

## Capitolo 3

# Profilo elettrico

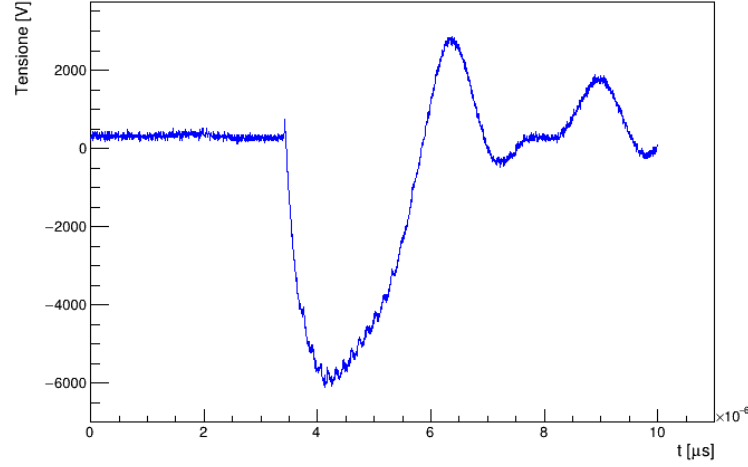
La sorgente di plasma funziona tramite l'applicazione di alte tensioni all'elettrodo ricoperto di materiale dielettrico. Come nel circuito mostrato in ?? i 15 V in arrivo nella testa della sorgente vengono amplificati fino a tensioni di alcuni kV, durante il tempo di apertura del circuito. Dall'arduino di controllo è possibile regolare il tempo di apertura del circuito in un range di ...  $\mu$ s e la frequenza di lavoro in un range di ... kHz. I parametri importanti per caratterizzare il funzionamento della sorgente saranno quindi tensione e corrente all'uscita del circuito secondario del trasformatore, al variare dei parametri di funzionamento. Prelevando la corrente in un dato range temporale, è inoltre possibile stimare la corrente efficace che attraversa il bersaglio, importante nel valutare gli effetti dell'applicazione del plasma.

### 3.1 Setup delle misure di tensione e corrente

Si vogliono effettuare misure di tensione della sorgente sia senza immissione di elio, senza formazione della plume di plasma, sia nelle condizioni di funzionamento tipiche, con flusso di elio di 2 L/min. Le tensioni vengono misurate tramite una sonda apposita con attenuazione  $\times 1000$ , le correnti tramite una sonda apposita che per una corrente di 1 mA restituisce un segnale di 1 mV. I dati vengono letti su un oscilloscopio *Yokogawa DL9040*, che permette il salvataggio dell'intera forma d'onda misurata nei diversi canali. Viene effettuata la caratterizzazione elettrica di entrambi i prototipi di sorgente, per i quali il circuito utilizzato è lo stesso, quindi non si aspettano variazioni significative.

#### 3.1.1 Misure senza elio

La sonda ad alta tensione viene collegata all'uscita del circuito secondario, mentre una normale sonda non attenuata viene utilizzata per controllare il segnale in ingresso. La sorgente viene azionata variando la frequenza ( $f$ ) e duty cycle ( $\Delta t$ ). Scelta la frequenza di lavoro, viene variata la duty cycle in un range utile, considerando il tempo necessario al terminare delle oscillazioni del segnale prima dell'arrivo di una nuova onda quadra (per frequenze maggiori si potrà arrivare a duty cycle minori). Si ottengono curve come in



**Figura 3.1:** Esempio di misura di tensione,  $f = 5 \text{ kHz}$  e  $\Delta t = 16 \text{ } \mu\text{s}$ , prototipo 1.

figura 3.1. La risoluzione della misura viene variata in modo da avere l'errore di misura minore possibile.

