

Caratterizzazione dei parametri del plasma lineare della macchina GyM mediante l'utilizzo di una sonda di Langmuir

Luca Bianchi, Jasmine L. Canti, Silvia Freti, Luca Sacchi

Indice

1	Introduzione	4
2	Nozioni teoriche sull'esperimento	5
2.1	Parametri di plasma	5
2.2	Sonde di Langmuir	7
2.3	GyM	9
3	Prospetto delle misure	10
4	Costruzione del sistema di diagnostica	11
4.1	Progetto della sonda	11
4.2	Stima dell'area efficace della sonda	12
4.3	Costruzione della sonda	14
4.4	Calcolo e prima caratterizzazione della resistenza	15
4.5	Realizzazione del circuito	16
5	Analisi dati preliminare	19
5.1	Analisi manuale	19
5.2	Analisi al computer	22
5.3	Caratterizzazione ultima della resistenza	24
6	Analisi dei dati	26
6.1	Introduzione al programma utilizzato	26
6.2	Capacità parassita	27
6.3	Risultati dell'analisi	28
7	Commenti ai grafici	48
7.1	Confronto dei grafici a flusso 10 SCCM	48
7.2	Confronto dei grafici a flusso 20 SCCM	48
7.3	Confronto dei grafici a flusso 30 SCCM	48
7.4	Confronto dei grafici a potenza 20%	49
7.5	Confronto dei grafici a potenza 40%	49
7.6	Confronto dei grafici a potenza 80%	49
7.7	Profili di gradiente di pressione	49
7.8	Profili di campo elettrico	50
7.9	Velocità di deriva	50
8	Conclusioni	51

Appendice A	52
Appendice B	55
Riferimenti	64

Capitolo 1

Introduzione

Scopo dell'esperienza è stato costruire una diagnostica per un plasma debolmente magnetizzato.

Abbiamo realizzato tale diagnostica costruendo una sonda di Langmuir ed il rispettivo sistema di acquisizione.

Obiettivo dell'esperimento è lo studio della variazione dei parametri di plasma in funzione della posizione radiale della sonda.

Il sistema di lettura che abbiamo utilizzato è costituito da una resistenza, un generatore di onde sinusoidali, un amplificatore, un disaccoppiatore ottico e da un sistema di acquisizione.

L'analisi dei dati è svolta in una prima fase manualmente al fine di familiarizzare con le procedure che sono state in seguito utilizzate per l'analisi al computer.

Capitolo 2

Nozioni teoriche sull'esperimento

2.1 Parametri di plasma

I parametri di plasma sono utili criteri che ci permettono di stabilire se il gas è ionizzato o meno.

In essi rientrano la lunghezza di Debye e la frequenza di plasma.

Lunghezza di Debye

La lunghezza di Debye (λ_D) è la distanza spaziale entro la quale le cariche elettriche mobili schermano il campo elettrico all'interno di un plasma, ovvero è la distanza entro la quale si verifica una separazione di carica in modo significativo. Per ricavare la lunghezza di Debye non risolviamo l'equazione di Poisson in coordinate sferiche ma introduciamo alcune semplificazioni.

L'ipotesi adottata è quella di potenziale monodimensionale con la condizione di $n_i = n_e$ e $T_i = T_e$, rispettivamente densità e temperatura, dove con i pedici ci riferiamo rispettivamente a ioni ed elettroni.

L'equazione di Poisson con queste approssimazioni è:

$$\frac{\delta^2 \varphi}{\delta x^2} = \frac{qn_0(1 - \exp(-\frac{q\varphi}{K_b T_e}))}{\varepsilon_0},$$

con n_0 densità di carica al centro del plasma e q carica dell'elettrone, la cui soluzione, nel caso di piccola perturbazione, è:

$$\varphi(x) = \varphi_{ext} \exp\left(-\frac{x}{\lambda_D}\right),$$

$$\text{con } \lambda_D = \sqrt{\frac{\varepsilon_0 K_b T_e}{q^2 n_0}}.$$

A partire da questa lunghezza si può quindi determinare se il gas è ionizzato o meno.

Si ha la condizione di plasma se:

$$\sqrt[3]{\frac{1}{n_0}} \ll \lambda_D \ll \sqrt[3]{V},$$

con V volume del plasma.

La lunghezza di Debye definisce quindi la minima lunghezza per il moto indipendente di elettroni e ioni; dentro una sfera di raggio λ_D possono avvenire processi di singola particella.

Oltre la sfera di Debye elettroni e ioni si muovono gli uni rispetto agli altri come fossero un corpo unico. Questo fenomeno dà origine ai cosiddetti fenomeni collettivi.

Per fenomeni collettivi vale la seguente formula:

$$N_{particelle} \gg \frac{4}{3}\pi \left(\frac{T_e}{n_0}\right)^{\frac{3}{2}} n_0 \simeq (n_0 T_e)^{\frac{3}{2}} \gg 1.$$

Frequenza di plasma

Un altro importante fenomeno collettivo è costituito dalle oscillazioni di plasma. Utilizziamo anche in questo caso un modello monodimensionale.

Supponiamo che una parte di elettroni si sposti nella sezione S di una quantità x ortogonalmente a S.

In questo caso poniamo $n_i = n_o$, mentre $n_e = n_o \frac{L}{L+x}$.

Consideriamo la lastra di plasma di spessore L equivalente ad una distribuzione di carica superficiale posta in $x = 0$. Perturbando tale distribuzione si formerà un campo elettrico \mathbf{E} perpendicolare alla superficie S:

$$\mathbf{E} = \frac{\sigma}{2\epsilon_0},$$

dove σ è la densità superficiale di carica elettronica. Otteniamo dunque:

$$\sigma_{eq} = qn_0x.$$

Combinando le due espressioni si ottiene che la forza netta agente sugli elettroni è:

$$F = m_e \frac{\delta^2 x}{\delta t^2} = -\frac{q^2 n_0 x}{2\epsilon_0}.$$

Otteniamo dunque l'equazione di un moto oscillatorio:

$$\frac{\delta^2 x}{\delta t^2} = -\frac{q^2 n_0 x}{2\epsilon_0 m_e} = -w^2 x.$$

La legge per la dinamica degli elettroni diventa quindi:

$$m_e \frac{\delta^2 x}{\delta t^2} + \frac{q^2 n_0 x}{2\epsilon_0} = 0,$$

che è un moto di pulsazione.

Infine possiamo ricavare la frequenza di plasma f_{plasma} , che informa su quale sia il tempo tipico di risposta di un elettrone:

$$f_{plasma} = \frac{w_{eq}}{2\pi} = \frac{1}{T_{plasma}} = \sqrt{\frac{q^2 n_e}{2\epsilon_0}} = \frac{A}{2\pi\sqrt{n_e}};$$

inserendo le costanti fisiche otteniamo:

$$f_{plasma} = \frac{w_{eq}}{2\pi} = 8,98\sqrt{n_e} \simeq 10^{11} Hz,$$

con $n_e \simeq 10^{21} m^{-3}$.

Pertanto il campo elettrico dovuto ad eventuali disomogeneità di carica risulta suddiviso in una componente a corto raggio (le diffusioni libere nella sfera di Debye) ed in una a lungo raggio (fenomeni collettivi, come la frequenza di plasma).

2.2 Sonde di Langmuir

La diagnostica dei plasmi da laboratorio avviene usualmente attraverso dei metodi di contatto; fra questi le sonde di Langmuir sono le più utilizzate. Si tratta di oggetti conduttori inseriti nel plasma e connessi esternamente ad un sistema di acquisizione che permette di misurare i parametri locali di quest'ultimo. Tali oggetti conduttori devono essere costruiti con un materiale adatto a sostenere il calore emanato dal plasma senza esserne danneggiati e devono essere abbastanza piccoli da non perturbarlo globalmente.

La sonda è infatti costituita, di norma, da un involucro esterno cilindrico di ceramica termoresistente ed isolante, la quale avvolge un filo di acciaio che sporge dall'involucro per la raccolta della corrente. Il circuito elettrico esterno ci permette di misurare la corrente indotta sulla sonda in funzione della tensione fornita alla stessa.

Caratteristica V-I

La tipica caratteristica V-I di una sonda di Langmuir è suddivisibile in tre zone: per tensioni sufficientemente negative la sonda raccoglie principalmente ioni positivi e la rispettiva corrente è quindi denominata corrente di saturazione ionica; per tensioni superiori a quella del plasma la sonda raccoglie esclusivamente elettroni dunque la rispettiva corrente è denominata corrente di saturazione elettronica; la zona intermedia è denominata zona di transizione e presenta un andamento esponenziale della corrente. In corrispondenza della tensione di floating la corrente ionica bilancia esattamente quella elettronica.

Dalla caratteristica tensione-corrente V-I è possibile poi ricavare alcuni parametri quali il potenziale di plasma, la densità e la temperatura elettroniche.

$$\begin{aligned} I_e &= A j_e \\ &= A n_e \frac{\bar{v}}{4} \\ &= A n_e \sqrt{\frac{T_e}{2\pi m_e}}. \end{aligned}$$

Considerando la zona di transizione, sappiamo che la densità è data da

$$n_e = n_{e,0} \exp\left(-\frac{eV}{T_e}\right),$$

dove $n_{e,0}$ è la densità di elettroni nel plasma e n_e è quella percepita dalla sonda.

Sostituiamo dunque n_e con la relativa espressione in I_e :

$$I_e = An_{e,0} \sqrt{\frac{T_e}{2\pi m}} \exp\left(-\frac{eV}{T_e}\right).$$

Dato che

$$I_{e,sat} = An_{e,0} \sqrt{\frac{T_e}{2\pi m}},$$

otterremo

$$I_e = I_{e,sat} \exp\left(-\frac{e}{T_e}(V_{pr} - V_{pl})\right),$$

con V_{pr} potenziale della sonda e V_{pl} potenziale di plasma.

L'equazione precedente è un'esponenziale crescente; passando al logaritmo otteniamo l'equazione di una retta con coefficiente angolare pari a $(T_e)^{-1}$ eV:

$$\ln(I_e(V_{pr})) = \ln(I_{e,sat}) - \frac{eV_{pl}}{T_e} + \frac{eV_{pr}}{T_e}.$$

Ricaviamo anche

$$n_e = n_i = \frac{I_{i,sat}}{0.6ec_s A},$$

dove $c_s = \sqrt{\frac{T_e}{m_i}}$, con m_i massa degli ioni, idrogeno nel nostro caso.

Si dimostra infine che

$$V_{pl} = V_{fl} + \Lambda T_e,$$

dove Λ è una costante caratteristica del gas utilizzato, e

$$I_{tot,pr} = I_{sat} \left(1 - \exp\left(-\frac{V - V_{fl}}{T_e}\right)\right).$$

Fitteremo in seguito al computer i dati ottenuti con una curva rappresentante quest'ultima equazione.

Da tale fit ricaveremo poi i valori richiesti di T_e , I_{sat} e V_{fl} , dai quali troveremo n_e e V_{pl} .

2.3 GyM

L'esperimento è stato realizzato al fine di studiare il comportamento di un plasma all'interno di una macchina lineare.

La macchina utilizzata per l'esperimento, GyM, è fornita di una camera a vuoto di diametro interno 12,5 cm e lunghezza 210 cm, posta in un campo magnetico lineare generato da dieci bobine attraversate da corrente. La corrente massima apportabile alle bobine è di circa 1000 A, cui corrisponde un campo magnetico di 1,6 kG. La macchina è inoltre fornita di alcuni manipolatori atti all'inserimento e allo spostamento di sonde elettrostatiche all'interno del plasma.

Come sorgente di plasma ne viene utilizzata una a radio-frequenza in grado di fornire onde alla frequenza massima di 2,45 GHz. Tale sorgente, denominata Magnetron, è costituita da un filamento in tungsteno che fornisce carica elettrica emettendo elettroni che vengono accelerati attraverso l'idrogeno e da un magnete permanente posizionato in modo da avere il campo magnetico parallelo al filamento ed ortogonale al campo elettrico. Per la forza di Lorentz gli elettroni si muovono lungo spirali e si addensano in una cavità, dalla quale propagano modi con numeri d'onda discreti, che costituiscono le radio-frequenze cercate.

Il campo magnetico varia sulla lunghezza della camera a vuoto, presentando diversi punti di risonanza a seconda della corrente circolante nelle bobine.

Per quanto riguarda il nostro esperimento, lavoriamo con una corrente di 600 A, corrispondente ad un campo magnetico che, nella zona di interesse, vale 700 G.

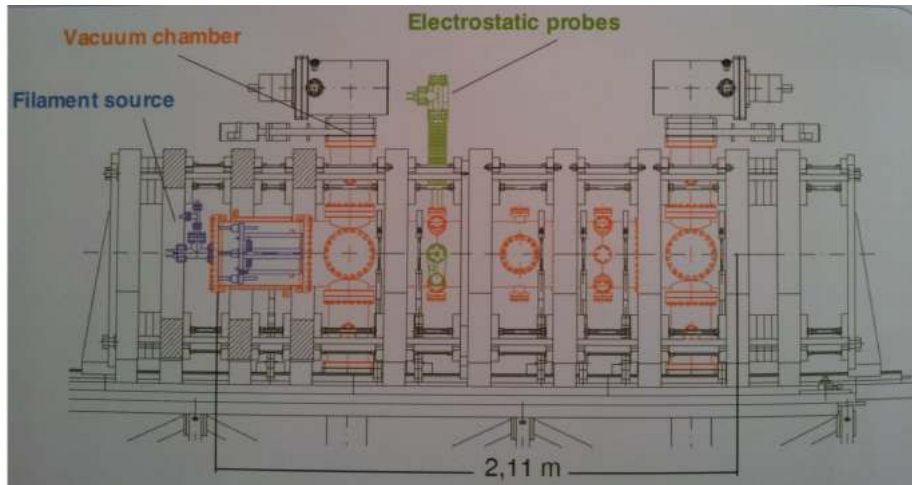


Figura 2.1: Pianta della macchina GyM.

Capitolo 3

Prospetto delle misure

Ci proponiamo dunque di ricavare i valori della densità elettronica n_e , della temperatura elettronica T_e e del potenziale di plasma V_{pl} , a diverse distanze della sonda dall'asse della macchina.

Nel corso dell'esperimento varieremo diversi parametri e analizzeremo il comportamento del plasma nei diversi casi.

