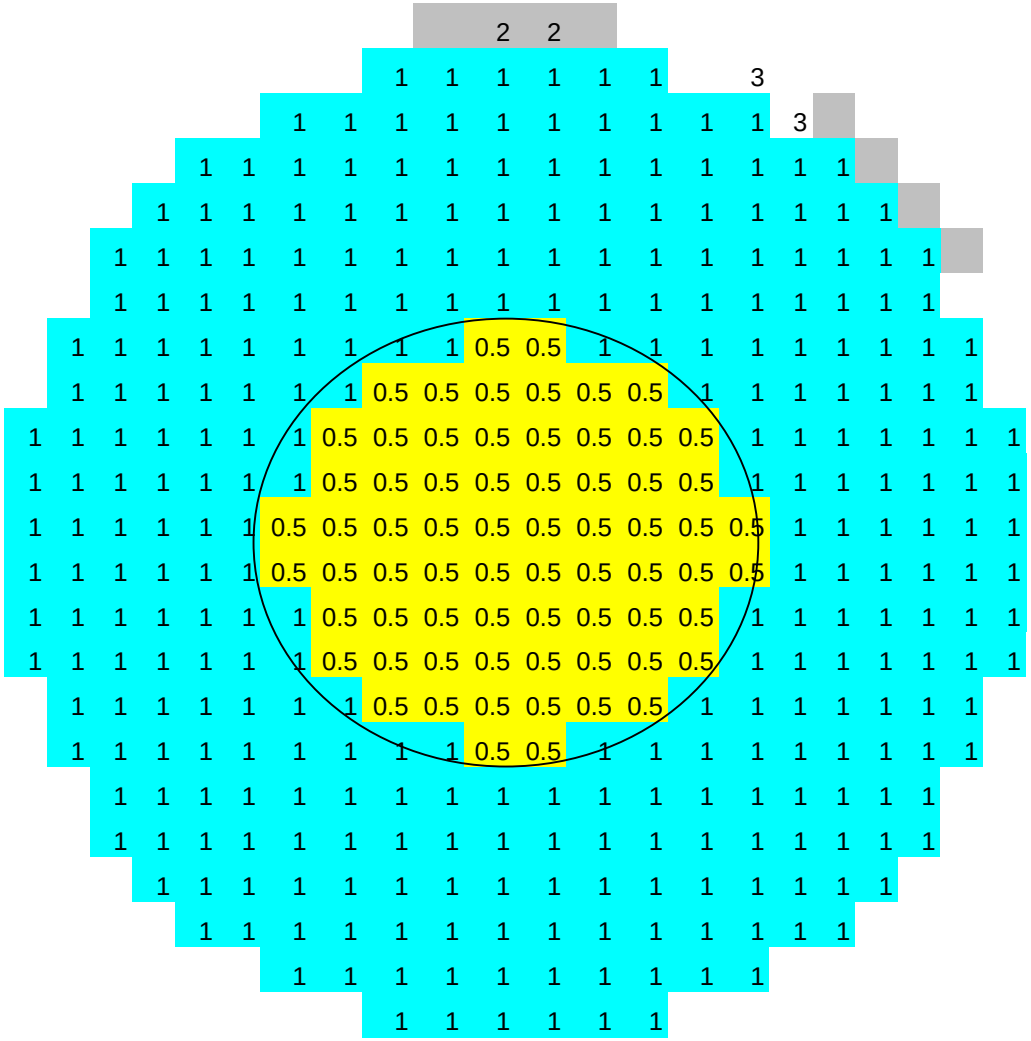
CASO 13C



Corrente in	A	5.73160E-02
Corrente out	A	-5.73160E-02
Differenza	A	-4.08436E-09
"	%	-7.12604E-06
Corrnete media	A	5.73160E-02
Impedenza	ohm	3.48943E+03

Somma dei gradi di "pieno"elementari	364
Numero di elementi	376
Grado di "pieno" medio	0.968085106
Grado di vuoto medio	0.031914894

