

# Contratto di ricerca tra Ground Control Holding srl e Università di Milano-Bicocca

## **Rapporto Tecnico Scientifico finale - parte 2/2**

Risultati delle misure

Settembre 2024

**CONFIDENZIALE**

## 1. Caratterizzazione del sistema di alimentazione elettrica della prima versione del dispositivo

La campagna sperimentale di caratterizzazione del sistema è iniziata nei giorni 9 e 10 maggio 2024 nei locali del dipartimento di Fisica dell'Università. Oggetto della caratterizzazione preliminare è stato il sistema di innesco e di scarica, andando a trascurare nella prima fase il sistema di carica dei condensatori di potenza. Il circuito oggetto dello studio è mostrato in fig.1. In particolare, il banco di condensatori che alimenta la scarica di plasma, di capacità 100  $\mu\text{F}$ , è mostrato in alto a sinistra..

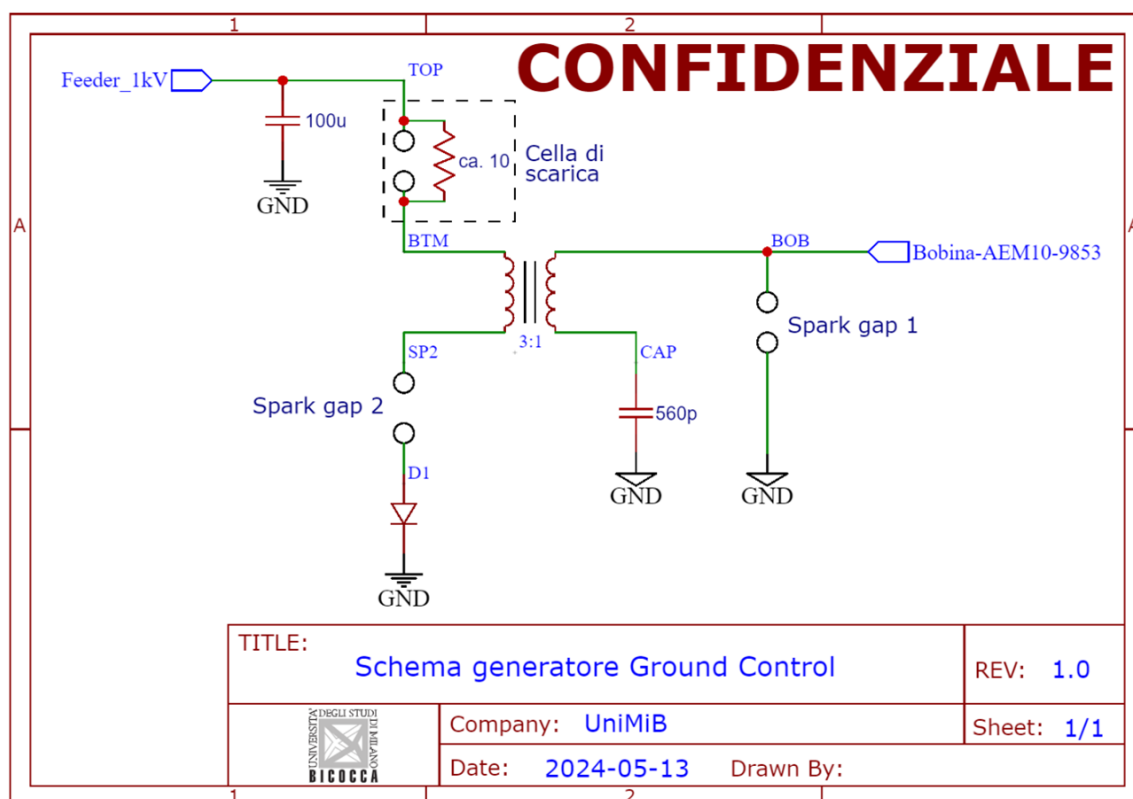


Figura 1: Schema elettrico della prima versione del sistema di alimentazione.

