

“Lunghezza Efficace, Prestazioni ed Efficienza del Catodo Cavo”

“Effective Length,
Performance and Efficiency
of Hollow Cathode”

Relatore:

Prof.re Fabrizio Paganucci

Correlatore:

Prof.re Emanuele Pace

Candidato:

Matteo Cammilli

Per Olga

Ringraziamenti:

Ringrazio tutti coloro che hanno contribuito a questo lavoro, il Prof. Fabrizio Paganucci per i preziosi consigli e chiarimenti.

Un grazie particolare va a Daniela Pedrini che oltre ad aver fornito gran parte del materiale mi ha seguito costantemente e pazientemente durante tutto il percorso in questo campo per me quasi del tutto nuovo.

Ringrazio tutti coloro che mi hanno sostenuto nelle difficoltà di questo percorso, i miei amici.

La mia famiglia niente avrei potuto, nulla posso o potrei senza di voi.

Grazie Chiara.

Indice:

Cap 1 : Introduzione	1
1.1 Glossario	
1.2 Formule e Grandezze Utili	
1.3 Scopo della tesi	
Cap 2 : Propulsione elettrica	6
2.1 Generalità	
2.2 Tipologie di propulsori	
2.3 Il plasma	
Cap 3 : Catodo cavo	16
4.1 Principali tipologie e caratteristiche	
4.2 Il catodo cavo e la lunghezza efficace	
Cap 4 : Lunghezza efficace	20
5.1 Introduzione	
5.2 Metodi di stima	
5.3 Cosa influenza la lunghezza efficace	
5.4 Metodi per massimizzare la lunghezza efficace	
Cap 5 : Conclusioni	32
Bibliografia	35

1. Introduzione:

1.1 Glossario:

Riportiamo qui di seguito, con il loro significato, alcuni termini che ricorreranno spesso nell'elaborato e a cui rimanderemo tramite la dicitura *vedi glossario* (vg).

Payload: Carico utile; la parte di massa del veicolo non strettamente collegata alle necessità di decollo, navigazione ed eventuale rientro.

Spinta (Thrust): La forza propulsiva generata tramite l'eiezione del propellente nella direzione opposta rispetto a quella di movimento.

Dispositivi a Bassa Spinta (low-thrust): è quella classe di dispositivi caratterizzata da alti valori di impulso specifico e bassi valori di spinta, raggiungono le stesse velocità dei dispositivi ad alto valore di spinta in tempi molto maggiori ma con minor consumo di propellente.

Potenza esterna e Supporto energetico esterno: a differenza dei propulsori chimici in cui tutta l'energia è immagazzinata nel propellente i propulsori elettrici richiedono una fonte di energia ulteriore per dare tensione ai componenti elettrici; in fase progettuale è quindi necessario tener conto della massa associata al supporto energetico (M_e).

Lavoro di estrazione (work function): il quantitativo minimo di energia che consente ad un elettrone di lasciare la superficie del metallo nell'ambito dell'effetto termoionico.

Sputtering: è un processo per il quale si ha emissione di atomi, ioni o frammenti molecolari da un materiale solido bombardato da particelle energetiche (generalmente ioni).

Distribuzione Maxwelliana: descrive la distribuzione di probabilità per la velocità delle particelle in un gas ideale all'equilibrio termico.

Corrente di Scarica: è data dal flusso di carica che attraversa l'orifizio nell'unità di tempo, questa fornisce tra l'altro il dato quantitativo delle cariche immesse nel propulsore

1.2 Formule e grandezze utili:

La classe di propulsori di cui ci occuperemo è quella dei propulsori elettrici che utilizzano campi elettrici e/o magnetici per accelerare il propellente come fonte di spinta per il veicolo.

Definiamo qui di seguito una serie di grandezze che sono generalmente usate per studiare tutti i processi di propulsione nello spazio e che sono quindi valide anche nel caso di propulsori elettrici. Partiamo proprio dalla Spinta (*Thrust*) definendola come,

$$T = \dot{m}u_e$$

dove \dot{m} indica la variazione nel tempo della massa del veicolo e u_e la *velocità efficace di scarico*, ossia il valore di velocità con cui il propellente viene espulso misurato nel sistema di riferimento del propulsore.