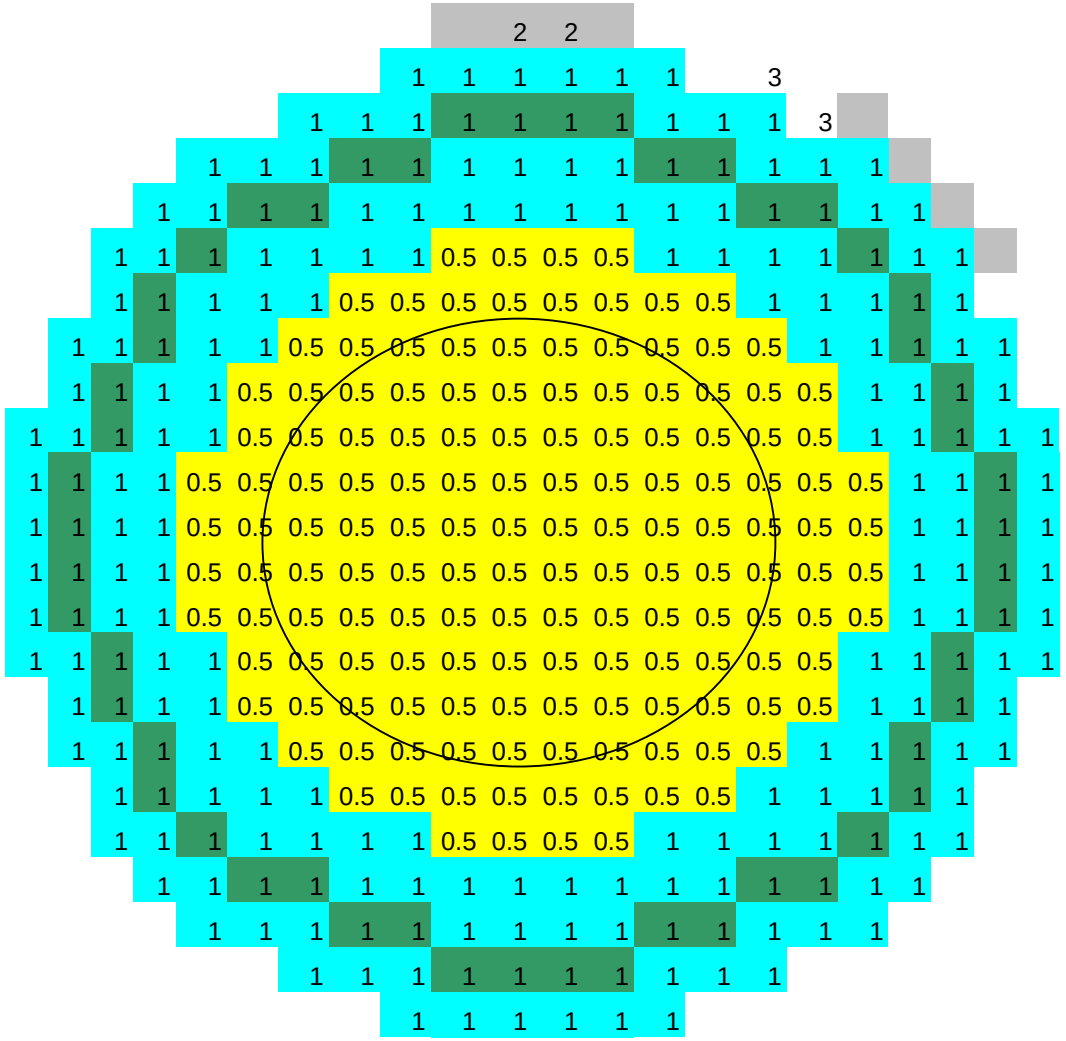
CASO 14C



Corrente in	A	5.60549E-02
Corrente out	A	-5.60549E-02
Differenza	A	-7.38442E-10
"	%	-1.31735E-06
Corrente media	A	5.60549E-02
Impedenza	ohm	3.56793E+03

Somma dei gradi di "pieno"elementari	342
Numero di elementi	376
Grado di "pieno" medio	0.909574468
Grado di vuoto medio	0.090425532

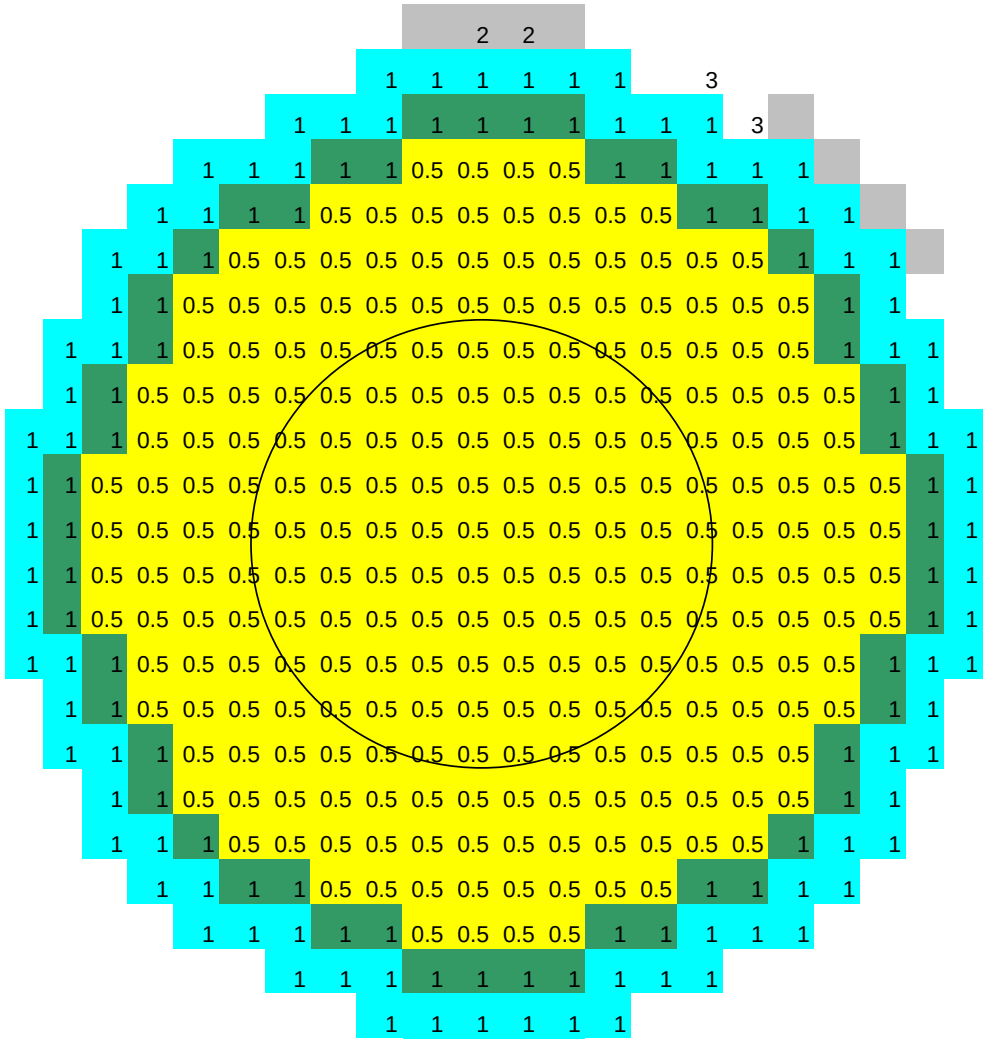
CASO 15 C



Corrente in	A	5.13119E-02
Corrente out	A	-5.13013E-02
Differenza	A	1.06841E-05
"	%	2.08220E-02
Corrente media	A	5.13066E-02
Impedenza	ohm	3.89813E+03

Somma dei gradi di "pieno"elementari	302
Numero di elementi	376
Grado di "pieno" medio	0.803191489
Grado di vuoto medio	0.196808511