In particolare, seguiremo il seguente schema di misurazioni:

- * in una prima fase testeremo l'acquisizione con delle misure di prova in due condizioni:

Campo magnetico [G]	Flusso [SCCM]	Microonde [W]	Pompaggio
700	20	478 (20%)	1 e 2 aperti
700	20	478 (20%)	1 chiuso

nel quale per gruppo di pompaggio 1 si intende quello che si trova sotto la risonanza del plasma.

- * in seguito acquisiremo i dati, mantenendo il gruppo di pompaggio sotto la risonanza chiuso, seguendo la traccia:

Campo magnetico [G]	Flusso [SCCM]	Microonde [W]
700	10	480 (20%)
700	10	985 (40%)
700	10	2015 (80%)
700	20	478 (20%)
700	20	984 (40%)
700	20	2040 (80%)
700	30	484 (20%)
700	30	985 (40%)
700	30	2012 (80%)

Capitolo 4

Costruzione del sistema di diagnostica

Abbiamo quindi stabilito che la sonda deve essere lunga complessivamente 12,5 cm per poter analizzare adeguatamente le caratteristiche del plasma sull'asse della macchina.

Ricaviamo ora la lunghezza della punta metallica della sonda, derivandola dal calcolo dell'area efficace. In seguito calcoleremo il valore della resistenza da applicare al circuito.

4.1 Progetto della sonda

Dobbiamo ora stabilire la lunghezza della sonda. Abbiamo a disposizione un manipolatore automatico per controllarne da remoto lo spostamento ed un'asta che funge da prolunga.

La sonda deve essere inserita nella flangia che si trova esattamente sopra la pompa turbo-molecolare e le sue dimensioni devono quindi tener conto del fatto che un'eventuale caduta di materiale potrebbe danneggiarla.

Abbiamo scelto un margine di sicurezza di circa 10 cm per scongiurare danni alla pompa.

Queste sono le misure effettuate, con riferimento alla figura 4.1:

- * Diametro interno della camera a vuoto: 25 cm
- * Diametro esterno della camera a vuoto: 25,6 cm
- * Distanza flangia-camera: 37,3 cm
- * Lunghezza manipolatore: 31,7 cm

Sommando il raggio della camera a vuoto con la distanza flangia-camera e la lunghezza del manipolatore otteniamo la distanza totale da coprire per raggiungere l'asse della camera. A questa sottraiamo la somma delle seguenti misure:

- * Lunghezza dell'asta: 57 cm
- * Corsa manipolatore: 14 cm

Il risultato, $L = 12,5$ cm, rappresenta la lunghezza complessiva che dovrà avere la nostra sonda.

4.2 Stima dell'area efficace della sonda

Assumiamo a priori, dai parametri della macchina, che:

- * Densità elettronica $n_e \simeq 10^{10} \text{ cm}^{-3}$
- * Temperatura elettronica $T_e \simeq 5 \text{ eV}$
- * Temperatura ionica $T_i \simeq 0,025 \text{ eV}$
- * Corrente massima di plasma $I_{max} \simeq 1 \text{ mA}$
- * Corrente di saturazione elettronica $I_{e,sat} \simeq 20 I_{i,sat}$

Presumibilmente la dimensione caratteristica della sonda sarà maggiore dei raggi di Larmor di elettroni e ioni. Approssimiamo quindi l'area di raccolta ad un'area efficace calcolabile come $A = L\phi$, con ϕ diametro del filo e L sua lunghezza.

L'area è legata alla corrente dalla relazione

$$I_{i,sat} = 0,6en_e c_s A,$$

con c_s velocità ionica del suono, e carica degli ioni e $n_e \simeq n_i$ la loro densità. Ricaviamo dunque l'area di raccolta della nostra sonda, imponendo $I_{max} \simeq I_{e,sat}$. Calcolando

$$c_s = 9,79 \cdot 10^5 \sqrt{T_e} \simeq 2,2 \cdot 10^6 \text{ cm/s},$$

Si ricava

$$A = \frac{I_{i,sat}}{0,6en_e} = 2,56 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^2.$$

Abbiamo a disposizione, per la parte metallica della sonda, 3 fili d'acciaio di diverso diametro, $\phi = 0,05$ cm, $\phi = 0,1$ cm e $\phi = 0,15$ cm. Scegliendo il filo di diametro $\phi = 0,05$ cm otteniamo che la punta metallica della nostra sonda dovrà essere lunga circa 0,5 cm.

Per stabilire in che regime siamo valutiamo la dimensione caratteristica della sonda, che per quelle di forma cilindrica vale

$$d \simeq R \ln \frac{\pi L}{4R},$$

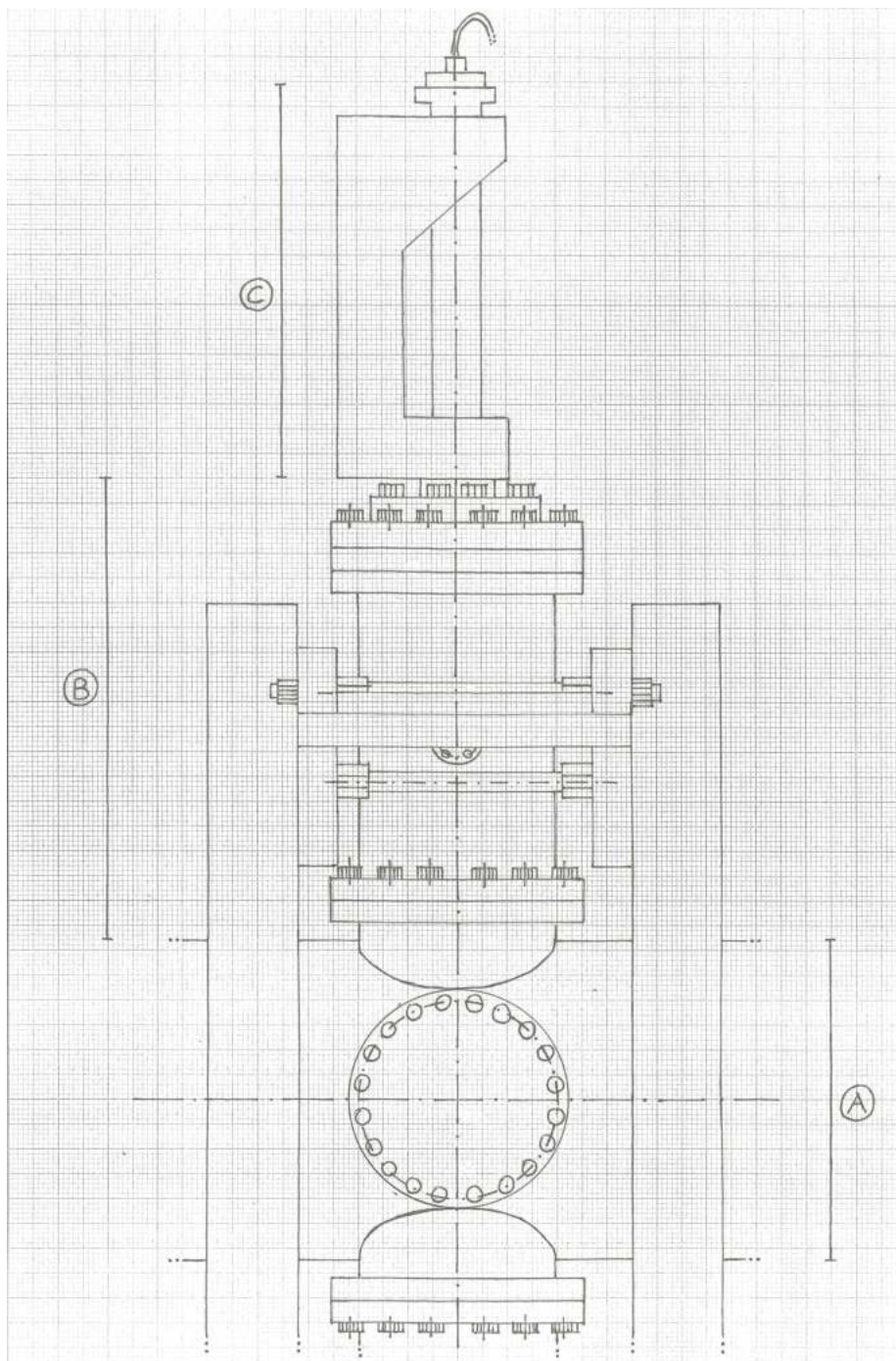


Figura 4.1: Vista laterale della macchina GyM. **A:** Camera a vuoto. **B:** Distanza flangia-camera. **C:** Manipolatore.

con L lunghezza della punta metallica e R raggio.
Dunque $d = 6,9 \cdot 10^{-2}$ cm.
Approssimativamente il campo magnetico, nella nostra zona di interesse, vale 700 G. Calcoliamo dunque i raggi di Larmor di ioni ed elettroni e la lunghezza di Debye per poi poterli confrontare con la dimensione caratteristica della sonda:

$$\begin{aligned}\lambda_{L,e} &= 2,38 \frac{\sqrt{T_e}}{B} = 7,6 \cdot 10^{-3} \text{ cm}, \\ \lambda_{L,i} &= 102 \frac{\sqrt{T_i}}{B} = 23 \cdot 10^{-3} \text{ cm}, \\ \lambda_{Debye} &= 745 \sqrt{\frac{T_e}{n_e}} = 1,6 \cdot 10^{-2} \text{ cm}.\end{aligned}$$

Rimane solo da valutare il libero cammino medio degli ioni.
Sappiamo che

$$\lambda_{mpf,i} = \frac{1}{n_H \sigma_{i,H}},$$

dove $\sigma_{i,H} \simeq 10^{-18} \text{ m}^2$ è la sezione d'urto degli ioni sugli atomi di idrogeno.
Sapendo che

$$n_H = 2,41 \cdot 10^{20} \text{ m}^{-3}, \quad \text{otteniamo} \quad \lambda_{mpf,i} = 0,5 \text{ m}.$$

Per gli elettroni invece è noto che

$$\sigma_{e,H} \simeq 10^{-19} \text{ m}^2, \quad \text{a } 5 \text{ eV},$$

da cui

$$\lambda_{mpf,e} = 5 \text{ m}.$$

I liberi cammini medi risultano allora molto maggiori della dimensione tipica della sonda.
Vale dunque il modello non collisionale nella nostra approssimazione di area efficace.

4.3 Costruzione della sonda

La sonda deve avere una lunghezza complessiva di 12,5 cm, ripartita fra corpo principale e punta.

Essa è costituita da un cilindretto di ceramica cavo, all'interno del quale viene fatto passare il filo di acciaio che, sporgendo di 0,5 cm dalla ceramica, va a costituire la punta della sonda. Il filo di acciaio viene poi saldato con uno di rame che permette di collegare il tutto al circuito esterno di acquisizione.

Abbiamo quindi tagliato il filo alla lunghezza desiderata. L'abbiamo poi saldato a quello di rame facendo rimanere la saldatura all'interno del corpo di ceramica, al fine di proteggerla; infine, dopo averlo infilato nella ceramica, abbiamo fissato il tutto con una particolare colla chiamata Torr Seal. La sonda è stata poi inserita sull'asta di sostegno collegata direttamente al manipolatore.

4.4 Calcolo e prima caratterizzazione della resistenza

Costruita la sonda, resta ora da realizzare la resistenza per il circuito di acquisizione.

Limitiamo quindi i valori possibili di resistenze a quelli in grado di sostenere la potenza fornita dal generatore, stimata attorno ai 0,25 W.

Sappiamo che la potenza dissipata si può anche calcolare come

$$P = RI^2 = VI = \frac{V^2}{R}.$$

Sapendo che la tensione massima che l'alimentatore è in grado di fornire è di circa $V = 35$ V, troviamo che la nostra resistenza deve valere

$$R \simeq 4,9 \text{ k}\Omega.$$

Costruiamo quindi un circuito finalizzato alla caratterizzazione della resistenza, schematizzato in figura 4.2.

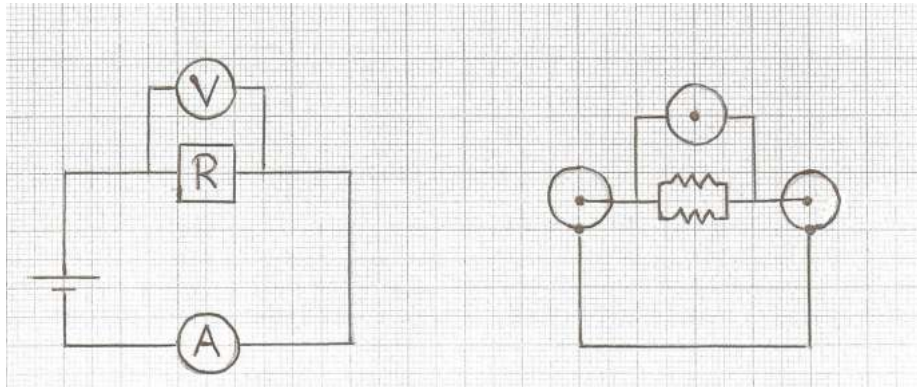


Figura 4.2: Schema del circuito per la caratteristica

Variando la tensione, otteniamo i seguenti dati:

Tensione[V]	Corrente[mA]
2,058	0,406
2,955	0,597
5,997	1,211
9,061	1,831
12,056	2,436
15,062	3,046
18,062	3,654
21,070	4,266
24,073	4,877
27,120	5,500
30,073	6,102
33,094	6,730

Abbiamo riportato su grafico i dati e il relativo fit nella figura 4.3, prima a mano e poi al computer.

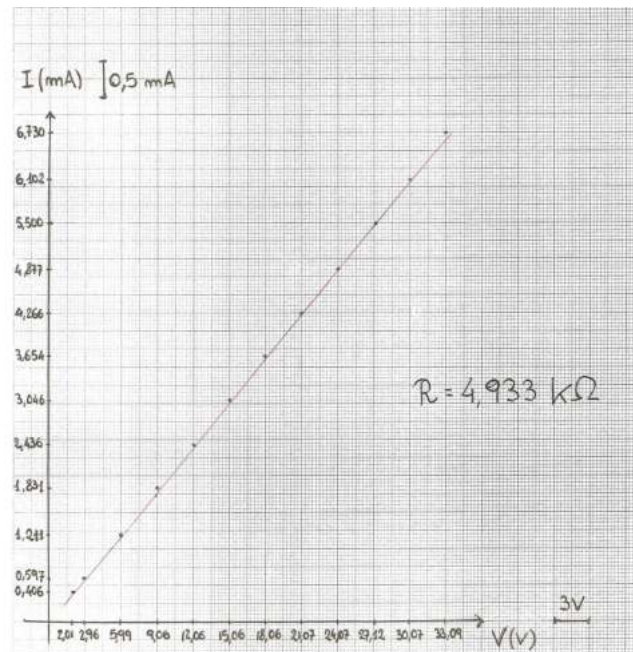
Ricaviamo dunque $R = 4,93 \text{ k}\Omega$ con entrambi i metodi.