Trascurando effetti di eventuali campi gravitazionali possiamo poi integrare l'equazione di moto,

$$m\dot{v} = T$$

ottenendo una relazione che lega la variazione di massa del veicolo alla conseguente variazione di velocità:

$$\Delta v = u_e \ln \frac{M_i}{M_f}$$

dove M_i e M_f sono rispettivamente la massa iniziale e quella finale. Questa legge, valida nell'ipotesi di u_e costante, è chiamata *legge di Tsiolkovsky*. Considerando poi che solitamente le specifiche del propulsore

vengono basate sulla richiesta di uno specifico Δv possiamo invertire la relazione e quindi calcolare la variazione di massa necessaria come,

$$\frac{M_p}{M_i} = \frac{M_i - M_f}{M_i} = 1 - e^{-\frac{\Delta v}{u_e}}$$

dove M_p è la massa del propellente.

Di conseguenza per massimizzare il carico pagante (*payload*) dovremo costruire un propulsore in grado di accelerare il propellente a velocità tali da raggiungere il Δv richiesto con minor dispendio di propellente.

Può essere utile definire l'*impulso specifico* (I_{sp}), come

$$I_{sp} = \frac{T}{\dot{w}} = \frac{\dot{m}u_e}{\dot{m}g_0} = \frac{u_e}{g_0}$$

che si misura in secondi e risulta essere uno dei parametri più utilizzati per caratterizzare le prestazioni di un propulsore e quindi anche per formulare le richieste di una data missione.

1.3 Scopo della tesi:

Tutti i propulsori che utilizzano il bombardamento elettronico per ionizzare il propellente necessitano, a tale scopo, di una sorgente di elettroni ed allo stesso tempo di una fonte di cariche negative che neutralizzi gli ioni espulsi nel getto di scarico.

Tale neutralizzazione previene l'accumulo di carica sul mezzo ed il fenomeno del flusso contrario (*counter-flow*) degli ioni che andrebbe a contrastare la spinta.

Lo scopo del seguente elaborato è quello di studiare le caratteristiche, le specifiche ed il comportamento di un componente capace di assolvere ad entrambe le funzioni sopra menzionate, il *catodo cavo*. L'analisi sarà in particolare focalizzata sulla *lunghezza efficace*, che definiremo più avanti, in relazione alle prestazioni del sistema.

Introdurremo perciò i fondamenti della propulsione elettrica illustrando varie categorie di propulsori ed i loro principi di funzionamento in modo da fornire un quadro complessivo sull'argomento in oggetto.

Confrontando alcuni valori estrapolati dalle misure disponibili con quelli attesi dai modelli si proverà a individuare una possibile via per futuri esperimenti volti a migliorare non tanto le prestazioni, quanto la comprensione che abbiamo dei principi che regolano il funzionamento di questo dispositivo.

Il proposito non sarà dunque quello di dare risposte esaurienti su di un argomento che richiede anni di esperienza sul campo ed una preparazione altamente specializzata, ma piuttosto quella di sollevare questioni, speriamo interessanti, nella prospettiva di un approccio al problema da un diverso punto di vista.

2. Propulsione Elettrica

2.1 Generalità:

La ricerca nello sviluppo di nuove tecnologie per lo spazio è da sempre rivolta ad ottenere il massimo con il minimo indispensabile. In ambito di sistemi propulsivi ciò si traduce nel massimizzare prestazioni ed efficienza del sistema in modo da contenerne la massa, lasciando così una maggiore capacità in termini di carico utile.

Il rovescio della medaglia è però che le tecnologie di avanguardia non sempre sono preferite ad altre magari meno efficienti ma più sicure in termini di affidabilità ed esperienza. Proprio per questo i propulsori chimici sono ancora i più utilizzati nonostante i limiti intrinseci dovuti alla natura delle reazioni chimiche alla base del loro funzionamento.

In termini di efficienza la classe di propulsori più promettente è senza dubbio quella dei propulsori elettrici sebbene non abbia ancora un livello di affidabilità, e quindi di utilizzo, pari a quello dei propulsori chimici. Questa classe è caratterizzata dalla capacità di ottenere alti valori di velocità di scarico (fino a 100 volte superiori rispetto ai propulsori chimici) che permettono di raggiungere impulsi specifici notevoli con consumi di carburante estremamente ridotti. Il “prezzo da pagare” se così si può definire è però la necessità di funzionamento per lunghi periodi di tempo per il raggiungimento degli stessi valori di velocità, o meglio di Δv , dei propulsori chimici.