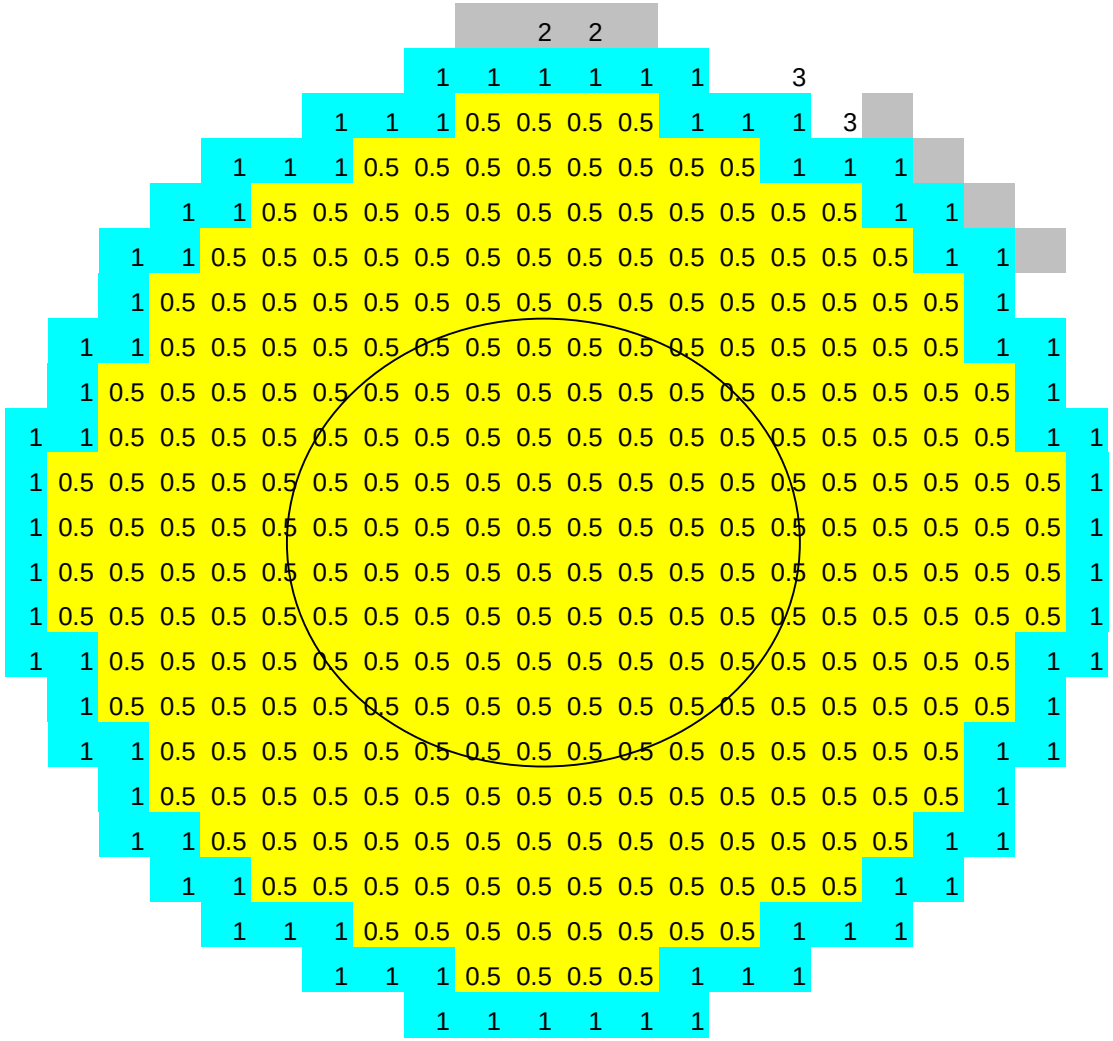
CASO 16C



Corrente in	A	3.72886E-02
Corrente out	A	-3.72886E-02
Differenza	A	-6.11877E-08
"	%	-1.64092E-04
Corrente media	A	3.72886E-02
Impedenza	ohm	5.36357E+03

Somma dei gradi di "pieno"elementari	256
Numero di elementi	376
Grado di "pieno" medio	0.680851064
Grado di vuoto medio	0.319148936

CASO 17C



Corrente in	A	2.31781E-02
Corrente out	A	-2.31781E-02
Differenza	A	-2.09329E-08
"	%	-9.03132E-05
Corrente media	A	2.31781E-02
Impedenza	ohm	8.62883E+03

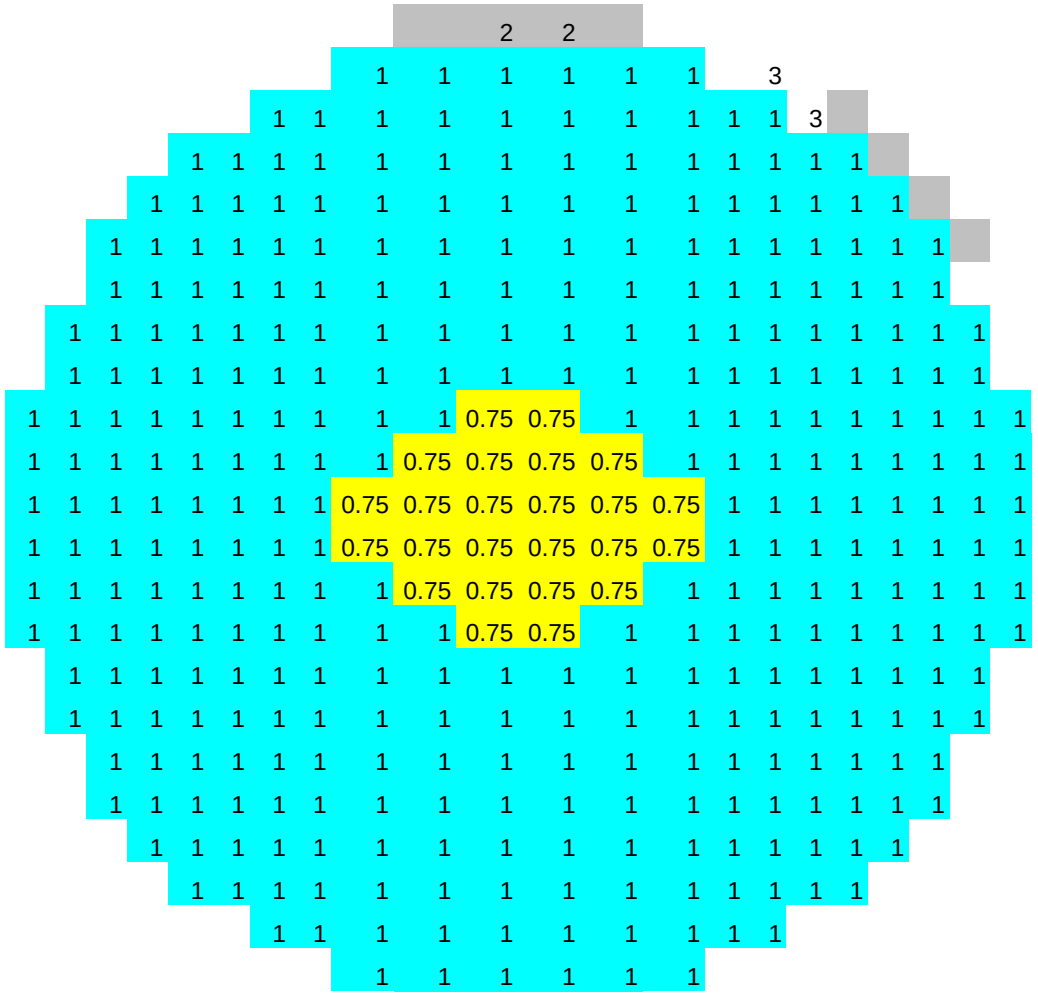
Somma dei gradi di "pieno"elementari	230
Numero di elementi	376
Grado di "pieno" medio	0.611702128
Grado di vuoto medio	0.388297872