Le misure effettuate riguardano la tensione ai capi della cella di scarica, ottenuta con una sonda da alta tensione Tektronix P6015a, e la corrente che fluisce tra i due elettrodi, ottenuta con una sonda di corrente calibrata Pearson 411.

I risultati, per un tipico caso con tensione di carica del banco di condensatori di circa 1 kV, e soluzione salina all'1% nella cella di scarica, sono mostrati in fig.2. Si osserva la presenza di due regimi successivi: una prima fase, detta di pre-innesco (pre-breakdown), indicata nella figura come "fase conduttiva", e la fase di scarica vera e propria.

Durante la fase di pre-innesco nella soluzione passa una corrente quasi costante, di entità moderata (circa 200 A nel caso mostrato in figura). Tale fase è di durata variabile, tipicamente nell'ordine delle centinaia di  $\mu\text{s}$ , e dissipa una decina di Joule di energia, corrispondente a più del 20 % dell'energia immagazzinata dal condensatore. Durante tale fase è verosimile che vi sia un effetto elettrolitico, con conseguente scissione delle molecole d'acqua in idrogeno e ossigeno, e un effetto termico, di riscaldamento e sviluppo di bolle di

vapore. Complessivamente, questa fase serve a formare una bolla di gas che connette i due elettrodi, all'interno della quale si formerà successivamente il plasma.

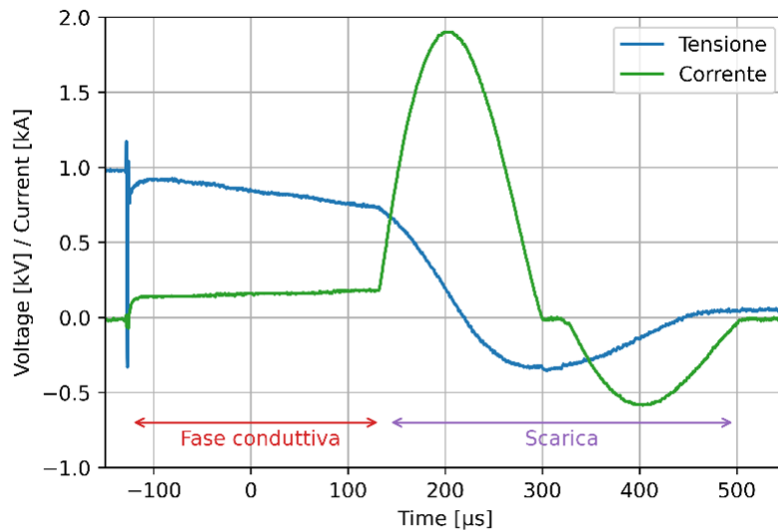


Figura 2: Tensione e corrente agli elettrodi durante un impulso

Successivamente si ha la fase di scarica, che è quella in cui si ha la formazione dello stato di plasma, con una rapida crescita, la corrente arriva ad un picco di quasi 2 kA, ed un coincidente calo di tensione; una parte consistente dell'energia caricata nel condensatore è consumata nella scarica, tra il 50 e l'80 % a seconda della durata della fase di pre-scarica. È opportuno sottolineare che la durata della fase pre-scarica, almeno ad una prima analisi, sembra essere molto variabile, probabilmente a causa della varietà di condizioni all'interno della cella. Inoltre, la presenza della fase di pre-scarica separa temporalmente l'innesco degli spark gap, generato dal complesso circuito di innesco tramite bobina, e l'effettivo innesco della scarica di plasma in acqua.