4.5 Realizzazione del circuito

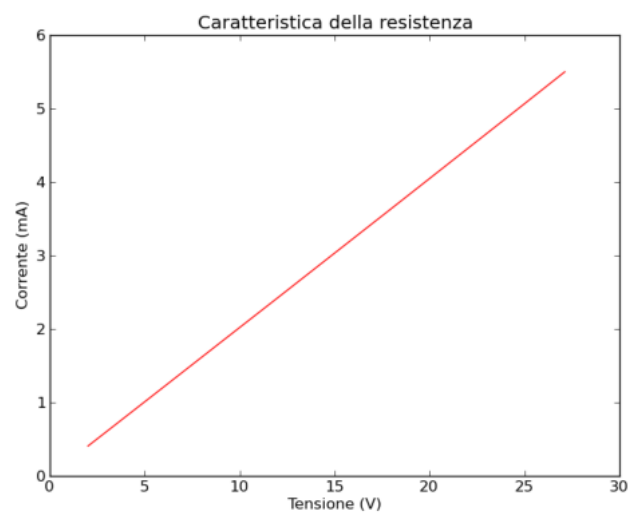
Saldando due resistenze da $10 \text{ k}\Omega$ abbiamo realizzato il resistore desiderato.

Collegiamo ora un generatore di tensione alternata ad un amplificatore con guadagno $A = 7,41$. Esso viene poi messo in comunicazione, passando per la resistenza, con il manipolatore, quindi con la sonda. Ai capi della resistenza viene collegato il disaccoppiatore ottico, che a sua volta rimanda al sistema di acquisizione (figura 4.4).

Misureremo quindi i valori di tensione forniti dal generatore e quelli misurati ai capi della resistenza. Da questi dati ricaveremo la tensione e la corrente presenti ai capi della sonda, grazie alle quali, tramite fitting, troveremo i parametri di plasma.



(a) Caratteristica a mano



(b) Caratteristica al computer

Figura 4.3: Grafici della caratteristica di $R = 4,93 \text{ k}\Omega$

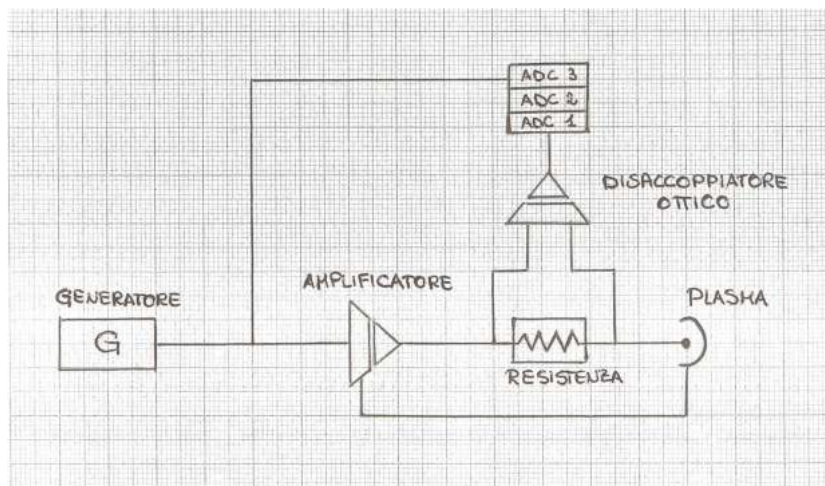


Figura 4.4: Schema del circuito per l'acquisizione

Capitolo 5

Analisi dati preliminare

In questa fase abbiamo testato il programma di analisi dati, confrontandolo con l'analoga analisi effettuata manualmente su carta millimetrata e logaritmica. Abbiamo inoltre potuto constatare che il valore della resistenza utilizzata era troppo elevato, in quanto saturava l'amplificatore ottico, il cui range varia tra -5 V e $+5\text{ V}$.

5.1 Analisi manuale

Prima di inserire la resistenza nel circuito progettato, ne costruiamo uno di prova costituito solo da:

- * un generatore di corrente continua;
- * un voltmetro collegato in parallelo con la resistenza;
- * la resistenza da $4,93\text{ k}\Omega$, collegata in serie con il generatore.

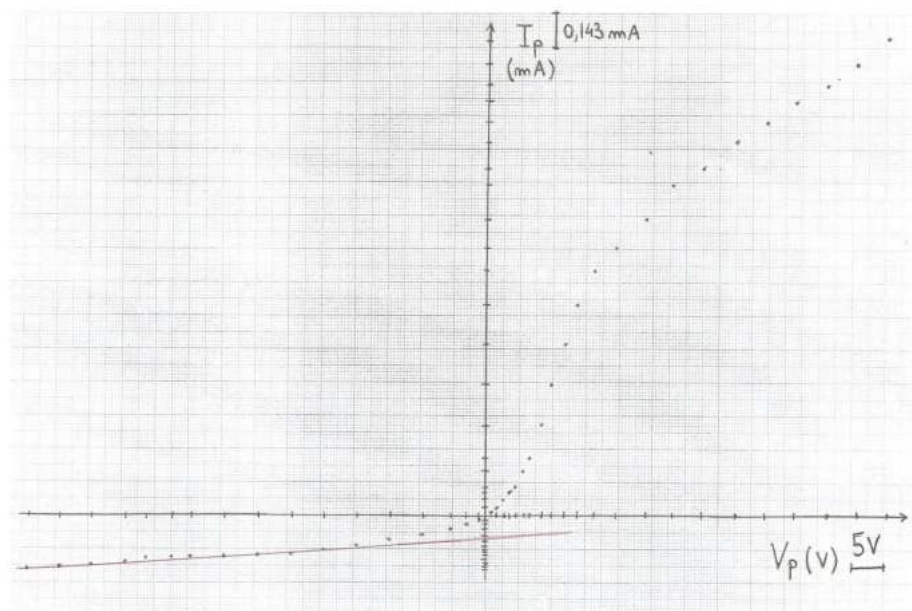
Variando la tensione di alimentazione V_{tot} , abbiamo misurato quella ai capi della resistenza V_R , a pressione $P = 2,08 \cdot 10^{-4}\text{ mBar}$, potenza 478 Watt , flusso 20 SCCM , campo magnetico 700 G , ottenendo i dati della tabella 5.1.

Procediamo ora con i fit manuali. Per prima cosa rappresentiamo la caratteristica Tensione-Corrente della sonda, dove

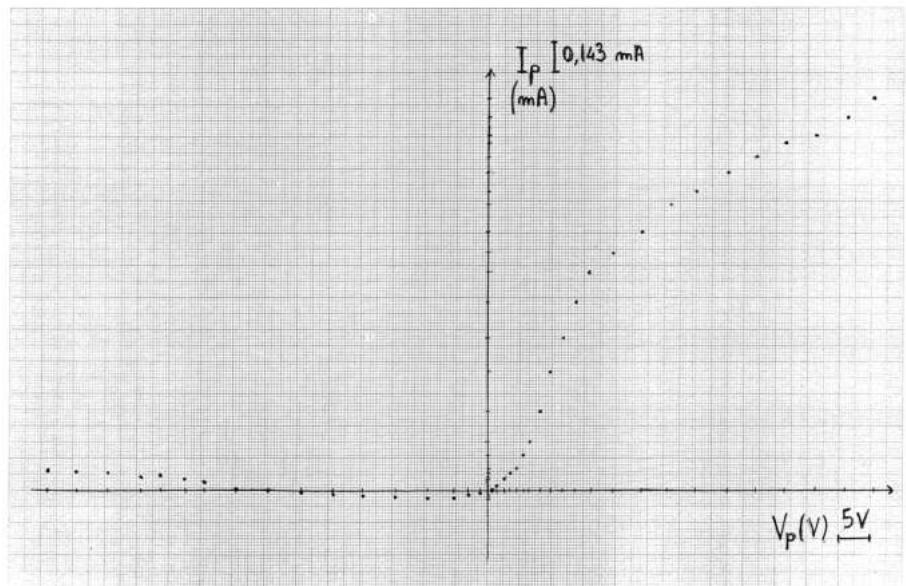
$$V_{probe} = V_{tot} - V_R \quad \text{e} \quad I_{probe} = \frac{V_R}{R}.$$

Quindi fittiamo con una retta la regione di saturazione ionica (figura 5.1a), sottraiamo la corrente ionica a quella totale (5.1b) ed infine rappresentiamo il plot di $\log I_e$ in funzione di V_{probe} e fittiamo separatamente con due rette la zona di transizione e quella di saturazione elettronica (figura 5.2).

Ricaveremo la temperatura elettronica dall'inverso del coefficiente angolare della retta che fitta la zona di transizione, la densità elettronica dal fit della saturazione ionica e il potenziale di plasma dall'intersezione delle rette del grafico di figura 5.2.



(a) Plot dei dati con fit lineare nella regione di saturazione ionica.



(b) Sottrazione della corrente di saturazione ionica a mano

Figura 5.1: Prime due fasi dei fit manuali

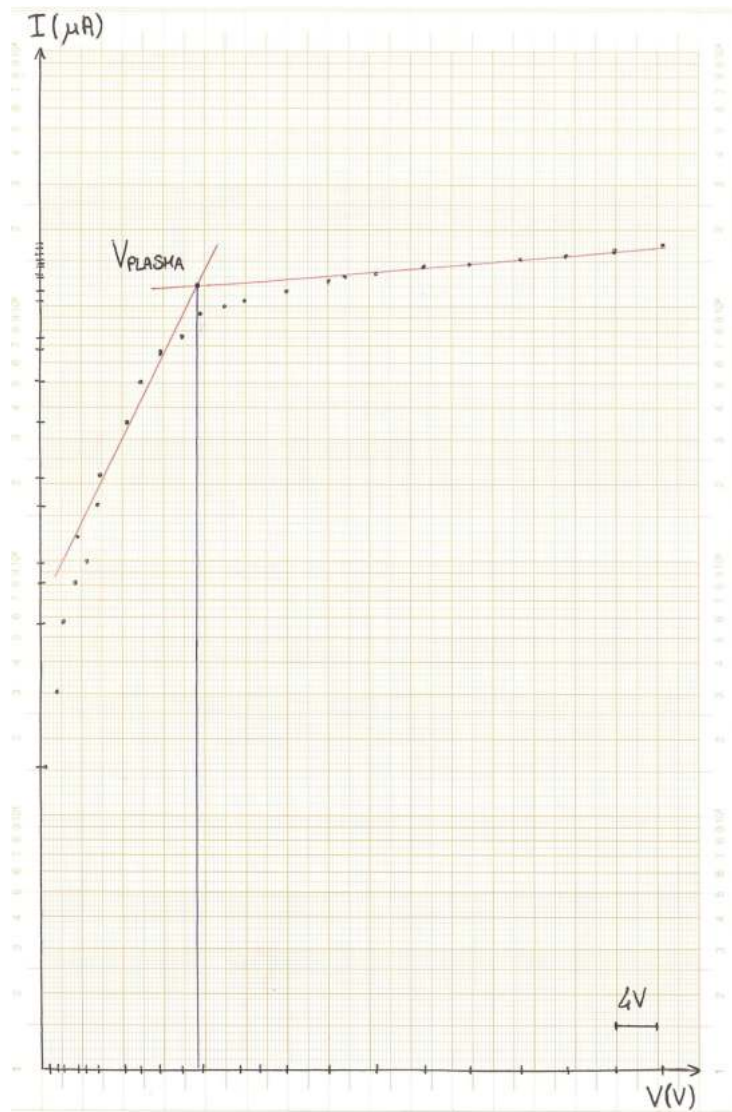


Figura 5.2: Fit a due rette della regione di saturazione elettronica e del logaritmo della corrente nella zona di transizione.

Tabella 5.1: Misure della tensione ai capi della resistenza in funzione della tensione di alimentazione, entrambe in Volt

V_R	V_{tot}	V_R	V_{tot}	V_R	V_{tot}
-1,13	-70,46	-0,56	-15,01	5,67	25,15
-1,09	-65,45	-0,45	-10,01	6,26	30,21
-1,05	-60,50	-0,31	-4,99	6,96	35,13
-0,99	-55,34	0,11	0,95	7,34	40,09
-0,95	-50,29	0,21	1,94	7,91	45,32
-0,93	-48,26	0,33	2,93	8,33	50,26
-0,86	-40,25	0,48	4,01	8,72	55,42
-0,85	-35,20	0,58	5,01	9,06	60,38
-0,80	-30,09	1,90	10,23	9,53	65,39
-0,73	-25,09	3,62	15,32	10,06	70,50
-0,64	-20,07	4,77	20,04	-	-

Abbiamo quindi trovato

$$\begin{aligned}
 T_e &= 5,21 \text{ eV}, \\
 n_e &= 4,14 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}, \\
 V_{plasma} &= 15,20 \text{ V}.
 \end{aligned}$$

5.2 Analisi al computer

Abbiamo realizzato un programma (Appendice B, codice 1), che legge i dati da un file esterno e li rappresenta su un grafico, eseguendone poi il fit.

Il programma ripercorre esattamente i passaggi dell'analisi su carta, riportati da figura 5.3 a figura 5.7.