CASO 18C

										2	2										
								0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5		3						
						0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	3					
				0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5				
			0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5			
		0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5		
		0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5		
	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	
	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	
0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	
	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	
		0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5		
		0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5		
			0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5			
				0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5				
						0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5						
								0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5								

Corrente in	A	3.56041E-03
Corrente out	A	-3.56063E-03
Differenza	A	-2.18921E-07
"	%	-6.14877E-03
Corrente media	A	3.56052E-03
Impedenza	ohm	5.61716E+04
Somma dei gradi di "pieno"elementari		188
Numero di elementi		376
Grado di "pieno" medio		0.5
Grado di vuoto medio		0.5

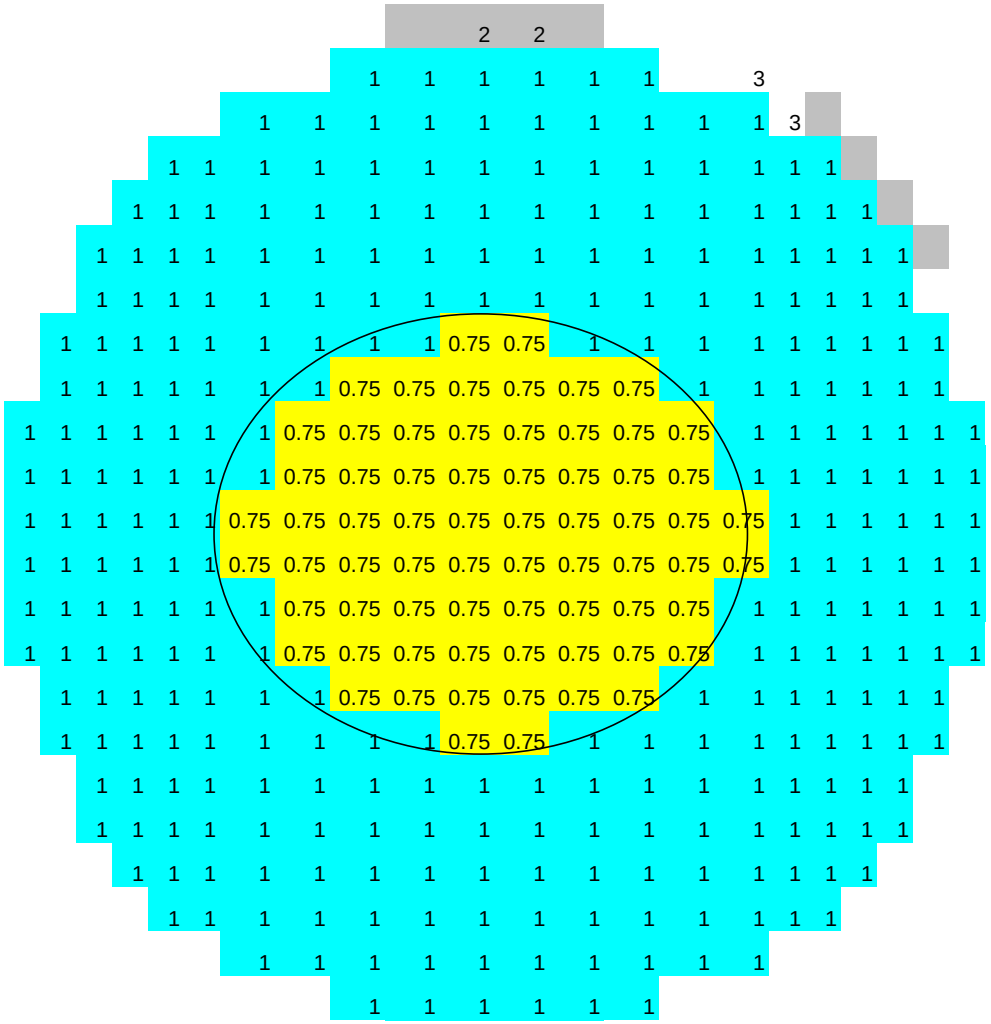
CASO 19C



Corrente in	A	5.73650E-02
Corrente out	A	-5.73650E-02
Differenza	A	-3.70389E-08
"	%	-6.45671E-05
Corrente media	A	5.73650E-02
Impedenza	ohm	3.48645E+03

Somma dei gradi di "pieno"elementari	370
Numero di elementi	376
Grado di "pieno" medio	0.984042553
Grado di vuoto medio	0.015957447