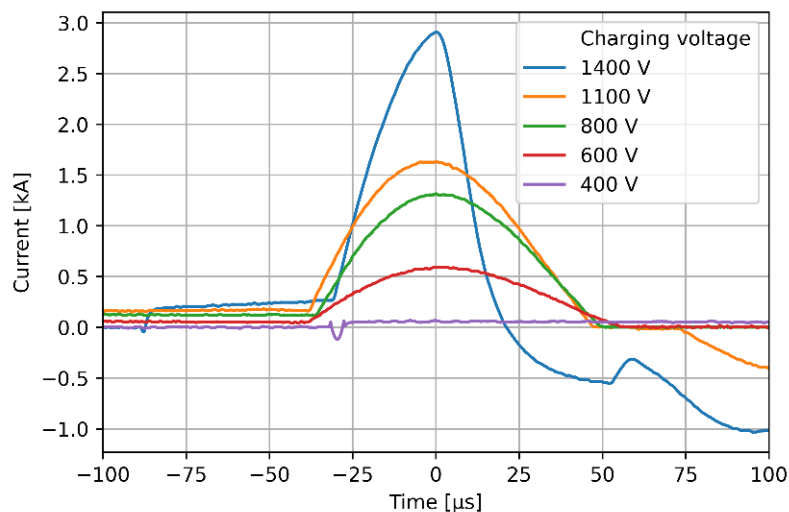


Figura 3: Corrente misurata per diversi valori della tensione di carica del banco di condensatori.

La corrente, come si osserva dalla fig.3, è determinata in forma e in ampiezza dalla tensione di carica del banco di condensatori; già con appena 600 V la scarica si innesca, superando i

500 A di corrente; crescendo fino a 1.4 kV, si raggiungono i 3 kA. È possibile quindi andare a esplorare diversi regimi di funzionamento, valutando quello più efficace a seconda dell'obiettivo perseguito. Anche questi dati sono stati ottenuti con una salinità dell'1%.

## 2. Osservazioni sul sistema di innesco della scarica e suggerimenti per una sua evoluzione

La durata aleatoria della fase di pre-scarica, e la conseguente separazione temporale tra la scarica negli spark gap e quella in acqua, hanno portato a ipotizzare che l'innesco della scarica in acqua non benefici del colpo di altissima tensione generato dal circuito di trigger, che innesca solo i due spark gap, ma sia dovuto semplicemente alla differenza di potenziale di circa 1 kV tra i due elettrodi. Viene quindi meno la necessità del circuito di innesco, che può essere sostituito da sistemi più semplici; nelle settimane successive alla prima campagna di misure, è stato discusso un possibile miglioramento del sistema, suggerendo l'utilizzo di tiristori SemiKron.

La seconda campagna di misure si è svolta nel giorno 3 luglio 2024 negli stessi locali dell'Università, lavorando con una evoluzione del sistema di alimentazione, mostrata in fig.4, realizzata sulla base delle considerazioni riportate sopra.