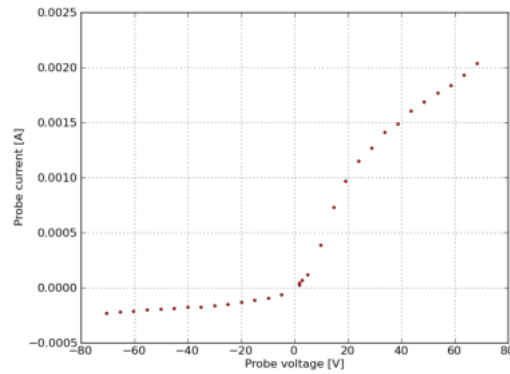


Figura 5.3: Stampa al computer dei dati raccolti

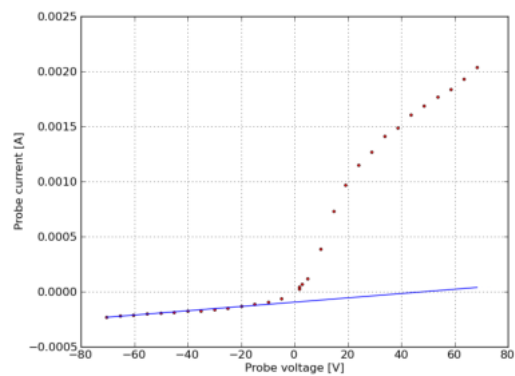


Figura 5.4: Fit al computer con una retta della zona di saturazione ionica

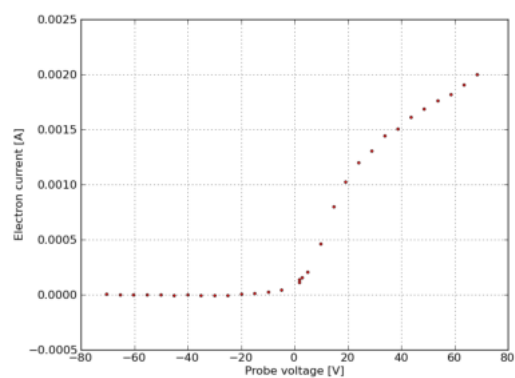


Figura 5.5: Sottrazione della corrente di saturazione ionica al computer

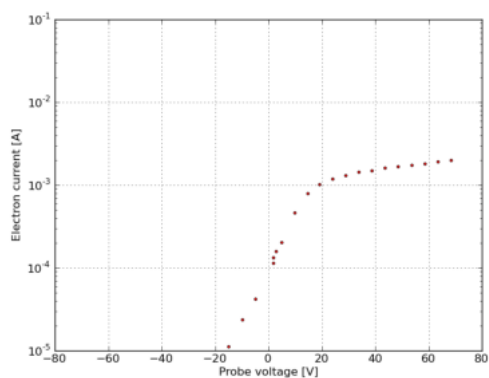


Figura 5.6: Grafico al computer con il logaritmo dell'intensità di corrente

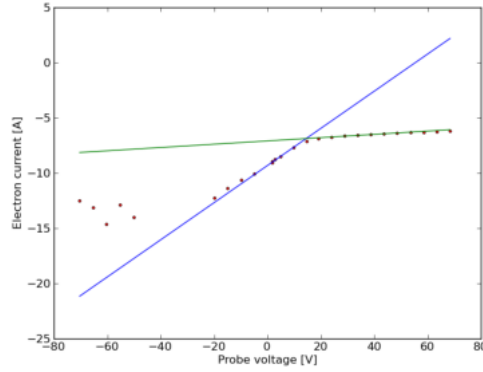


Figura 5.7: Fit a due rette della regione di saturazione elettronica e del logaritmo della corrente nella zona di transizione.

Abbiamo quindi trovato

$$\begin{aligned} T_e &= 5,94 \text{ eV}, \\ n_e &= 4,07 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}, \\ V_{plasma} &= 14,54 \text{ V}. \end{aligned}$$

5.3 Caratterizzazione ultima della resistenza

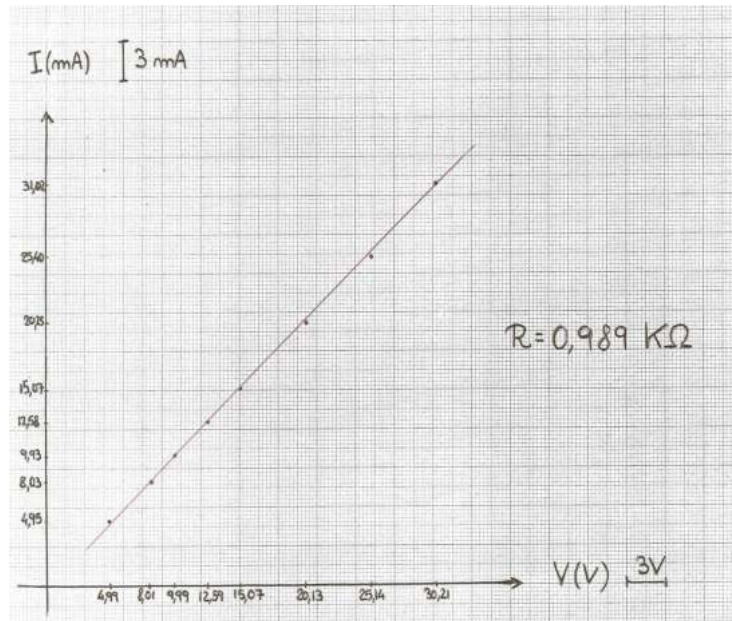
Dai dati acquisiti abbiamo potuto notare che la tensione ai capi della resistenza superava il range accettabile per l'amplificatore. Abbiamo quindi deciso di diminuire la resistenza in modo da ottenere una tensione ai suoi capi inferiore ai 5 V massimi consentiti.

Supponendo costante la corrente e imponendo il limite richiesto alla tensione sulla resistenza abbiamo valutato che una resistenza ideale avrebbe dovuto avere un valore di circa $1 \text{ k}\Omega$.

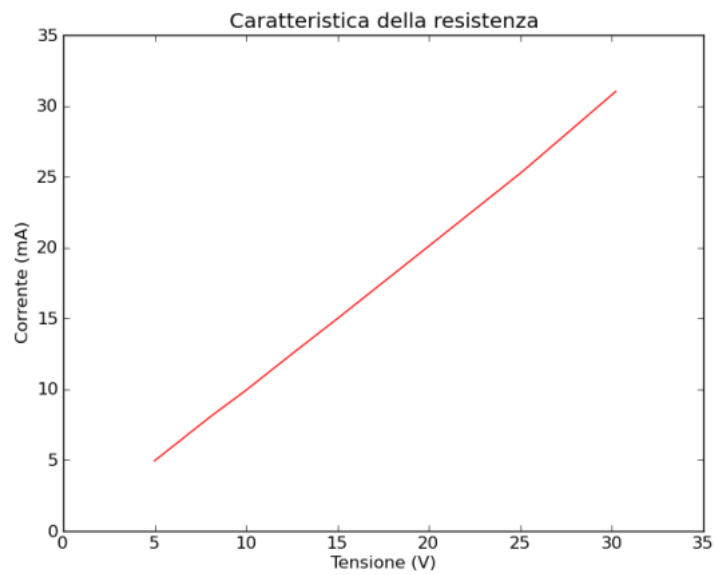
Abbiamo dunque caratterizzato la nuova resistenza:

Tensione[V]	Corrente[mA]
4,99	4,95
8,01	8,03
9,99	9,93
12,59	12,58
15,07	15,07
20,13	20,25
25,14	25,40
30,21	31,02

Abbiamo riportato su grafico i dati e il relativo fit nella figura 5.8, prima a mano e poi al computer.



(a) Caratteristica a mano: $R = 0,989 \text{ k}\Omega$



(b) Caratteristica al computer: $R = 0,998 \text{ k}\Omega$

Figura 5.8: Grafici della caratteristica di $R \simeq 1 \text{ k}\Omega$

Capitolo 6

Analisi dei dati

Dopo l'analisi di prova abbiamo collegato la sonda al circuito definitivo di figura 4.4 a pagina 18.

L'acquisizione avviene ora da remoto. Per l'analisi viene utilizzato quattro programmi da noi appositamente creati per questo esperimento.

6.1 Introduzione al programma utilizzato

Il programma utilizzato per l'analisi dei dati (Appendice B, codice 3) esegue un fit ciclico in cui i parametri ottenuti dall'iterazione $n - 1$ vengono ripresi come valori iniziali dei parametri per l'iterazione n .

Il sistema di acquisizione ci fornisce la tensione fornita dal generatore e quella presente ai capi della resistenza. Ricaviamo la tensione percepita dalla sonda come $V_{probe} = V_{gen} - V_r$, e la corrente passante nella stessa come $I_{probe} = \frac{V_r}{R}$, con R la nostra resistenza.

Il programma esegue un fit a quattro parametri sulla curva:

$$I_{probe} = I_{i,sat} \left[\alpha(V_{probe} - V_{fl}) + 1 - \exp\left(\frac{V_{probe} - V_{fl}}{T_e}\right) \right],$$

dove come parametri abbiamo:

- * Tensione di floating V_{fl} ;
- * Temperatura elettronica T_e ;
- * Corrente di saturazione ionica $I_{i,sat}$;
- * Parametro di correzione α .

Il parametro di correzione è stato aggiunto per evitare di fittare la zona di saturazione ionica con un asintoto orizzontale. Con l'aggiunta di questo parametro tale regione viene fittata con una retta obliqua, risultando così più fedele ai dati sperimentali.

Il programma ha come scopo ultimo il calcolo del potenziale di plasma, della temperatura e della densità elettroniche. La temperatura elettronica viene trovata come parametro del fit, le altre due grandezze si ricavano come:

$$n_e = \frac{I_{i,sat}}{0.6ec_s A}$$

$$V_{pl} = V_{fl} + \Lambda T_e,$$

dove la costante di floating Λ è una grandezza dipendente dal gas utilizzato. Nel caso dell'idrogeno tale costante vale $3 \frac{V}{eV}$. In questo modo troviamo tre parametri per ogni posizione. Per ottenere poi un profilo radiale, interpoliamo i dati nel programma numero 2 dell'appendice B.

6.2 Capacità parassita

Dopo una prima rappresentazione grafica dei dati abbiamo osservato che i valori della corrente corrispondenti alla rampa di salita della tensione si discostavano sensibilmente da quelli della rampa di discesa.

Abbiamo quindi ipotizzato che tale effetto fosse dovuto alla presenza di una capacità parassita.

Di seguito si riporta il calcolo di quest'ultima.

$$V_{pl} + \frac{Q}{C_p} + IR + V(t) = 0,$$

Consideriamo la zona di saturazione ionica dove l'andamento della caratteristica risulta essere lineare e può essere quindi definita una resistenza di plasma. Facendo la derivata rispetto al tempo

$$\begin{aligned} \frac{dV_{pl}}{dt} + \frac{I}{C_p} + \dot{I}R + \frac{dV}{dt}, \\ (R + R_p)\frac{dI}{dt} + \frac{I}{C_p} + \frac{dV}{dt} = 0. \end{aligned}$$

Il generatore fornisce un segnale triangolare; considerando solo la rampa in salita:

$$(R + R_p)\frac{dI}{dt} + \frac{I}{C_p} + \alpha = 0.$$

Troviamo la soluzione omogenea dell'equazione differenziale:

$$\begin{aligned} (R + R_p)\dot{I} &= -\frac{I}{C_p}, \\ \frac{\dot{I}}{I} &= -\frac{1}{(R + R_p)C_p}, \\ d(\log I) &= -\frac{1}{(R + R_p)C_p} dt, \\ I &= I_0 \exp\left(-\frac{1}{(R + R_p)C_p} t\right). \end{aligned}$$

La soluzione disomogenea è

$$I = -\alpha C_p,$$

avremo quindi

$$I = I_0 \exp\left(-\frac{1}{(R + R_p)C_p}t\right) - \alpha C_p.$$

Nella fase di discesa dell'onda triangolare abbiamo che

$$V(t) = -\alpha t + \beta.$$

Poiché $I_{salita} - I_{discesa} = -2\alpha C_p$ e sapendo che $I_{salita} = -0,258$ mA e $I_{discesa} = -0,226$ mA, e che α rappresenta il rapporto fra l'ampiezza dell'onda fornita dal generatore ($6V \cdot 7,41$) e il semiperiodo (2 ms), si ricava $C_p = 6,75 \cdot 10^{-10}$ F.

Introduciamo quindi nel programma (Appendice B, codice 3) una correzione che tenga conto dell'azione della capacità parassita.

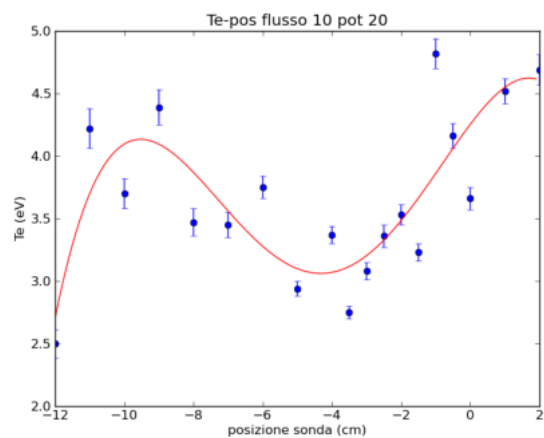
6.3 Risultati dell'analisi

Effettuiamo l'analisi dati seguendo lo schema presentato precedentemente.

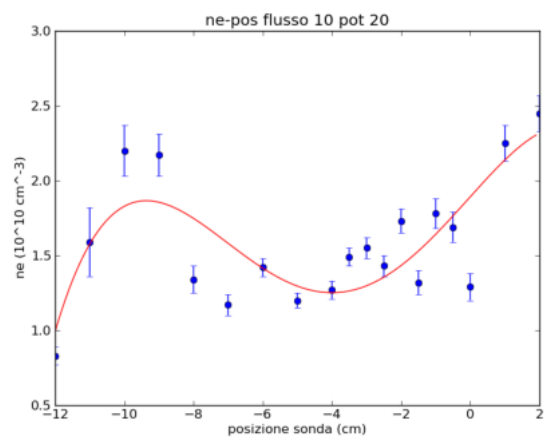
Studiamo i profili assiali di potenziale di plasma e di temperatura e densità elettroniche al variare del flusso di idrogeno e della potenza delle microonde. Rappresentiamo poi i profili del campo elettrico e del gradiente di pressione utilizzando i programmi 4 e 5, riportati nell'appendice B.

Infine, dopo aver ricavato il campo elettrico, troviamo la velocità di deriva delle particelle come $v_d = \frac{\mathbf{E} \times \mathbf{B}}{B^2}$, con \mathbf{B} supposto costante, parallelo all'asse della macchina e di valore $7 \cdot 10^{-2}$ T. Per ricavare il campo elettrico utile per il calcolo della velocità di deriva fittiamo la zona del potenziale di plasma avente gradiente non nullo con una retta. Dal coefficiente angolare di tale retta ricaviamo il valore del campo elettrico in [V/m] che, diviso per l'intensità del campo magnetico, dà il modulo della velocità cercata.