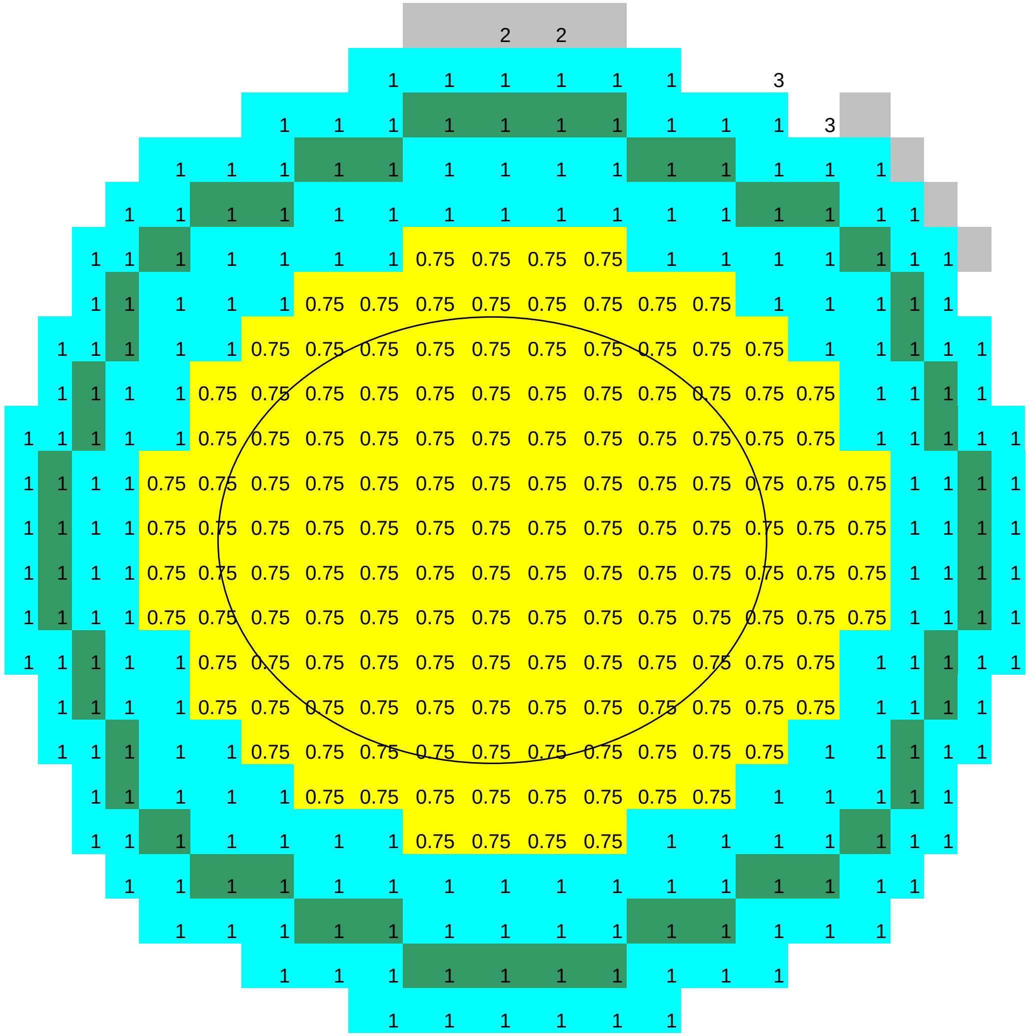
CASO 20 C



Corrente in	A	5.62413E-02	
Corrente out	A	-5.62414E-02	
Differenza	A	-1.02596E-07	
"	%	-1.82421E-04	
Corrente media	A	5.62414E-02	
Impedenza	ohm	3.55610E+03	0.045212766

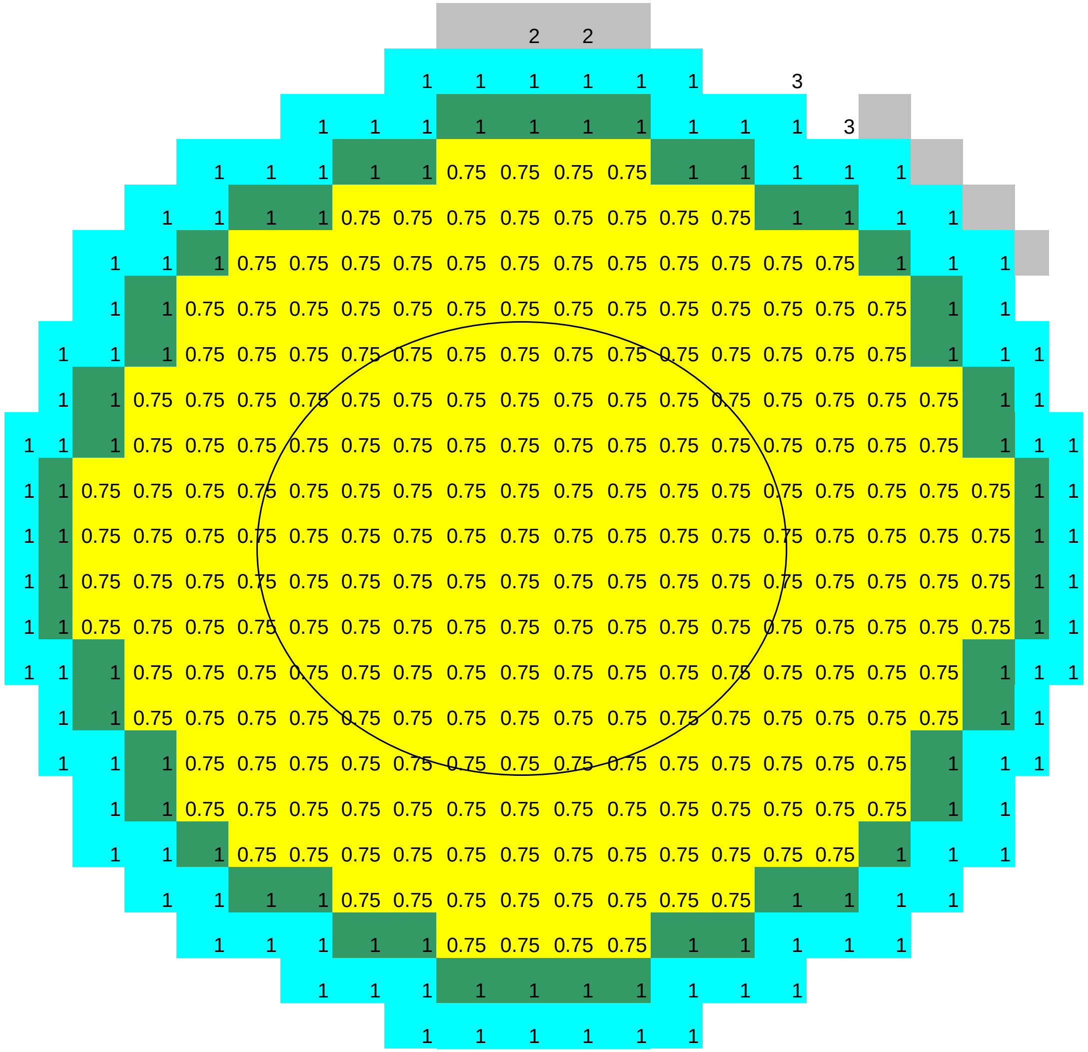
Somma dei gradi di "pieno"elementari	359
Numero di elementi	376
Grado di "pieno" medio	0.954787234
Grado di vuoto medio	0.045212766