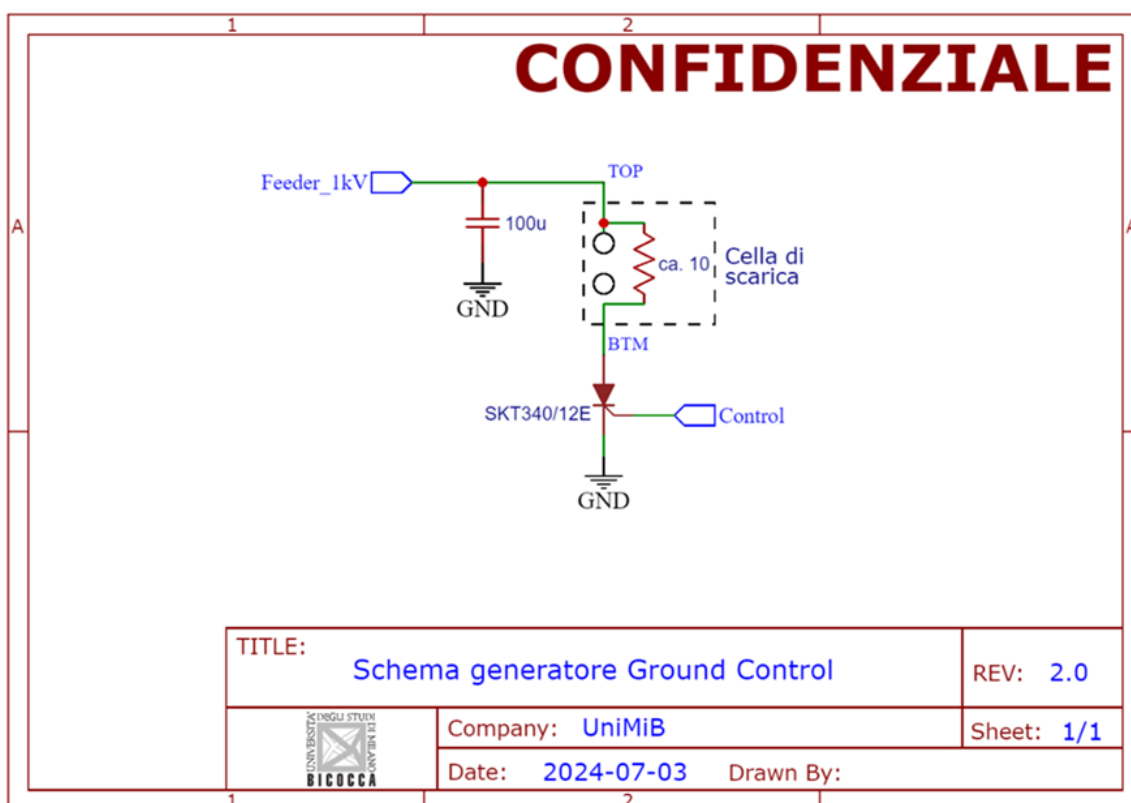


Figura 4: Schema elettrico della seconda versione del sistema di alimentazione.

Il nuovo sistema è risultato più stabile ed affidabile di quello precedentemente testato, ed è stato quindi possibile effettuare delle misure dell'innesco in acqua ripetute in modo sistematico.

### 3. Caratterizzazione del processo dell'innesco della scarica di plasma in acqua

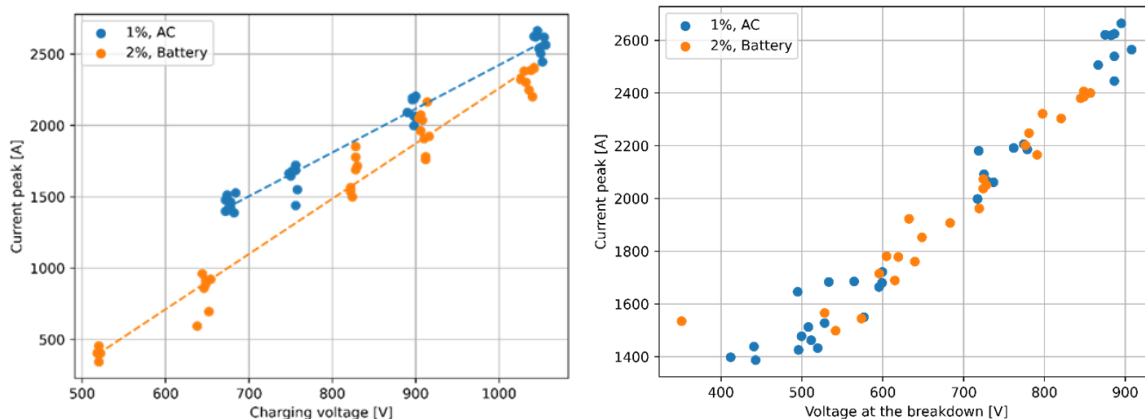
In seguito alla conferma del miglioramento ottenuto con la modifica del sistema di alimentazione, sono state effettuate delle misure sistematiche relative al processo di innesco della scarica.

Le forme d'onda misurate sono risultate simili a quelle già riportate in fig.2; da tali forme d'onda, sono state ricavate l'ampiezza massima del picco di corrente e la durata della fase di pre-scarica, al variare della tensione di carica dei condensatori.

Le misure sono state effettuate in due configurazioni:

- Inizialmente, utilizzando nella cella acqua all'1% di salinità, e utilizzando il sistema direttamente collegato alla rete elettrica per la carica dei condensatori;
- In secondo luogo, utilizzando nella cella acqua al 2% di salinità, e caricando i condensatori utilizzando il modulo alimentato a batteria.