In generale, la propulsione elettrica comprende tutti quei propulsori che sfruttano campi elettrici e magnetici per accelerare il propellente.

Presenteremo qui di seguito alcune peculiarità di tali propulsori.

Abbiamo detto che le caratteristiche principali dei propulsori elettrici sono un valore molto alto di velocità di scarico e quindi dell'impulso specifico ed un basso consumo di propellente, vediamo adesso come questi parametri sono collegati tra loro.

Prendiamo ad esempio un propulsore che debba garantire per un tempo t_p una spinta T , la massa del propellente può essere espressa come

$$M_p = \dot{m}t_p = \frac{Tt_p}{g_0 I_{sp}} = \frac{I_{tot}}{g_0 I_{sp}}$$

dove I_{tot} è l'impulso totale della missione. Come era logico aspettarsi la massa del propellente M_p è inversamente proporzionale all'impulso specifico.

La principale differenza fra propulsori di tipo chimico e propulsori di tipo elettrico consiste nel fatto che mentre in quelli chimici la fonte di energia risiede nel propellente stesso ed è estratta tramite una reazione esotermica, nei propulsori elettrici la fonte di energia è esterna al propellente.

Questi necessitano dunque di una fonte di energia ulteriore diversa dal propellente che ne permetta l'accelerazione. Ciò comporta che nel calcolo delle prestazioni si debba tener conto anche della massa del sistema di alimentazione o *supporto energetico esterno* (vg), M_e , che consideriamo proporzionale alla potenza totale richiesta P

$$M_e = \alpha P = \frac{\alpha T u_e}{2\eta_T} = \frac{\alpha T g_0 I_{sp}}{2\eta_T}$$

dove α è la *massa specifica* ossia la massa dell'impianto di potenza per unità di potenza elettrica generata ($\alpha = M_e / P$) e inoltre introduciamo l'efficienza di spinta η_T . Tale efficienza è definita come il rapporto tra la quantità minima di potenza necessaria a generare un certo valore di spinta (P_T) e la potenza elettrica disponibile P

$$\eta_T = \frac{P_T}{P} = \frac{\dot{m}u_e^2}{2P} = \frac{g_0 I_{sp} T}{2P}$$

questa formula tra l'altro ci mostra che fissata la potenza disponibile P e l'efficienza di spinta η_T all'aumentare di I_{sp} diminuirà la spinta T . Dato che i propulsori elettrici sono caratterizzati da alti valori di impulso specifico li definiremo dispositivi *low-thrust* (vg) in cui i Δv sono raggiunti tramite una accelerazione prolungata nel tempo.

Osservando poi le due formule per M_e e M_p è evidente che debba esistere un valore ottimale per I_{sp} , questo si trova minimizzando la somma delle due masse

$$I_{sp,opt} = \frac{1}{g_0} \sqrt{\frac{2\eta_T t_p}{\alpha}}$$

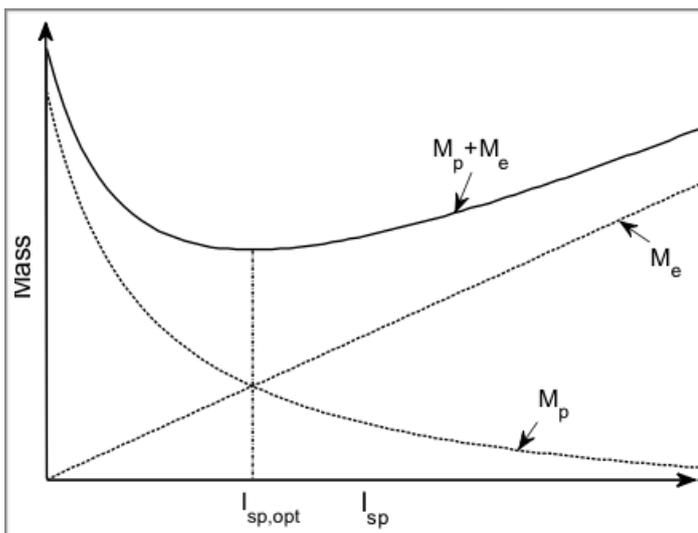


Fig 2.1: andamenti qualitativi di M_e e M_p in funzione dell'impulso specifico.

osserviamo quindi come tale valore ottimale dipenda dall'efficienza di spinta η_T , dalla massa specifica α e dalla durata della missione t_p .