CASO 21 C



Corrente in	A	5.19953E-02
Corrente out	A	-5.19955E-02
Differenza	A	-2.25704E-07
"	%	-4.34086E-04
Corrente media	A	5.19954E-02
Impedenza	ohm	3.84649E+03
Somma dei gradi di "pieno"elementari		339
Numero di elementi		376
Grado di "pieno" medio		0.901595745
Grado di vuoto medio		0.098404255

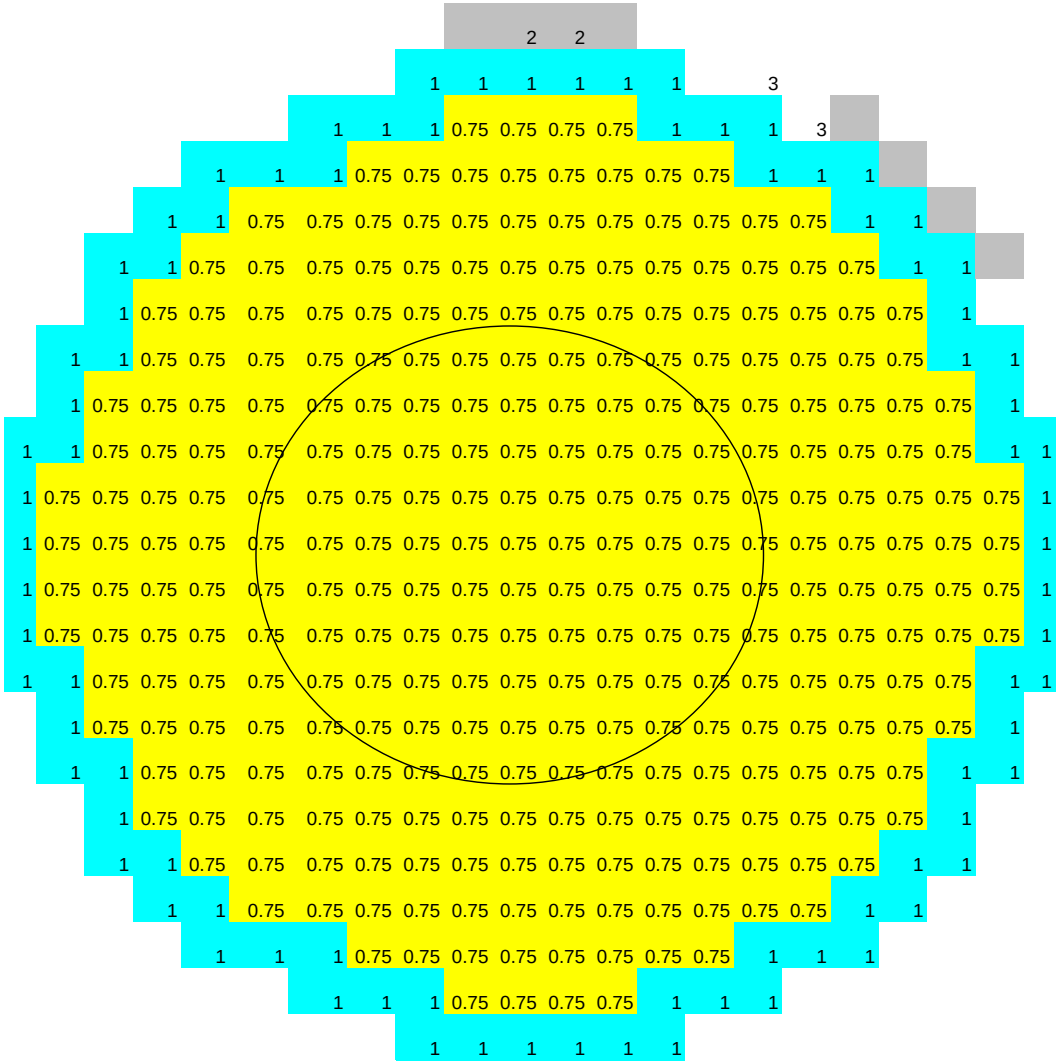
CASO 22 C



Corrente in	A	3.93512E-02
Corrente out	A	-3.93516E-02
Differenza	A	-4.61648E-07
"	%	-1.17315E-03
Corrente media	A	3.93514E-02
Impedenza	ohm	5.08241E+03

Somma dei gradi di "pieno"elementari	316
Numero di elementi	376
Grado di "pieno" medio	0.840425532
Grado di vuoto medio	0.159574468

CASO 23C



Corrente in	A	2.61029E-02
Corrente out	A	-2.61034E-02
Differenza	A	-4.49279E-07
"	%	-1.72118E-03
Corrente media	A	2.61031E-02
Impedenza	ohm	7.66191E+03

Somma dei gradi di "pieno"elementari	303
Numero di elementi	376
Grado di "pieno" medio	0.805851064
Grado di vuoto medio	0.194148936