In fig. 5 è riportato il picco di corrente misurato in funzione della tensione di carica; il sistema mostra un'ottima linearità, in entrambe le configurazioni. Inoltre, si registra una buona stabilità delle ripetizioni. I picchi di corrente registrati superano i 2.5 kA.



*Figura 5: Picco di corrente al variare della tensione di carica (sinistra) e al variare della tensione al termine della fase di pre-scarica (destra). Ogni punto rappresenta una misura.*

È interessante notare che, mentre se si considera la tensione di carica iniziale le due salinità portano a risultati lievemente diversi, se si considera invece la tensione al momento dell'innesco, ovvero al termine della fase di pre-innesco, i due casi si allineano. Questo suggerisce che la diversa salinità influenza il comportamento del sistema prettamente nella prima fase, in accordo con l'idea che nella seconda fase si ha la formazione di un plasma, e la salinità dell'acqua smette di giocare un ruolo nella determinazione della conducibilità.

Nella fig. 6 è invece riportata la durata della fase di pre-scarica al variare della tensione di carica. È qui evidente una maggiore variabilità dei dati, che non tendono a raggrupparsi come nel caso della corrente ma rimangono più ampiamente diffusi. Vi è chiaramente una correlazione, che suggerisce che all'aumentare della tensione il tempo necessario per raggiungere l'innesco del plasma diminuisce, ma rimane un forte carattere di aleatorietà.

Questo supporta l'ipotesi dell'effetto termico/elettrolitico, secondo cui durante la fase conduttiva si assiste alla formazione di un canale di vapore tra gli elettrodi attraverso cui avviene poi la scarica; la creazione di tale canale è soggetta ad effetti stocastici, quali ad esempio la presenza di impurità e di centri di nucleazione, nonché i fenomeni di diffusione, che possono portare all'aleatorietà osservata.

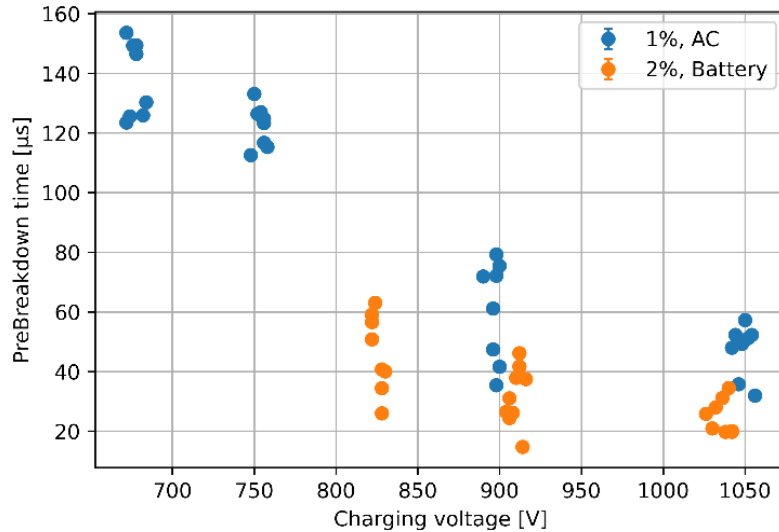


Figura 6: Durata della fase di pre-innesco al variare della tensione di carica. Ogni punto rappresenta una misura.

È di interesse, al fine di ottimizzare il sistema, osservare invece quanta energia è consumata dalla fase di pre-innesco in rapporto all'energia totale della scarica, come riportato nella fig.7. Rispetto a quanto già osservato con la durata della fase di pre-innesco, l'energia dissipata in questa fase non mostra alcun segno di correlazione con la tensione di carica, e si attesta anzi in modo piuttosto costante attorno ai  $5 \pm 1$  J.