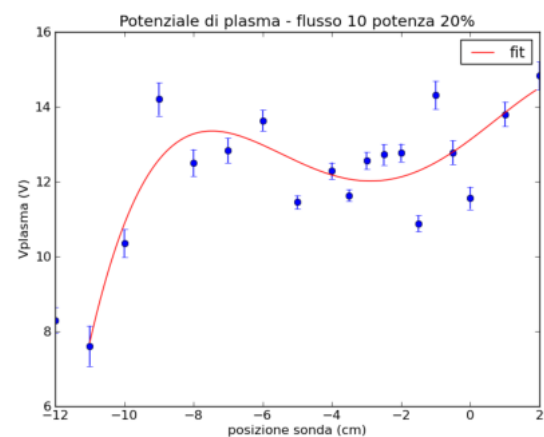
Le posizioni della sonda sono misurate a partire dall'asse della macchina, ponendo come verso positivo quello che dall'asse va in direzione della pompa turbo-molecolare.



(a) Temperatura elettronica in funzione della posizione

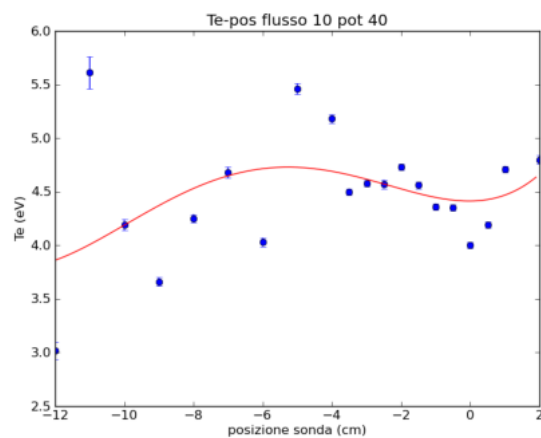


(b) Densità elettronica in funzione della posizione

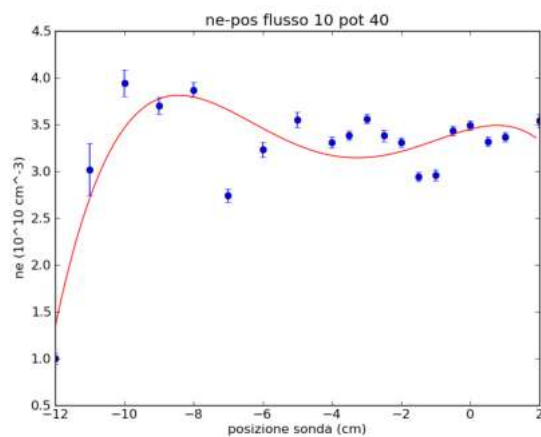


(c) Potenziale di plasma in funzione della posizione

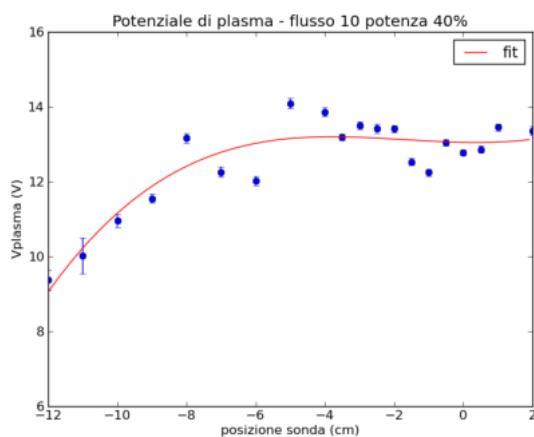
Figura 6.1: Flusso 10 SCCM; Potenza 480 W (20%); Pressione: $2,98 \cdot 10^{-4}$ mBar;
Campo magnetico: 700 G.



(a) Temperatura elettronica in funzione della posizione

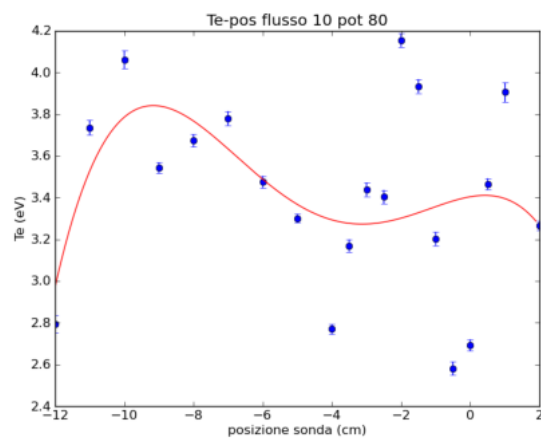


(b) Densità elettronica in funzione della posizione

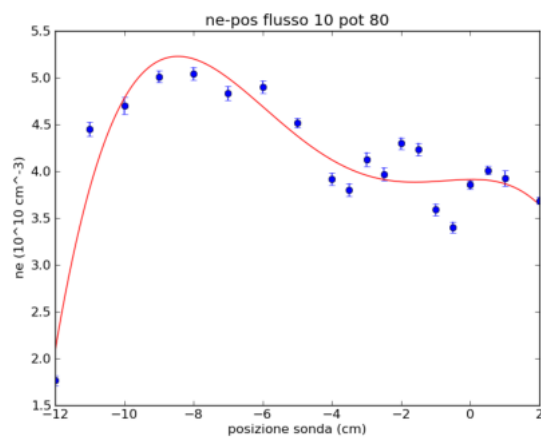


(c) Potenziale di plasma in funzione della posizione

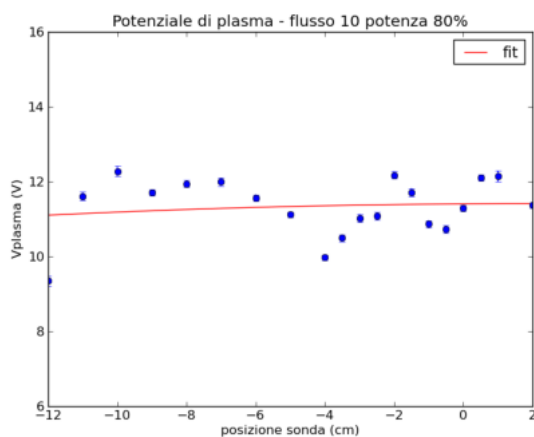
Figura 6.2: Flusso 10 SCCM; Potenza 985 W (40%); Pressione: $2,96 \cdot 10^{-4}$ mBar; Campo magnetico: 700 G.



(a) Temperatura elettronica in funzione della posizione

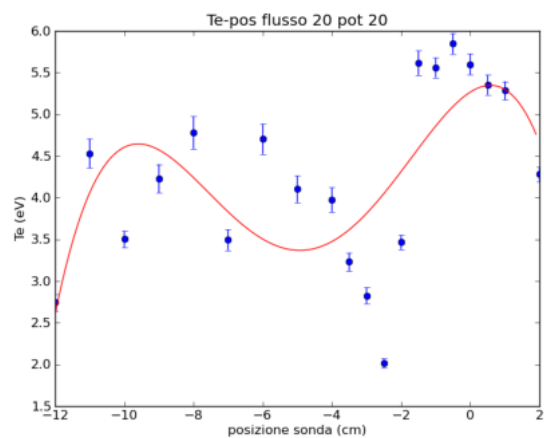


(b) Densità elettronica in funzione della posizione

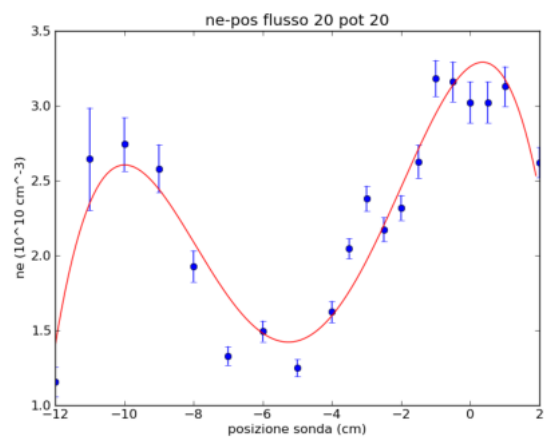


(c) Potenziale di plasma in funzione della posizione

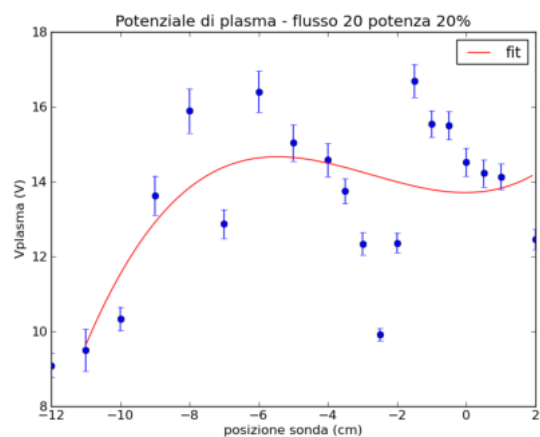
Figura 6.3: Flusso 10 SCCM; Potenza 2012 W (80%); Pressione: $2,98 \cdot 10^{-4}$ mBar; Campo magnetico: 700 G.



(a) Temperatura elettronica in funzione della posizione

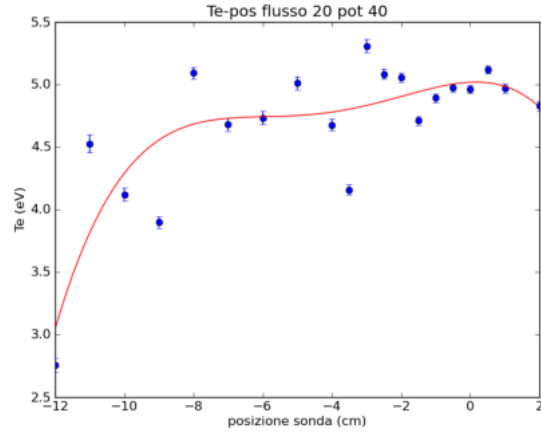


(b) Densità elettronica in funzione della posizione

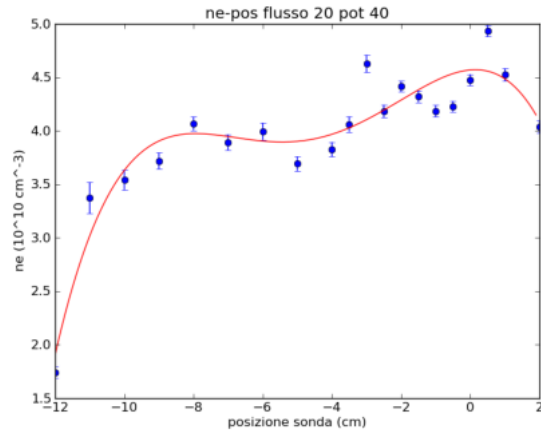


(c) Potenziale di plasma in funzione della posizione

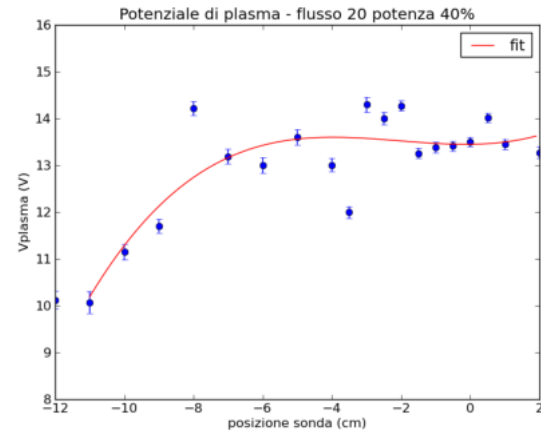
Figura 6.4: Flusso 20 SCCM; Potenza 478 W (20%); Pressione: $4,85 \cdot 10^{-4}$ mBar;
Campo magnetico: 700 G.



(a) Temperatura elettronica in funzione della posizione

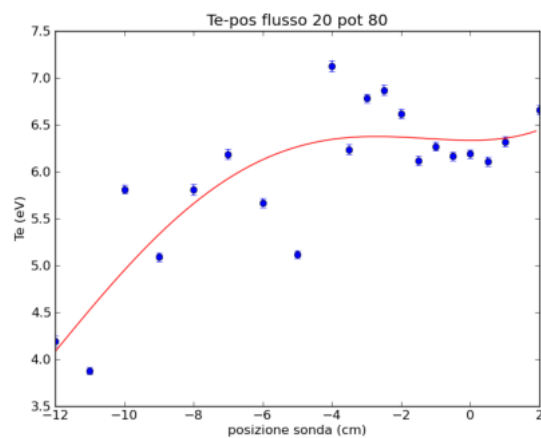


(b) Densità elettronica in funzione della posizione

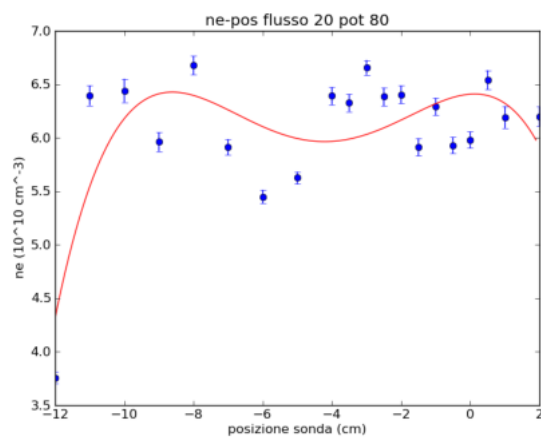


(c) Potenziale di plasma in funzione della posizione

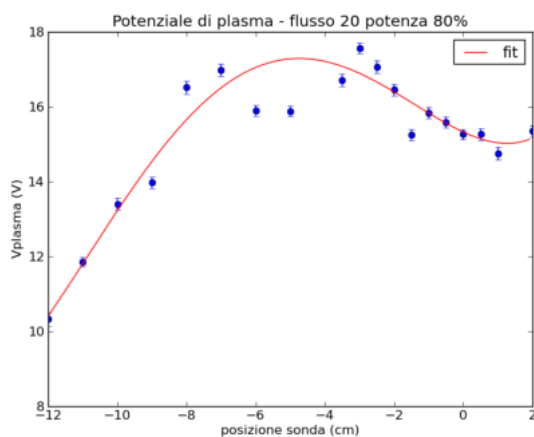
Figura 6.5: Flusso 20 SCCM; Potenza 984 W (40%); Pressione: $4,89 \cdot 10^{-4}$ mBar;
Campo magnetico: 700 G.