CASO 24 C

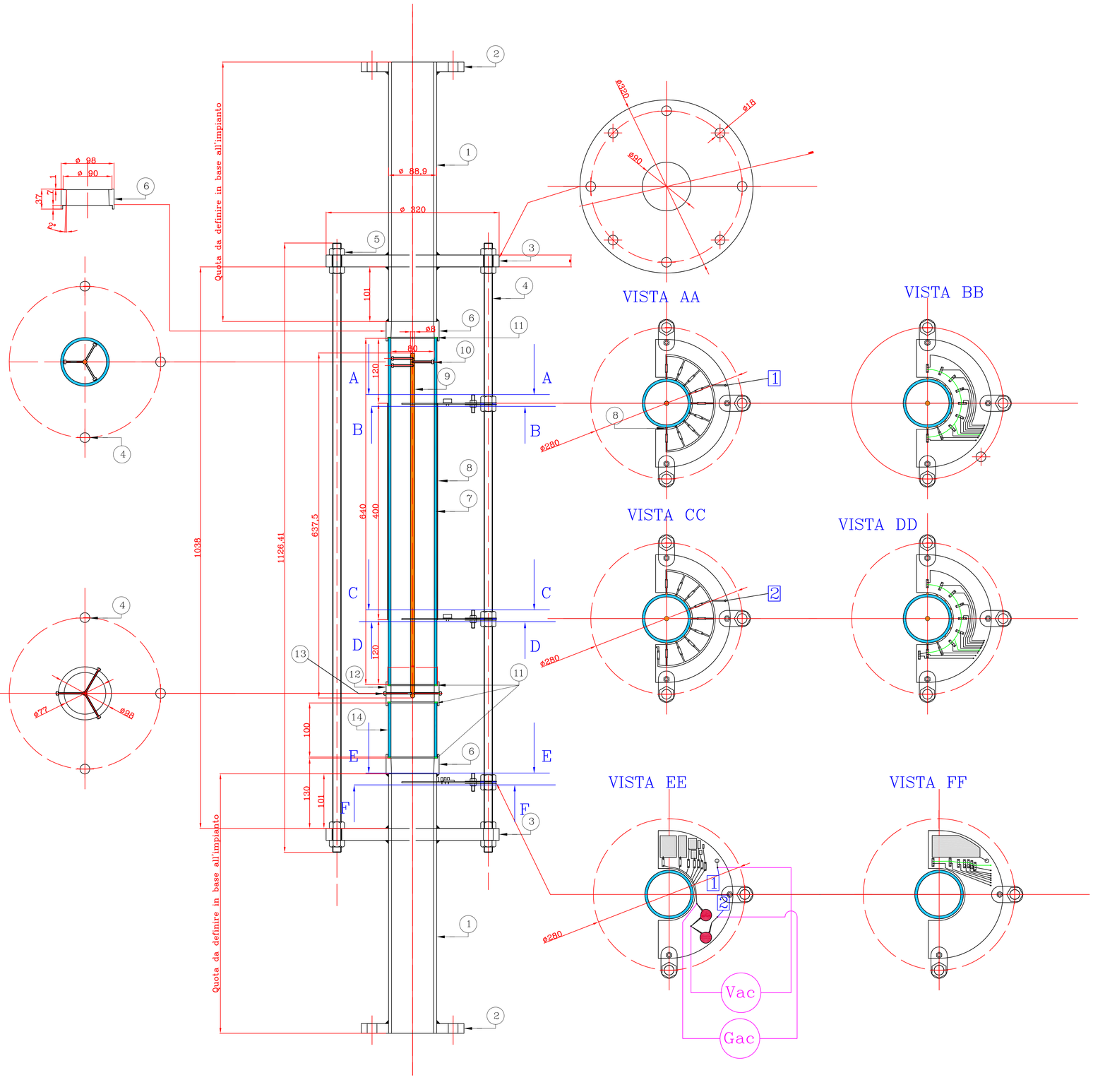
										2	2										
								0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75		3						
						0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	3					
				0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75				
			0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75			
		0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75		
		0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75		
	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	
	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	
0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	
	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	
		0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75		
		0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75		
			0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75			
				0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75				
						0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75						
								0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75								

Corrente in	A	5.93234E-03
Corrente out	A	-5.93229E-03
Differenza	A	5.76246E-08
"	%	9.71362E-04
Corrente media	A	5.93232E-03
Impedenza	ohm	3.37136E+04

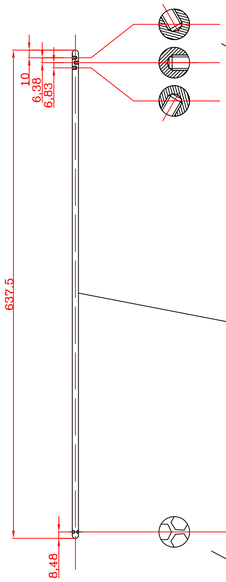
Somma dei gradi di "pieno"elementari	282
Numero di elementi	376
Grado di "pieno" medio	0.75
Grado di vuoto medio	0.25

Allegato 2

Disegno esecutivo dello strumento operante a freddo (077-00-00.dwg)



ELETTRODO CENTRALE



Tre fori filettati 4MA per una profondità del filetto di almeno 4 mm posti a quote diverse e ruotati di 120 °

Tondo pieno in AISI 304 diemetro esterno 8 mm lungheza totale 637.5 mm con finitura semisferica medinte tornitura delle estremità

Tre fori lisci e ciechi con terminazione a cono, diametro 4 mm profondità totale 3–3.5 mm posti su uno stesso piano a 120° l'uno dall'altro

POS.	DENOMINAZIONE	N° PEZZI	MATERIALE	NOTE
14	TUBO ø90 /80 L=100 MM	1	PLEXIGAS	
13	SPINA CENTRAGGIO M3X 46 MM	3	ASTM AISI 304	
12	ANELLO INTERCONNESSIONE PLEXIGLAS	1	ASTM AISI 304	MACHINED
11	GUARNIZIONE ø 92/81 SP. 2	4	SPIROMETALLICA	
10	SPINA CENTRAGGIO M4X34 MM	3	ASTM AISI 304	
9	ELETTRODO CENTRALE ø 8 MM L=637 MM	1	CU	
8	ELETTRODO LAMINA L=400 MM	9	CU	
7	TUBO ø90 /80 L=640 MM	1	PLEXIGAS	
6	DISCO TERMINALE ZONA TUBI INOX	2	ASTM A234 WPB	
5	DADO M16	30	ASTM AISI 304	
4	TIRANTE M18X1127	3	ASTM AISI 304	
3	FLANGIA DISTANZIATRICE 6" PN6	2	ASTM AISI 304	MACHINED
2	FLANGIA TERMINALE (DA DEFINIRE)	2	ASTM AISI 304	
1	TUBO 3" SCH. 40	2	ASTM AISI 304	

Rev.	Date	Modified	Dftm.	Controll.	Approv.