### 3.1.2 Misure con elio

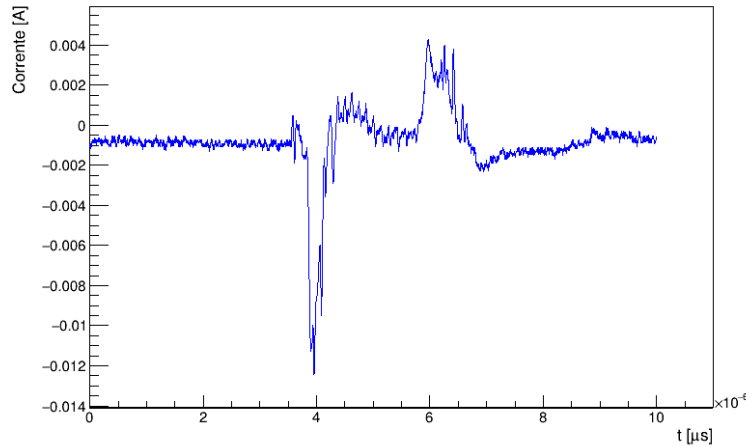
Per caratterizzare il funzionamento della sorgente nelle possibili condizioni di trattamento, vengono misurate contemporaneamente, su due diversi canali dell'oscilloscopio, tensione alla quale si trova l'elettrodo e corrente che fluisce nel plasma. Per la misura di corrente viene fatto impattare il plasma su una piastra di rame di dimensioni  $2 \text{ cm} \times 2 \text{ cm} \times 0.5 \text{ cm}$ , ad una distanza di  $1 \text{ cm}$  dall'elettrodo della sorgente, collegata alla sonda di corrente. Nuovamente vengono effettuate misure al variare di frequenza ( $f$ ) e duty cycle ( $\Delta t$ ), con le stesse modalità delle misure di tensione. Tutte le misure sono effettuate con flusso di gas He pari a  $21/\text{min}$ . Si ottengono curve come in figura 3.2.

## 3.2 Presentazione misure ed analisi

Sia per le misure di tensione che per le misure di corrente si trova un picco negativo come presentato nelle Figure 3.1 e 3.2. Il picco di tensione ha valori tipici tra i  $3$  e i  $10 \text{ kV}$  in assenza o in presenza di gas, mentre quello di corrente tra i  $2$  e i  $12 \text{ mA}$ . L'analisi dei dati prevede la ricerca del massimo della tensione e della corrente nelle diverse configurazioni.

### 3.2.1 Tensione di picco senza elio

L'andamento medio delle misure presenta un picco negativo pronunciato, compatibile con i tempi di apertura del circuito. Dato un set, il valore di picco viene cercato calcolando la



**Figura 3.2:** Esempio di misure di corrente per  $f = 5 \text{ kHz}$  e  $\Delta t = 24 \mu\text{s}$ , prototipo 1.

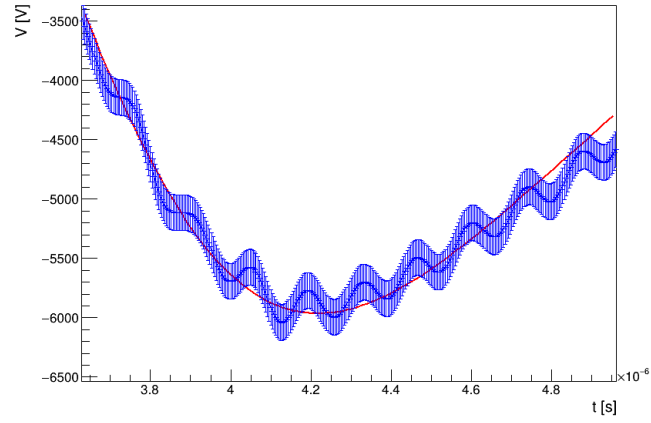
trasformata di Fourier del segnale (tramite le routine `fftw3` delle librerie `ROOT`), tagliando le oscillazioni ad alta frequenza e ricostruendone una media. Nel segnale medio così ricostruito il valore del minimo viene trovato interpolando con una funzione di Landau attorno il minimo, in modo da riprodurre l'asimmetria del picco. A queste misure viene aggiunto l'errore dovuto al taglio delle alte frequenze, preso come una media del valore assoluto dell'oscillazione del segnale tagliato. Viene inoltre aggiunto l'errore caratteristico dello strumento di misura, trascurabile rispetto l'errore dovuto alle oscillazioni veloci. In figura 3.6 un esempio del fit.

Le tensioni del picco così calcolate, al variare della duty cycle per le diverse frequenze, sono presentate in figura 3.4. Per tutte le frequenze di lavoro tra i  $4 \mu\text{s}$  e i  $16 \mu\text{s}$  risulta un andamento lineare, con tensione variabile tra i  $2 \text{ kV}$  e i  $9 \text{ kV}$ . Aumentando ancora il tempo di apertura del circuito la tensione arriva a valori più elevati, fino a un massimo di circa  $10 \text{ kV}$ , ma viene perso l'andamento lineare.