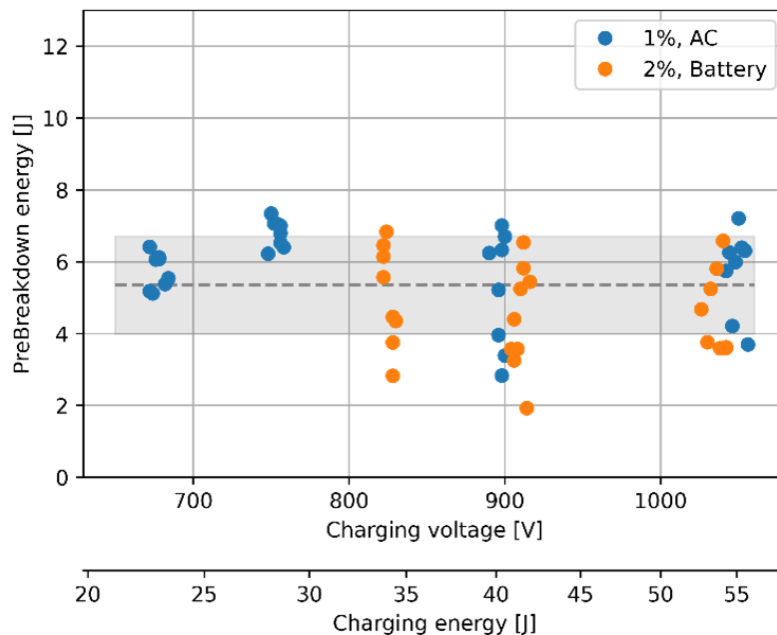
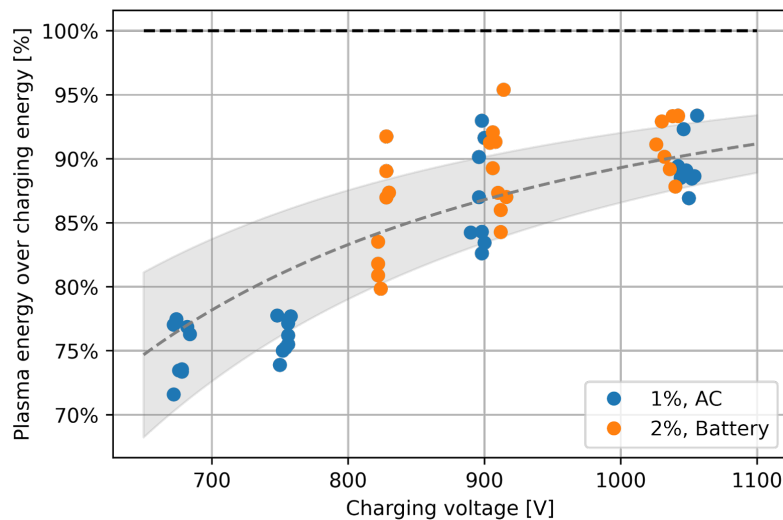


Figura 7: Energia consumata nella fase di pre-innesco al variare della tensione di carica; nella seconda scala è riportata l'energia totale immagazzinata nei condensatori. Ogni punto rappresenta una misura.

Similmente si può stimare la resistenza del sistema in tale fase: risulta pari a  $4,3 \pm 0,3 \Omega$  nel caso della soluzione al 2% e  $7,5 \pm 0,5 \Omega$  della soluzione all'1%, anch'essa indipendente dalla

tensione. Rimane una grande variabilità nei dati, a riconferma dell'aleatorietà del fenomeno di cui precedentemente discusso.

Dal punto di vista dell'efficienza del sistema, questo suggerisce che è conveniente lavorare a tensioni più elevate: lavorando intorno a 700 V di tensione di carica, la corrispondente energia immagazzinata nei condensatori corrisponde a 25 J (si veda la seconda scala nella fig.7), il che significa che circa il 20 % dell'energia viene dissipata prima della scarica. Salendo fino a 1000 V, ovvero 50 J, questa percentuale scende sotto il 10 %. Questo può essere meglio evidenziato dalle fig.8, in cui viene riportata, in funzione della tensione di carica dei condensatori, la frazione dell'energia di carica dei condensatori che viene dissipata nella cella durante la fase di plasma. Questa energia dissipata è ottenuta per differenza tra l'energia di carica e quella dissipata nella fase di pre-scarica.