(a) Temperatura elettronica in funzione della posizione

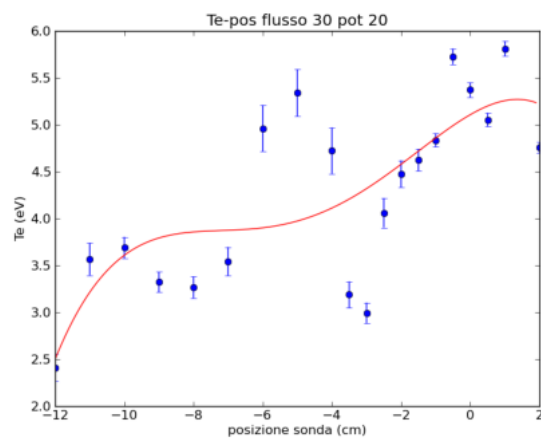


(b) Densità elettronica in funzione della posizione

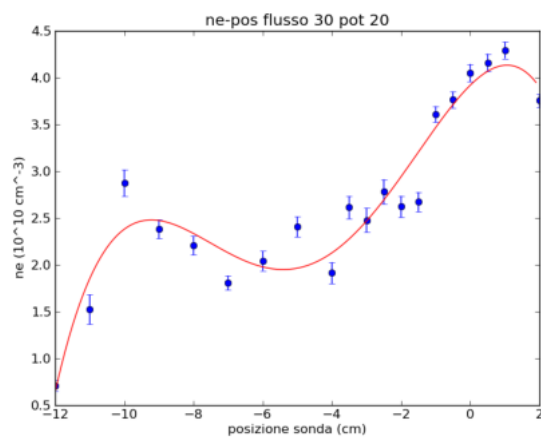


(c) Potenziale di plasma in funzione della posizione

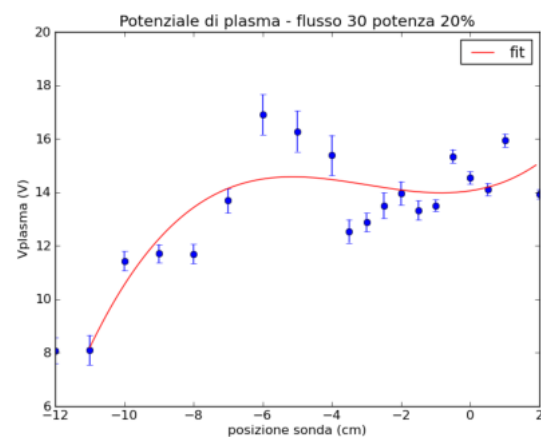
Figura 6.6: Flusso 20 SCCM; Potenza 2040 W (80%); Pressione: $4,80 \cdot 10^{-4}$ mBar;
Campo magnetico: 700 G.



(a) Temperatura elettronica in funzione della posizione

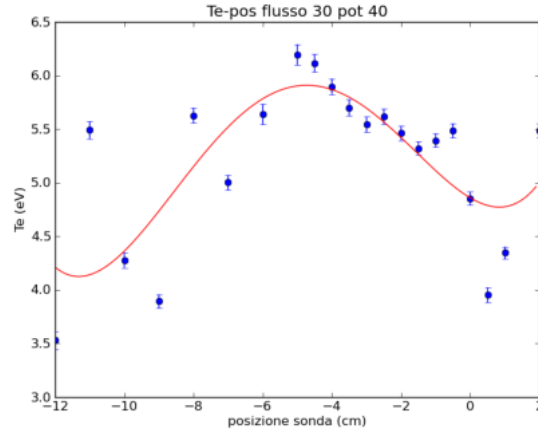


(b) Densità elettronica in funzione della posizione

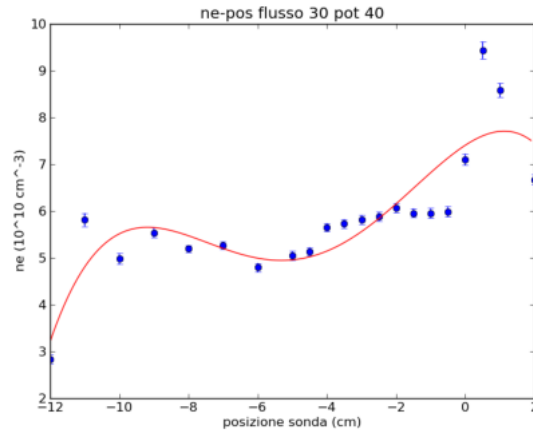


(c) Potenziale di plasma in funzione della posizione

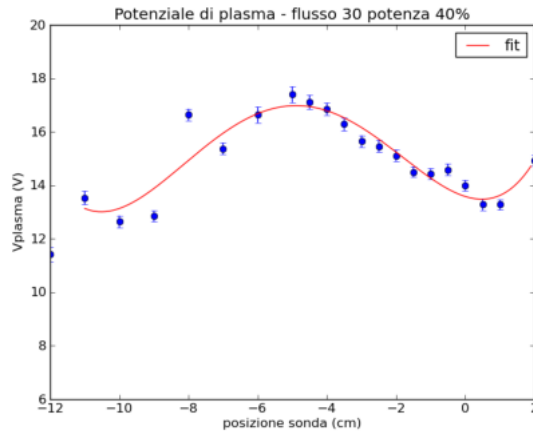
Figura 6.7: Flusso 30 SCCM; Potenza 484 W (20%); Pressione: $6,88 \cdot 10^{-4}$ mBar; Campo magnetico: 700 G.



(a) Temperatura elettronica in funzione della posizione

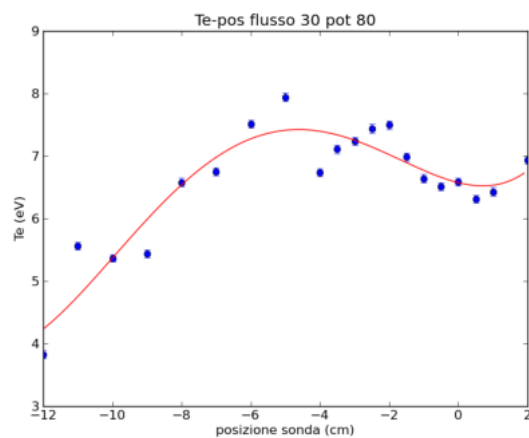


(b) Densità elettronica in funzione della posizione

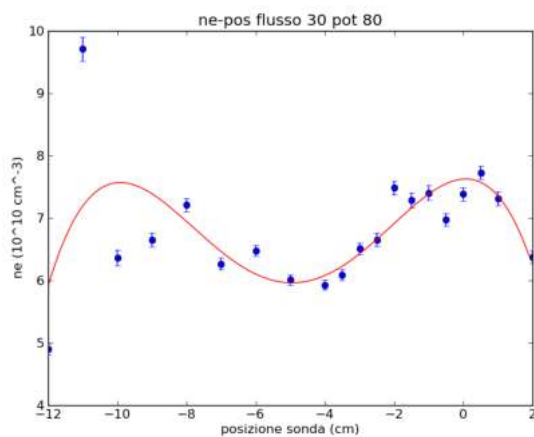


(c) Potenziale di plasma in funzione della posizione

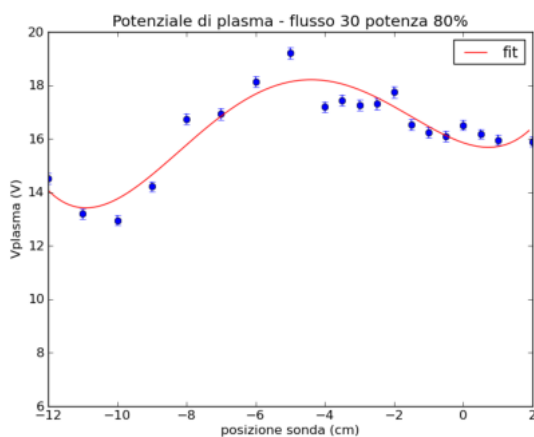
Figura 6.8: Flusso 30 SCCM; Potenza 985 W (40%); Pressione: $7,00 \cdot 10^{-4}$ mBar;
Campo magnetico: 700 G.



(a) Temperatura elettronica in funzione della posizione

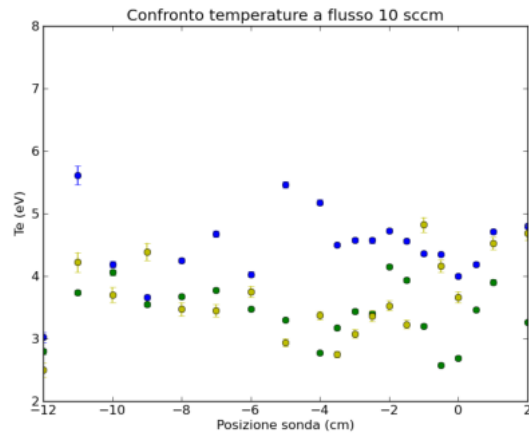


(b) Densità elettronica in funzione della posizione

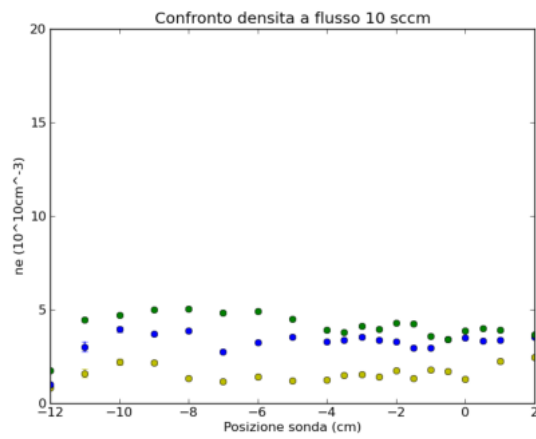


(c) Potenziale di plasma in funzione della posizione

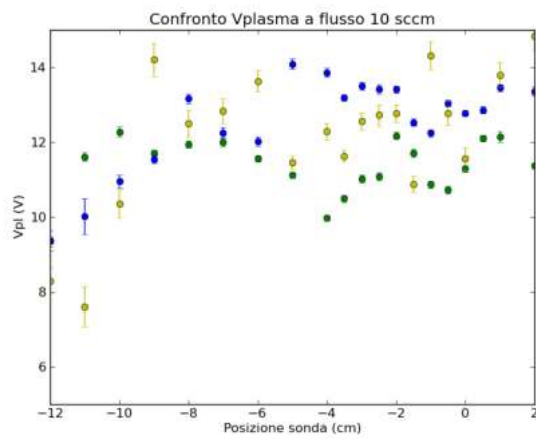
Figura 6.9: Flusso 30 SCCM; Potenza 2012 W (80%); Pressione: $7,11 \cdot 10^{-4}$ mBar;
Campo magnetico: 700 G.



(a) Confronto temperature in funzione della posizione

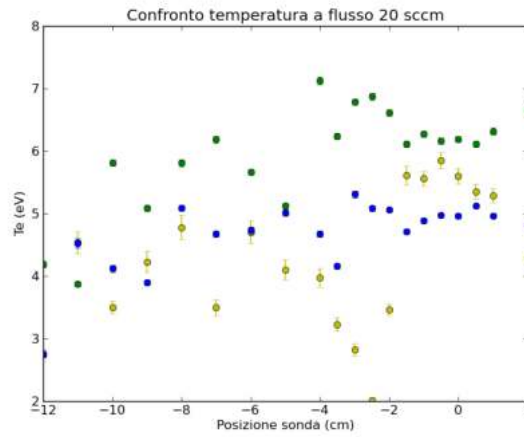


(b) Confronto densità in funzione della posizione

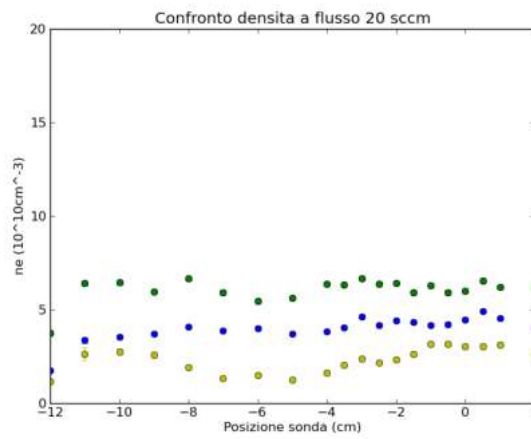


(c) Confronto potenziale di plasma in funzione della posizione

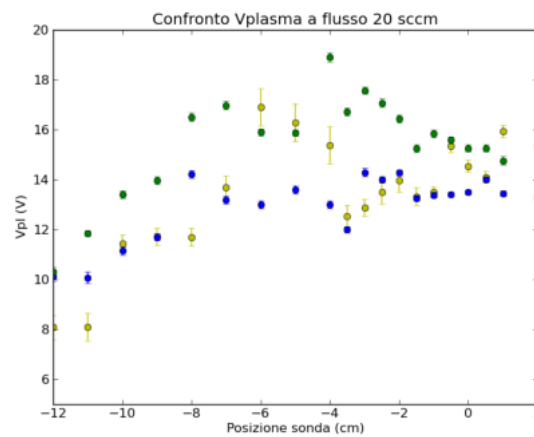
Figura 6.10: Flusso a 10 SCCM. In giallo la potenza al 20%, in blu al 40% e in verde all'80%.



(a) Confronto temperature in funzione della posizione

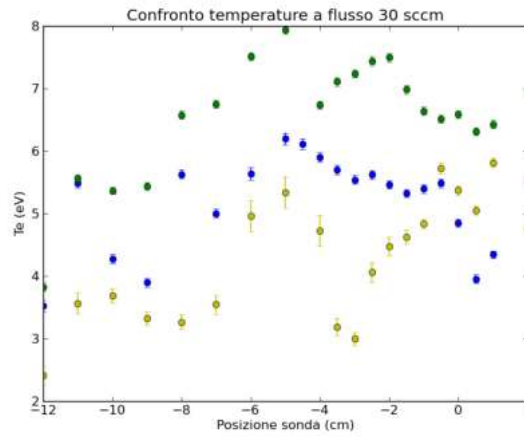


(b) Confronto densità in funzione della posizione

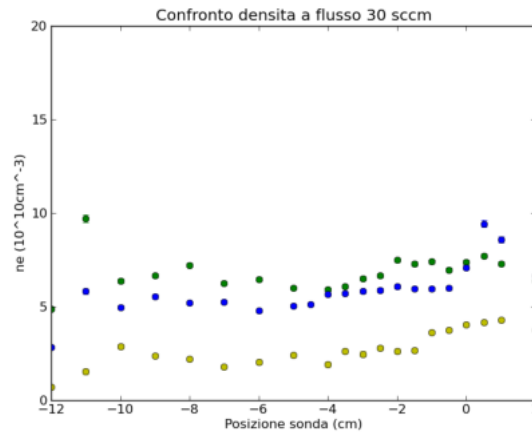


(c) Confronto potenziale di plasma in funzione della posizione

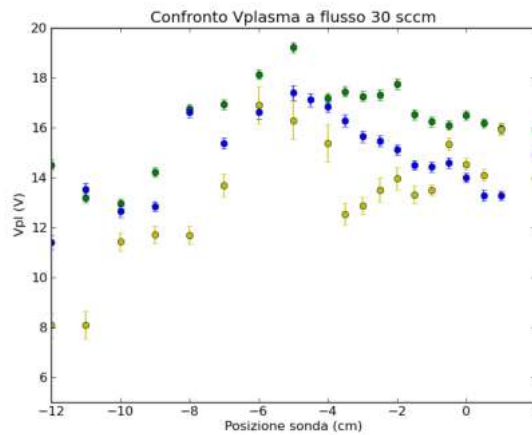
Figura 6.11: Flusso a 20 SCCM. In giallo la potenza al 20%, in blu al 40% e in verde all'80%.