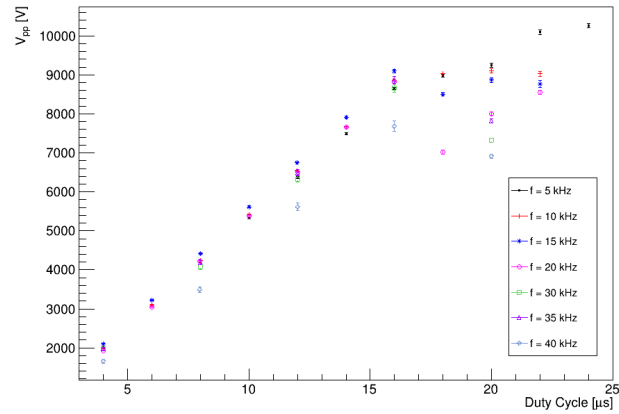
Le misure non sembrano presentare un andamento in funzione della frequenza, per verificarlo vengono calcolati i coefficienti dell'interpolazione lineare per le varie frequenze, presentati in figura 3.5. Viene confermata l'assenza di un andamento specifico al variare della frequenza.

### 3.2.2 Tensione e corrente con elio

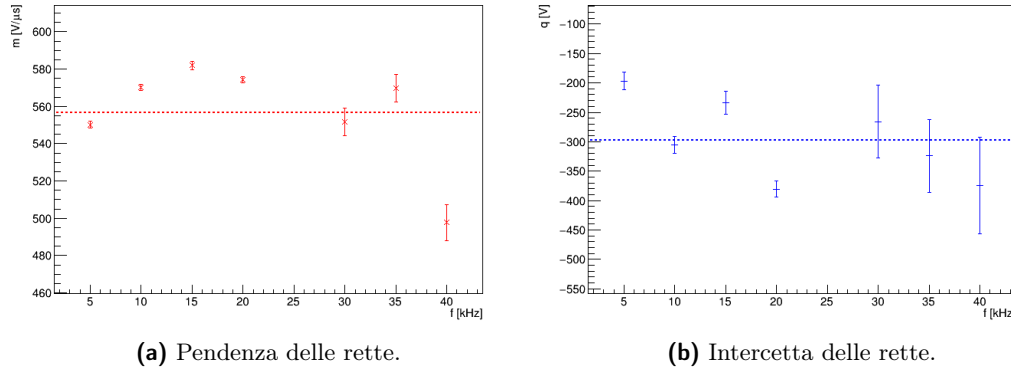
Le misure di tensione presentano l'andamento trovato precedentemente, mentre le misure di corrente presentano un primo picco negativo seguito da un picco più basso di segno opposto, positivo. L'analisi proposta è uguale a quella pensata per i set di misure precedenti: vengono tagliate le oscillazioni ad alta frequenza, ricostruito il segnale (aggiungendo l'errore dovuto al taglio delle alte frequenze e agli strumenti di misura) e il valore del minimo viene trovato interpolando con una funzione di Landau. Da questo fit



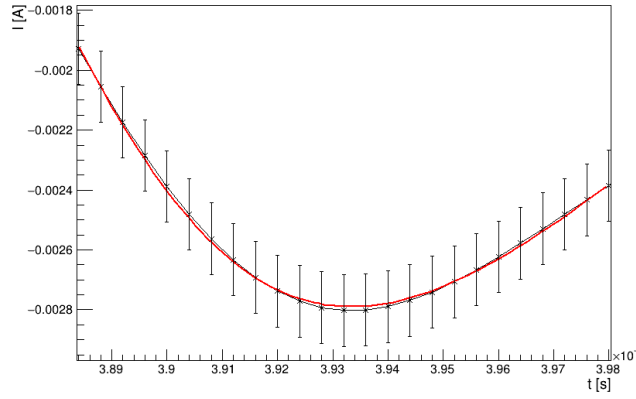
**Figura 3.3:** Esempio di fit del picco di tensione,  $f = 5$  kHz e  $\Delta t = 16$   $\mu$ s



**Figura 3.4:** Tensioni al variare del tempo di apertura del circuito e per diverse frequenze.



**Figura 3.5:** Parametri dell'interpolazione lineare dei set di misure senza immissione di gas(nel range  $\Delta t$  stabilito), al variare della frequenza.