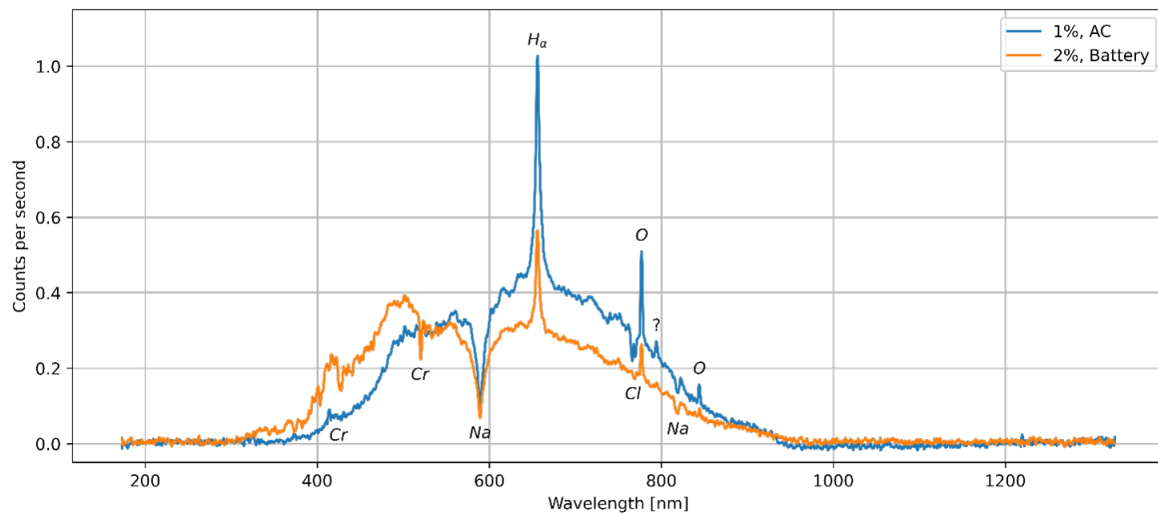
*Figura 8: Energia dissipata durante la fase di plasma diviso l'energia di carica dei condensatori, in funzione della tensione di carica. Ogni punto rappresenta una misura.*

Si può osservare che a basse tensioni l'energia dissipata è circa il 75% dell'energia dei condensatori, e sale oltre il 90% alle tensioni più alte. Per correttezza va tenuto conto del fatto che in questo calcolo si è trascurata l'energia nei vari elementi del circuito, inclusi i cavi, che dovrebbe comunque essere piccola.

È anche importante evidenziare che è stata tenuta traccia dell'ordine progressivo delle misure, e si è verificato se la variabilità osservata nei dati presentasse una regolarità nel tempo, nell'ipotesi ad esempio che sia data dall'acqua che si sporca o dalla corrosione degli elettrodi. In realtà, il rumore nelle misure si è dimostrato non correlato dall'ordine progressivo delle stesse, portandoci a scartare tale ipotesi e facendo prevalere l'idea di un carattere stocastico intrinseco del processo fisico emergente.

## 4. Misure spettroscopiche

Al fine di valutare le specie chimiche coinvolte nel processo, sono state effettuate delle misure spettroscopiche di emissione della scarica. Il tipico spettro, in un intervallo che copre il visibile e parte dell'ultravioletto e del vicino infrarosso, è mostrato in fig.9, per due casi: una scarica in acqua con salinità all'1%, alimentata col sistema in AC, ed una con salinità al 2%, alimentata col sistema a batteria.



*Figura 9: Spettri di emissione di radiazione elettromagnetica da parte del plasma, misurati per due diverse salinità dell'acqua.*

Oltre alle righe dell'assorbimento tipiche del sodio e del cloro (dal sale disciolto in acqua) e del cromo (dalla corrosione degli elettrodi e/o dal vetro delle finestre), sono chiaramente visibili le linee di emissione di atomi di idrogeno ed ossigeno eccitati. Questo conferma che la scarica avviene effettivamente in acqua e coinvolge le sue molecole. Rimane un picco non identificato a 794 nm: a questo livello di approfondimento non è stato possibile identificare nessun elemento che emetta a quella lunghezza d'onda.