(a) Confronto temperature in funzione della posizione

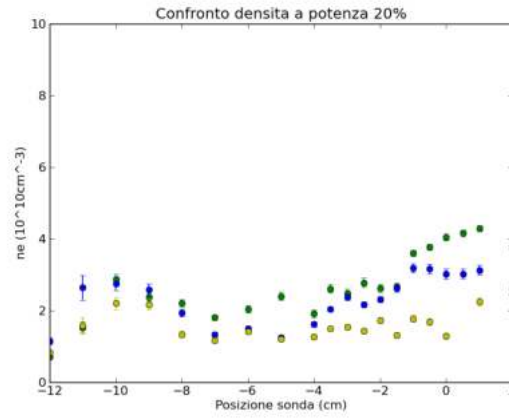


(b) Confronto densità in funzione della posizione

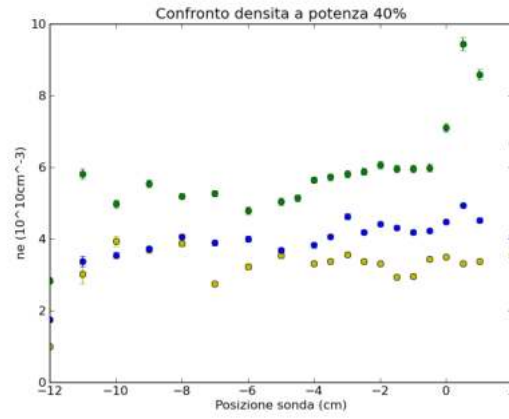


(c) Confronto potenziale di plasma in funzione della posizione

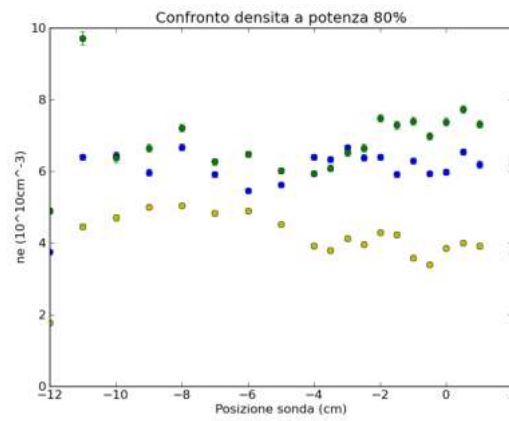
Figura 6.12: Flusso a 30 SCCM. In giallo la potenza al 20%, in blu al 40% e in verde all'80%.



(a) Confronto della densità con potenza al 20% ($\simeq 480W$).

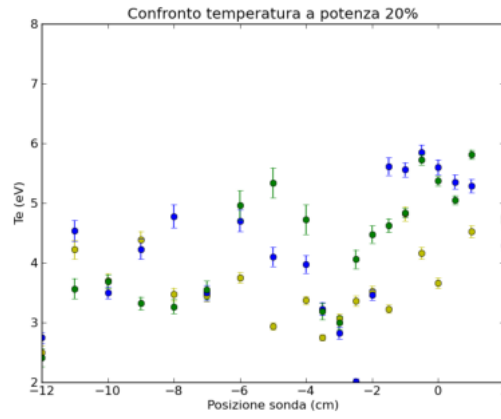


(b) Confronto della densità con potenza al 40% ($\simeq 985W$).

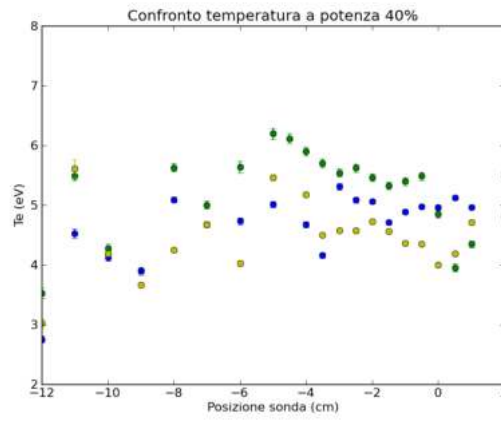


(c) Confronto della densità con potenza al 80% ($\simeq 2020W$).

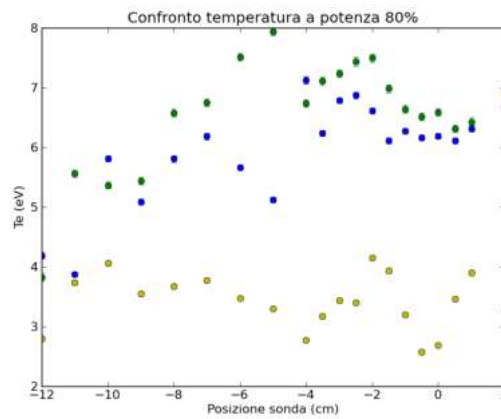
Figura 6.13: Giallo: flusso a 10 SCCM; Blu: flusso a 20 SCCM; Verde: flusso a 30 SCCM.



(a) Confronto delle temperature con potenza al 20% ($\simeq 480W$).

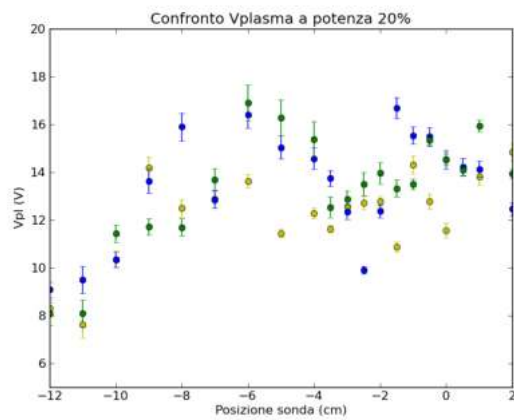


(b) Confronto delle temperature con potenza al 40% ($\simeq 985W$).

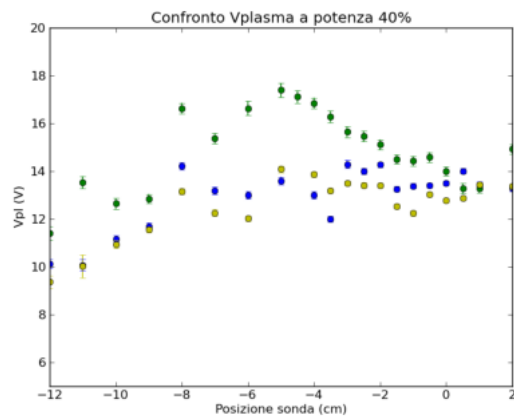


(c) Confronto delle temperature con potenza al 80% ($\simeq 2020W$).

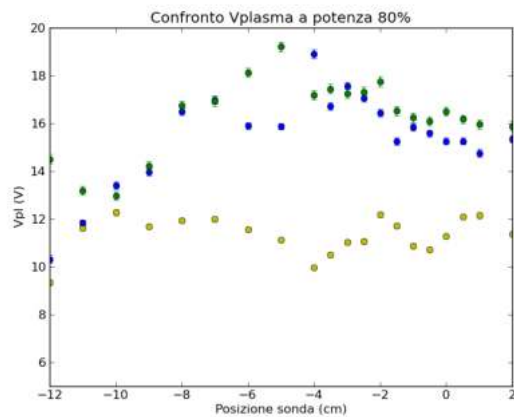
Figura 6.14: Giallo: flusso a 10 SCCM; Blu: flusso a 20 SCCM; Verde: flusso a 30 SCCM.



(a) Confronto dei potenziali di plasma con potenza al 20% ($\simeq 480W$).

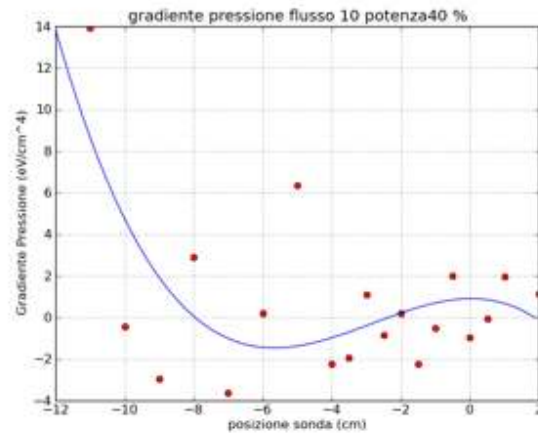


(b) Confronto dei potenziali di plasma con potenza al 40% ($\simeq 985W$).

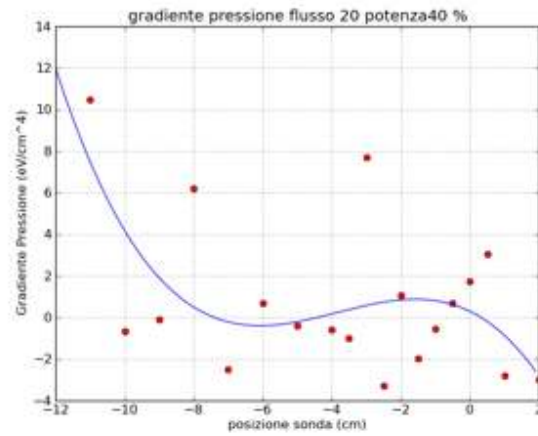


(c) Confronto dei potenziali di plasma con potenza al 80% ($\simeq 2020W$).

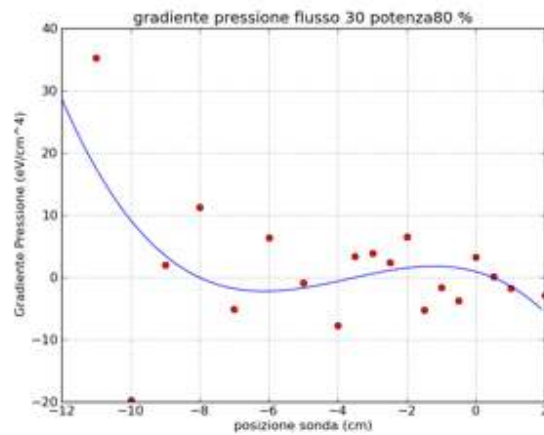
Figura 6.15: Giallo: flusso a 10 SCCM; Blu: flusso a 20 SCCM; Verde: flusso a 30 SCCM.



(a) Per flusso a 10 SCCM e potenza a 985 W

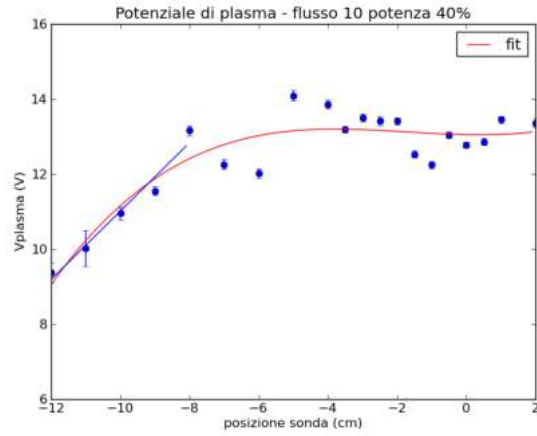


(b) Per flusso a 20 SCCM e potenza a 984 W

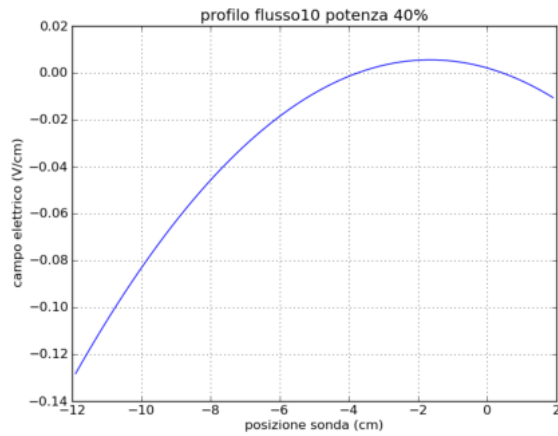


(c) Per flusso a 30 SCCM e potenza a 1012 W

Figura 6.16: Andamento del gradiente di pressione, ricavato grazie a $p = n_e \cdot T_e$, per vari valori di flusso e potenza in funzione della distanza dall'asse della macchina.

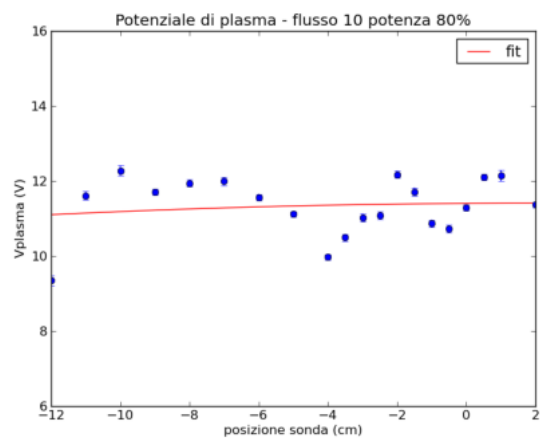


(a) Per flusso a 10 SCCM e potenza a 985 W

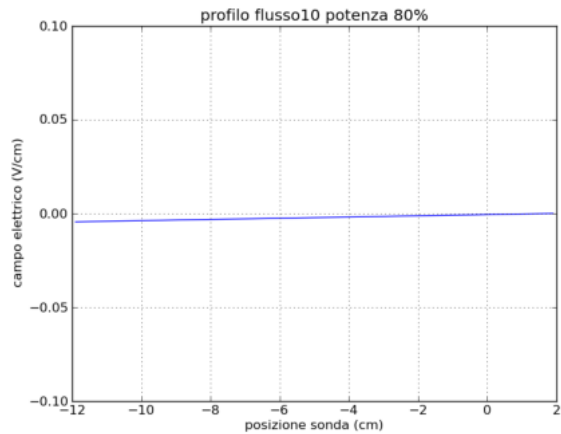


(b) Per flusso a 10 SCCM e potenza a 985 W

Figura 6.17: Andamento del potenziale di plasma e del campo elettrico, ricavato grazie a $\mathbf{E} = -\nabla V_{plasma}$, in funzione della distanza dall'asse della camera.