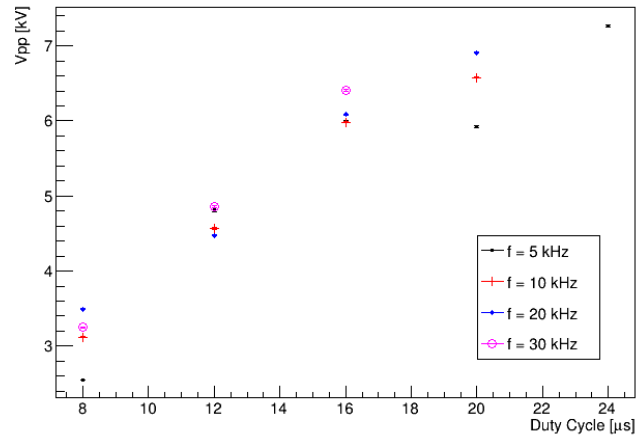


**Figura 3.6:** Esempio di fit del picco di corrente,  $f = 5$  kHz e  $\Delta t = 24$   $\mu$ s

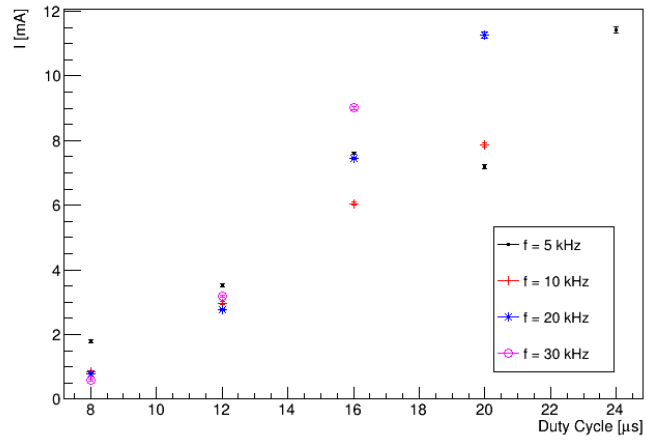
vengono calcolati valori e posizione del picco di tensione, del picco negativo di corrente e del picco positivo di corrente. In figura 3.6 un esempio del fit.

Le tensioni del picco così calcolate, al variare della duty cycle per le diverse frequenze, sono presentate in figura 3.7. Nuovamente troviamo un andamento lineare per la tensione tra i 4 e i 16  $\mu$ s. Anche il picco negativo di corrente presenta questo andamento lineare, mentre per il picco positivo non è possibile identificare un comportamento simile, i valori si disperdono.

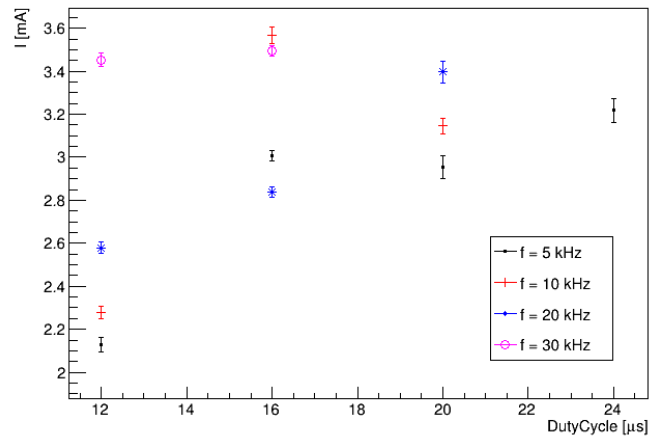
Nuovamente, per visualizzare in maniera esplicita l'effetto della variazione della frequenza, vengono calcolati i coefficienti dell'interpolazione lineare per le tensioni di picco e per le correnti di picco negativo, presentati in figura 3.8. Per le tensioni risulta un comportamento identico al precedente, dove i valori si assestano attorno una media lievemente inferiore rispetto le misure in assenza di elio. Per il valore massimo di corrente viene trovato un aumento in funzione della frequenza di funzionamento della sorgente.



(a) Modulo del picco di tensione.

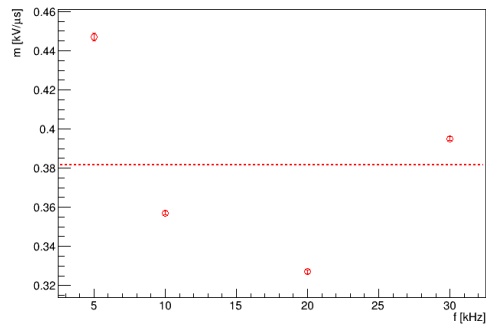


(b) Modulo del picco primario di corrente.