I propulsori elettrici possono utilizzare come propellente gas inerti, come lo xenon oppure, meno frequentemente, alcuni metalli alcalini come il cesio ed il litio.

In genere il propellente maggiormente impiegato è proprio lo xenon data la bassa pericolosità, la tendenza a non condensarsi sui componenti della missione tenuti a bassissime temperature e la facilità di stoccaggio con serbatoi relativamente leggeri.

2.2 Tipologie di propulsori:

I propulsori elettrici possono essere suddivisi in tre categorie principali, *elettrotermici*, *elettrostatici* ed *elettromagnetici*. La nomenclatura rispecchia il metodo utilizzato per accelerare il propellente.

Elenchiamo brevemente i principali tipi di propulsori elettrici e le loro caratteristiche.

Resistogetti (Resistojets)

Sono propulsori *elettrotermici* nei quali il propellente viene riscaldato tramite il passaggio all'interno di una camera o di un componente riscaldato per mezzo di un resistore posto prima dell'ugello di scarico. La velocità di scarico è ovviamente legata alla temperatura del propellente e quindi all'efficacia del sistema di scambio termico. Tali fattori assieme alle massime temperature tollerate dall'apparato limitano solitamente I_{sp} a valori inferiori ai 500 s. Il grande pregio di questa classe di propulsori è di poter utilizzare praticamente ogni genere di fluido propellente.

Arcogetti (*Arcjets*)

Anche questi rientrano nella categoria degli *elettrotermici*, infatti generano spinta riscaldando il propellente tramite il passaggio di questo attraverso una forte scarica elettrica posta in linea con l'ugello di scarico. Non si ha in questo caso generazione di plasma dato lo scarso livello di ionizzazione del propellente.

Anche in questa tipologia di propulsori, seppur più efficienti nello scambio termico rispetto ai resistogetti, avremo valori di I_{sp} relativamente bassi ossia inferiori ai 1500 s, limite dovuto principalmente alle massime temperature tollerate dai materiali.

Propulsori ionici a griglia (*Gridded Ion Thrusters*)

Questo tipo di propulsori utilizza varie tecniche per ionizzare il propellente ad esempio radiofrequenze, microonde, il catodo cavo e in alcuni casi può bastare un semplice filamento di tungsteno.

Rientrano nella categoria degli *elettrostatici*, infatti utilizzano una griglia il cui potenziale permette di estrarre e successivamente accelerare gli ioni del plasma, con voltaggi che superano i 10 KV.

I propulsori ionici sono caratterizzati da alti livelli di efficienza (dal 60% all' 80%) e alti valori di impulso specifico (dai 2000 fino ai 10'000 s) se comparati con gli altri tipi.

Propulsori a effetto Hall (*Hall Thruster*)

Questo tipo di propulsori, da alcuni considerati *elettrostatici* da altri *elettromagnetici*, utilizzano l'azione combinata di un campo elettrico ed uno magnetico per generare il plasma e successivamente accelerarne gli ioni.

In pratica gli ioni sono accelerati dal campo elettrico assiale, mentre il campo magnetico radiale fa sì che gli elettroni, generati da un catodo cavo, permangano all'interno del propulsore in modo da ionizzare il propellente.

Efficienza e I_{sp} sono inferiori rispetto ai propulsori ionici, ma a parità di potenza esterna (vg) richiesta hanno valori più alti di spinta e sono inoltre più semplici da assemblare.

Electrospray/Field Emission Electric Propulsion Thrusters (FEEPs)

Questi due tipi di propulsori elettrostatici sono caratterizzati dal generare una spinta estremamente bassa (da pochi μN a pochi mN) con un impulso specifico dell'ordine dei 10^4 s. I propulsori *electrospray* estraggono e successivamente accelerano (grazie a campi elettrici molto intensi) ioni o piccole gocce cariche da un liquido conduttivo iniettato tramite un piccolo orifizio all'interno del propulsore.