1					
0	14/09/2010	DRAFT	Greco, Achilli		

SIET sperimentiamo le tue idee
Piacenza – Italy

Strumentazione Speciale

Strumento Capacitivo per basse pressioni e basse temperature – disegno esecutivo

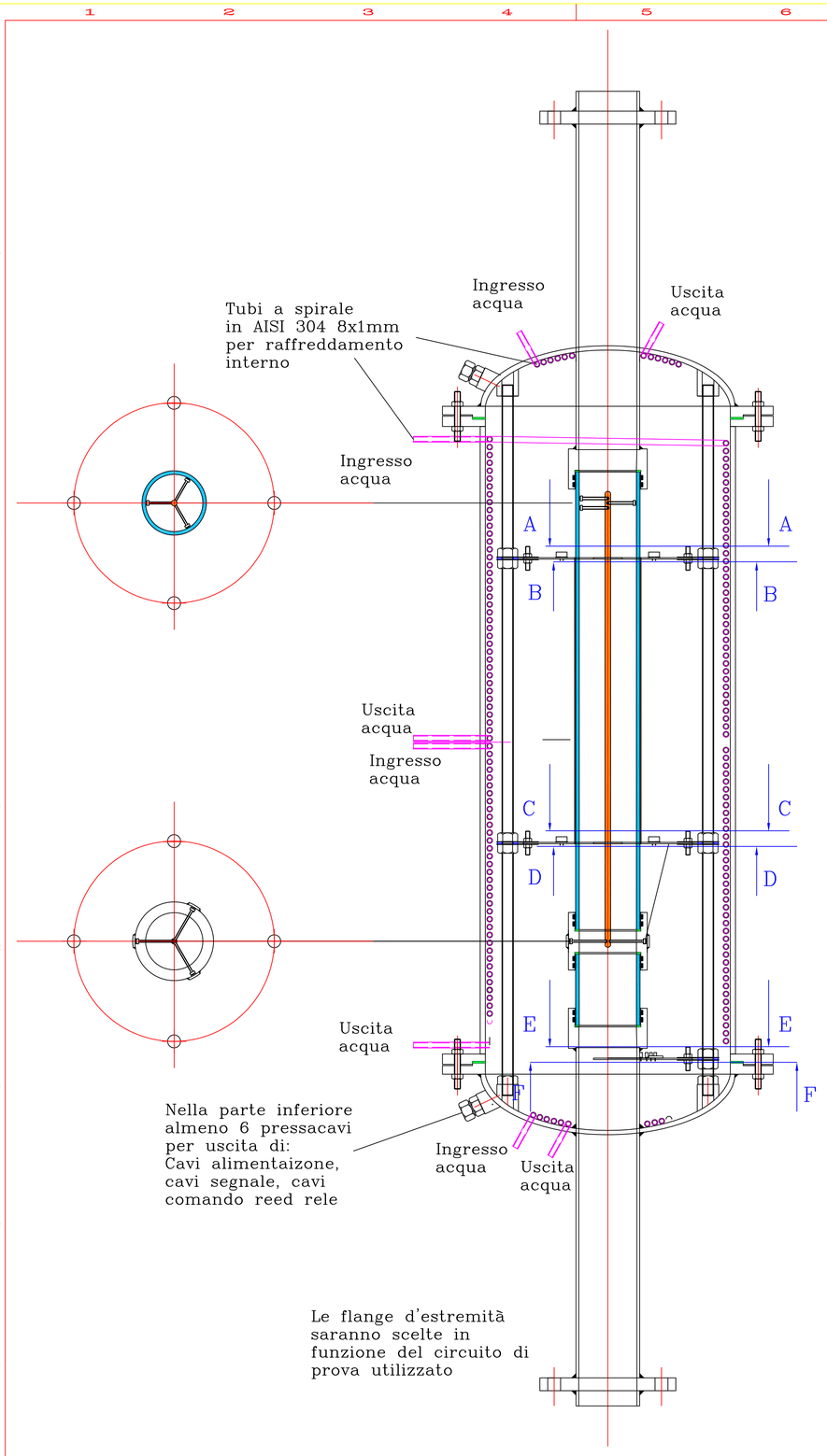
Scale	Dwg code	File	General code
1:4	077.00.00	077.00.00rev0.dwg	

File name:

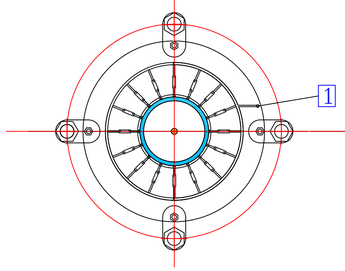
A1

Allegato 3

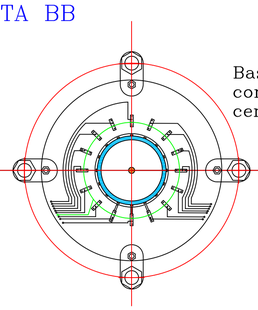
Schema concettuale della cella per strumento operante a caldo e in pressione (077-01-00.dwg)



VISTA AA

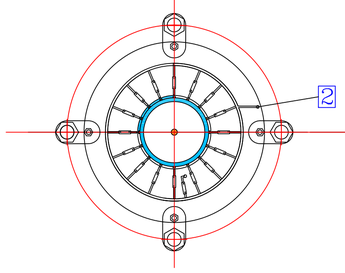


VISTA BB

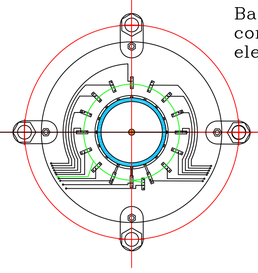


Basetta reed relè senza
connessisone elettrodo
centrale

VISTA CC

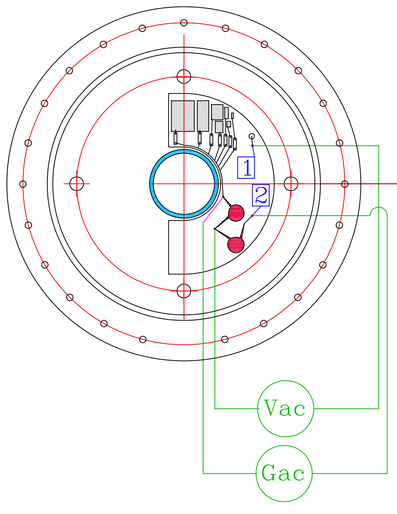


VISTA DD

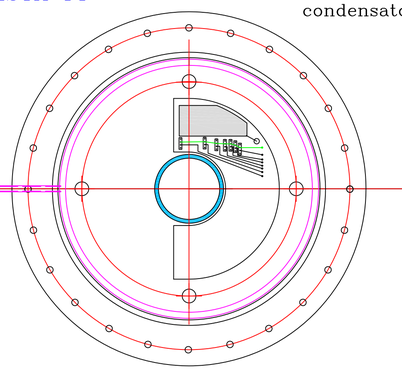


Basetta reed relè con
connessione per
elettrodo centrale

VISTA EE



VISTA FF



Basetta con
condensatore variabile

POS.	DENOMINAZIONE		N° PEZZI	MATERIALE		NOTE
0	14/09/2010	DRAFT	Greco, Achilli			
Rev.	Date	Modified	Dftm.		Controll.	Approv.

SIET sperimentiamo le tue idee
Piacenza – Italy

Strumentazione Speciale

Strumento Capacitivo per alte pressioni e alte temperature – schema concettuale

Scale	Dwg code	File	General code
1:4	077.01.00	077.01.00rev0.dwg	

File name:

A1