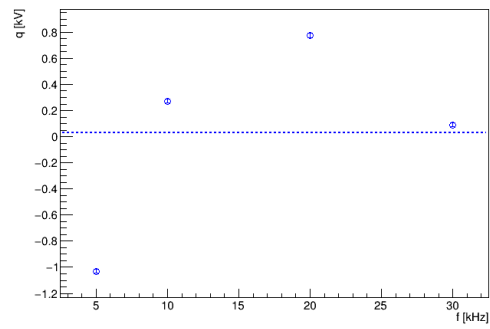


(c) Picco secondario di corrente.

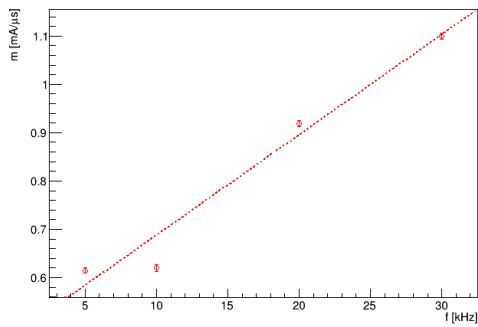
**Figura 3.7:** Valori dei picchi misurati al variare del tempo di apertura del circuito e per diverse frequenze.



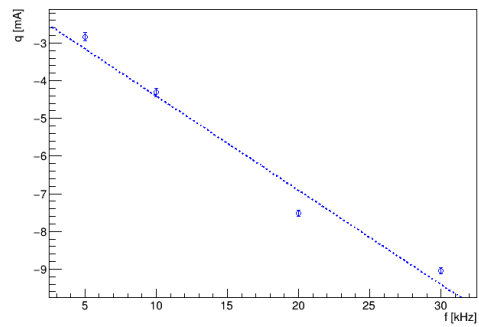
(a) Pendenze dei picchi di tensione.



(b) Intercette dei picchi di tensione.

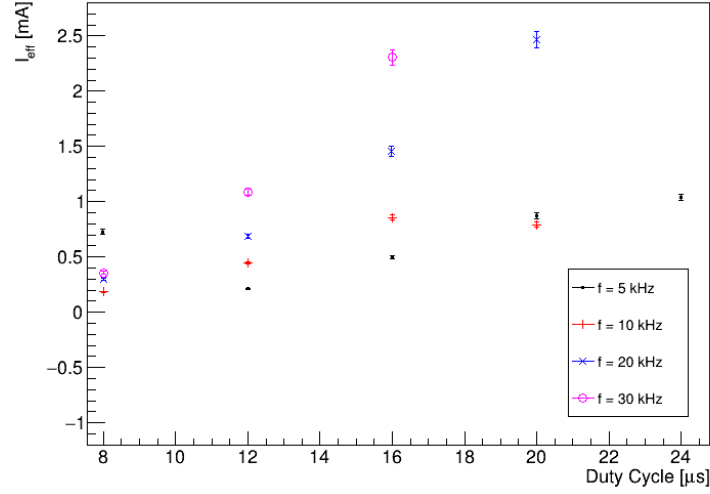


(c) Pendenze dei picchi di corrente.



(d) Intercette dei picchi di corrente.

**Figura 3.8:** Parametri dell'interpolazione lineare dei picchi delle misure di tensione e corrente.



**Figura 3.9:** Corrente efficace calcolata al variare del tempo di apertura del circuito e per diverse frequenze.

### 3.2.3 Corrente efficace

Un impulso di corrente periodica sarà equivalente ad un valore di corrente continua pari al suo valore efficace, calcolato come in formula 3.1.

$$I_{\text{eff}} = \frac{1}{(t_2 - t_1)} \sqrt{\int_{t_1}^{t_2} I^2 dt} \quad (3.1)$$

Per valutare gli effetti del passaggio di corrente in un circuito in regime periodico è quindi utile considerare il suo valore efficace su uno o più periodi. In Figura 3.9 vengono presentati i valori della corrente efficace in maniera simile a quanto fatto per le misure di corrente precedentemente. A parità di tempo di apertura del circuito, una maggiore frequenza implica che all'interno di un periodo, il picco di corrente sarà più largo, aumentando la corrente efficace. In figura si vede come mediamente la corrente efficace sia più grande a frequenze maggiori, ma assume sempre valori inferiori ai 3 mA.