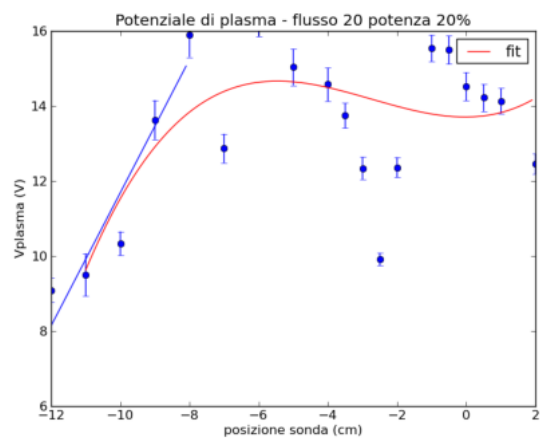


(a) Per flusso a 10 SCCM e potenza a 2012 W

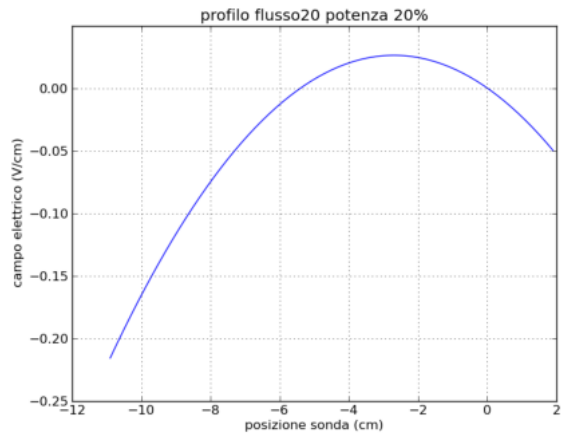


(b) Per flusso a 10 SCCM e potenza a 2012 W

Figura 6.18: Andamento del potenziale di plasma e del campo elettrico in funzione della distanza dall'asse della camera.



(a) Per flusso a 20 SCCM e potenza a 478 W



(b) Per flusso a 20 SCCM e potenza a 478 W

Figura 6.19: Andamento del potenziale di plasma e del campo elettrico in funzione della distanza dall'asse della camera.

Capitolo 7

Commenti ai grafici

7.1 Confronto dei grafici a flusso 10 SCCM

Le temperature paiono non discostarsi sensibilmente l'una dall'altra al variare della potenza delle microonde.

La densità sembra aumentare linearmente all'aumento della potenza delle microonde.

La tensione di plasma, come atteso, presenta un gradiente, rispetto alla posizione, non nullo in prossimità delle pareti della camera, mentre, avvicinandoci all'asse della macchina, tende ad annullarsi. Tale andamento si può riscontrare a tutte le potenze studiate. I valori del potenziale non variano in maniera significativa all'aumentare della potenza.

7.2 Confronto dei grafici a flusso 20 SCCM

A flusso 20 SCCM l'andamento delle temperature risulta analogo al caso precedente.

Nuovamente, la densità cresce linearmente all'aumento della potenza delle microonde.

La tensione di plasma, come atteso, presenta un gradiente che tende a zero verso il centro. Tuttavia, diversamente dal caso precedente si osserva che la tensione di plasma al 40% di potenza è minore di quella osservata al 20%.

7.3 Confronto dei grafici a flusso 30 SCCM

A flusso 30 SCCM la temperatura aumenta al crescere della potenza, presentando massimi in prossimità dell'asse per tutte le potenze studiate.

La densità presenta nuovamente l'andamento già osservato in precedenza.

La tensione di plasma tende nuovamente ad un valore costante man mano che ci avviciniamo all'asse. Si osserva che la tensione di plasma tende ad aumentare al crescere della potenza.

7.4 Confronto dei grafici a potenza 20%

Per quanto riguarda la temperatura, si riscontra un sensibile aumento in corrispondenza dell'asse per tutti i flussi analizzati.

La densità invece, come atteso, è massima al centro della camera, presentando un andamento concavo nel profilo. Tale caratteristica si osserva a tutti i flussi studiati.

Per il potenziale di plasma abbiamo un forte gradiente verso le pareti della camera, mentre verso il centro tende ad annullarsi con andamento oscillante.

7.5 Confronto dei grafici a potenza 40%

Le temperature, per i diversi flussi, tendono a stabilizzarsi su valori simili nell'intorno dell'asse della macchina.

La densità aumenta in modo deciso all'aumentare del flusso, aumentando verso il centro.

Il potenziale di plasma presenta lo stesso andamento osservato in precedenza, ma quello misurato a flusso 30 SCCM ha un deciso picco a 5 cm dall'asse.

7.6 Confronto dei grafici a potenza 80%

La temperatura aumenta in modo deciso fra flusso 10 SCCM e flusso 20 SCCM. L'analogico non avviene fra i flussi 20 SCCM e 30 SCCM, che paiono registrare temperature molto simili, si deduce quindi che la temperatura saturi oltre ad un determinato valore di flusso.

La densità presenta un andamento lineare lungo l'asse in tutti e tre i casi. Come per le temperature, vi è un netto scostamento fra le misure effettuate a flusso 10 SCCM e quelle a flusso 20 SCCM, cosa non osservata fra flusso 20 SCCM e 30 SCCM.

Il potenziale di plasma sembra essere costante lungo il raggio della macchina per un flusso a 10 SCCM. Analogamente al caso precedente a potenza 40%, il potenziale presenta un picco a circa 5 cm dall'asse per il flusso a 30 SCCM. Il caso intermedio presenta invece l'andamento caratteristico ed atteso del potenziale.

7.7 Profili di gradiente di pressione

Si nota un evidente gradiente iniziale che poi si stabilizza verso il centro, con piccole oscillazioni intorno allo 0. Si prevede un andamento simmetrico, solo leggermente accennato dalla parte finale del grafico, per le distanze comprese tra 0 cm e + 12 cm.

Il valore iniziale di gradiente di pressione si attesta intorno a 13 per i casi studiati a flusso 10 SCCM e 20 SCCM.

Per quanto riguarda il flusso 30 SCCM, i dati a - 11 cm sono falsati da una sovrastima di tutti i parametri; i valori del grafico, quindi, risentono di questo fatto soprattutto all'inizio del fit.

7.8 Profili di campo elettrico

Il campo elettrico risulta presente nei pressi delle pareti della camera e tende ad annullarsi, in tutti i casi studiati, eccezion fatta per il caso a flusso 10 SCCM e potenza 80%, a circa 4 cm dall'asse. Si prevede un analogo comportamento per posizioni simmetriche rispetto al centro a quelle da noi studiate.

Il campo elettrico è diretto verso l'esterno e, unito al campo magnetico assiale a lui ortogonale, induce un movimento antiorario degli elettroni all'interno della camera.

7.9 Velocità di deriva

Per quanto riguarda il caso a flusso 10 SCCM e potenza al 40% osserviamo la presenza di un gradiente piuttosto accentuato nella parte più esterna della camera e, utilizzando un fit lineare per i primi punti, otteniamo una velocità di deriva pari a $v_d = 325,36 m/s$.

Nel caso a flusso 20 SCCM e potenza 20% il gradiente risulta essere ancora più accentuato e induce una velocità di deriva $v_d = 633,66 m/s$.

Tali velocità sono orientate in modo da indurre un moto antiorario alle particelle.

Infine, nel caso a flusso 10 SCCM e potenza all'80%, essendo il potenziale di plasma costante lungo tutto il raggio, il campo elettrico risulta essere nullo. Ciò comporta un valore nullo anche per la velocità di deriva.

Capitolo 8

Conclusioni

Abbiamo riscontrato, dall'analisi dati, che la temperatura non sembra fornire particolari informazioni se non un lieve aumento verso il centro della camera nella maggior parte dei casi studiati. Aumentando però il flusso si nota una saturazione della temperatura.

La densità invece, risulta avere un profilo lineare lungo il raggio, mentre per quanto riguarda i confronti dei dati a diversi flussi e pressioni si constata un generale aumento al crescere della grandezza variata.

Il potenziale di plasma riporta l'andamento atteso nella totalità dei casi, raggiungendo valori costanti nei pressi dell'asse della macchina e mostrando invece forti gradienti nelle regioni più esterne.

Da questa analisi si può evincere la presenza di un campo elettrico diretto verso l'esterno che induce, unitamente al campo magnetico, una rotazione antioraria del plasma.

Infine, il gradiente di pressione riscontrato tende ad annullarsi verso il centro della macchina e a crescere ai bordi.

Appendice A

Qui riportiamo i nomi dei file su cui sono salvati i dati che abbiamo utilizzato per la realizzazione di questa relazione. I nomi sono associati alla distanza D della nostra sonda di Langmuir dall'asse della macchina GyM nel momento dell'acquisizione; definiamo lo spostamento positivo come quello diretto dall'asse verso la pompa turbo-molecolare. Le tre tabelle sono riferite al valore del flusso di idrogeno nella macchina con il relativo canale con cui abbiamo preso i nostri dati. Per ogni flusso abbiamo variato la potenza delle microonde utilizzate per attivare il plasma e riportato la relativa pressione.

Tabella 8.1: Flusso d'idrogeno a 10 SCCM. 2° canale (4^a colonna di dati).

Potenza [W]	480 (20%)		985 (40%)		2012 (80%)	
Pressione [mBar]	$2,98 \cdot 10^{-4}$		$2,96 \cdot 10^{-4}$		$2,95 \cdot 10^{-4}$	
	File	D [cm]	File	D [cm]	File	D [cm]
	13050	-12	13051	-12	13073	-12
	13049	-11	13052	-11	13074	-11
	13048	-10	13053	-10	13075	-10
	13047	-9	13054	-9	13076	-9
	13046	-8	13055	-8	13077	-8
	13045	-7	13056	-7	13078	-7
	13044	-6	13057	-6	13079	-6
	13043	-5	13058	-5	13080	-5
	13042	-4	13059	-4	13081	-4
	13041	-3,5	13060	-3,5	13082	-3,5
	13040	-3	13061	-3	13083	-3
	13039	-2,5	13062	-2,5	13084	-2,5
	13038	-2	13063	-2	13085	-2
	13037	-1,5	13064	-1,5	13086	-1,5
	13035	-1	13065	-1	13087	-1
	13036	-0,5	13066	-0,5	13088	-0,5
	13034	0	13067	0	13089	0
	13033	+1	13068	+0,5	13090	+0,5
	13032	+2	13069	+1	13091	+1
	-	-	13070	+2	13092	+2

Tabella 8.2: Flusso d'idrogeno a 20 SCCM. 3° canale (5ª colonna di dati).

Potenza [W]	478 (20%)		984 (40%)		2040 (80%)	
Pressione [mBar]	$4,85 \cdot 10^{-4}$		$4,89 \cdot 10^{-4}$		$4,81 \cdot 10^{-4}$	
	File	D [cm]	File	D [cm]	File	D [cm]
	13162	-12	13200	-12	13220	-12
	13161	-11	13199	-11	13219	-11
	13163	-10	13198	-10	13218	-10
	13164	-9	13197	-9	13217	-9
	13165	-8	13196	-8	13216	-8
	13166	-7	13195	-7	13215	-7
	13167	-6	13194	-6	13214	-6
	13168	-5	13193	-5	13213	-5
	13169	-4	13192	-4	13212	-4
	13170	-3,5	13191	-3,5	13211	-3,5
	13171	-3	13190	-3	13210	-3
	13172	-2,5	13189	-2,5	13209	-2,5
	13173	-2	13188	-2	13208	-2
	13174	-1,5	13187	-1,5	13207	-1,5
	13175	-1	13186	-1	13206	-1
	13176	-0,5	13185	-0,5	13205	-0,5
	13177	0	13184	0	13204	0
	13178	+0,5	13183	+0,5	13203	+0,5
	13179	+1	13182	+1	13202	+1
	13180	+2	13181	+2	13201	+2

Tabella 8.3: Flusso d'idrogeno a 30 SCCM. 3° canale (5ª colonna di dati).

Potenza [W]	484 (20%)		985 (40%)		2012 (80%)	
Pressione [mBar]	$6,88 \cdot 10^{-4}$		$7,10 \cdot 10^{-4}$		$7,11 \cdot 10^{-4}$	
	File	D [cm]	File	D [cm]	File	D [cm]
	13267	-12	13288	-12	13361	-12
	13266	-11	13287	-11	13360	-11
	13265	-10	13286	-10	13359	-10
	13264	-9	13285	-9	13358	-9
	13263	-8	13284	-8	13357	-8
	13262	-7	13283	-7	13356	-7
	13261	-6	13282	-6	13355	-6
	13260	-5	13281	-5	13354	-5
	13259	-4	13280	-4,5	13353	-4
	13258	-3,5	13279	-4	13352	-3,5
	13257	-3	13278	-3,5	13351	-3
	13256	-2,5	13277	-3	13350	-2,5
	13255	-2	13276	-2,5	13349	-2
	13254	-1,5	13275	-2	13348	-1,5
	13253	-1	13274	-1,5	13347	-1
	13252	-0,5	13273	-1	13346	-0,5
	13251	0	13272	-0,5	13342	0
	13250	+0,5	13271	0	13345	+0,5
	13249	+1	13270	+0,5	13344	+1
	13248	+2	13269	+1	13343	+2
	-	-	13268	+2	-	-

Riferimenti

- [1] G. Granucci et al. (2009), *The new linear plasma device GyM at IFP-CNR*, Sofia.
- [2] M. Bagatin et al. (1996), *Automatic fast fitting of single Langmuir probe characteristics on RFX*, American Institute of Physics.
- [3] V.I. Demidov, S. Ratynskaia and K. Rypdal (2002), *Electric probes for plasmas: The link between theory and instrument*, American Institute of Physics.