Per quanto riguarda i FEEPs, essi trasportano metalli liquidi (solitamente cesio per la sua bassa energia di ionizzazione e l'alto peso atomico) all'interno di un campo elettrico generato da un potenziale dell'ordine dei 10 KV che estrae e accelera gli ioni. Il basso valore di spinta li rende adatti a propulsori di controllo utilizzati per manovre di precisione.

Propulsori per induzione a impulso (Pulsed Inductive Thrusters, PITs)

Questi sono propulsori elettromagnetici che tramite impulsi di corrente inviati periodicamente in una spira generano un campo magnetico che ionizza il propellente e successivamente accelera gli ioni estratti. La spinta è regolata tramite la frequenza degli impulsi.

PPTs (*Pulsed Plasma Thrusters*)

Anche questi sono propulsori elettromagnetici, in questo caso però gli impulsi di corrente vengono utilizzati per creare una scarica che ionizzerà una frazione del propellente solido, solitamente Teflon. La stessa corrente produce il campo magnetico che accelererà gli ioni.

Propulsori Magnetoplasmadinamici (*Magnetoplasmadynamic Thrusters, MPDTs*)

Sono dispositivi elettromagnetici che utilizzano una scarica elettrica per ionizzare il propellente che viene in seguito accelerato tramite la risultante forza di Lorentz dato il campo magnetico presente. In alcuni casi sia la scarica che il campo magnetico sono generati dal flusso del plasma stesso (Self Field-MPD), mentre in altri il campo è applicato dall'esterno (Applied Field-MPD).

Questi propulsori sono caratterizzati da alti valori di *potenza operativa*, necessari a generare impulsi specifici abbastanza elevati, producono quindi valori di spinta maggiori rispetto ad altri modelli.

Tipo	I_{sp} (s)	T (mN)	Efficienza (%)
Resistojet	200-350	200-300	65-90
Arcjet	400-1000	200-1000	30-50
Ion engine	1500-5000	0.01-200	60-80
Hall thruster	1500-2000	0.01-2000	30-50
Magnetoplasmadynamic (MPD)	2000-5000	0.001-2000	30-50
Pulsed Plasma Thrusters (PPT)	600-2000	0.05-10	10

Fig 2.2: *principali modelli di propulsore con i relativi parametri di prestazione.*

2.3 Il plasma:

Si definisce *plasma* un sistema la cui dinamica è dominata dalle forze elettro-magnetiche: il plasma è l'insieme delle particelle cariche e dei campi da esse generate.

Questa definizione risulta più chiara se la si inquadra in uno schema quantistico. In meccanica quantistica infatti i campi possono essere rappresentati da particelle e ciò permette di descrivere un plasma come un insieme di particelle discrete, che comprende sia le particelle "vere" (elettroni, ioni, atomi), sia le particelle che rappresentano il campo elettromagnetico (fotoni) o l'eccitazione del sistema (fononi).

Tale approccio non sarà comunque oggetto di approfondimento in questo lavoro.

Un gas ionizzato è un esempio di plasma ed è anche il tipo di plasma più frequente in natura e quello di maggior interesse nel presente elaborato.

Il grado di ionizzazione, X , si può definire come il rapporto tra la concentrazione di ioni e la concentrazione globale di ioni e atomi neutri:

$$X = \frac{n_i}{n_i + n_n}$$

Se X è minore di 10^{-4} allora parliamo gas debolmente ionizzato, se maggiore di gas fortemente ionizzato.

In generale il plasma viene considerato mediamente neutro, infatti qualsiasi variazione alla neutralità macroscopica induce un forte campo elettrico che la ristabilisce. Vediamo un po' più in dettaglio cosa significa.

È evidente che la formazione di una carica spaziale può durare soltanto nel caso in cui l'altezza della barriera di potenziale del campo generato dalle cariche stesse sia minore dell'energia cinetica (agitazione termica) di elettroni e ioni. La distanza caratteristica massima di separazione delle cariche nel plasma è detta lunghezza di Debye

$$l_{De} = \sqrt{\frac{T_e \epsilon_0}{n_e e^2}}$$

Se ora si considera il moto degli elettroni dopo la violazione della neutralità vediamo come sugli elettroni agisca una forza attrattiva da parte del campo elettrico prodotto dagli ioni di intensità pari a $-eE$. Tale forza porta l'elettrone a descrivere un moto armonico identificabile da una frequenza ω_e che si può dimostrare essere

$$\omega_e = \sqrt{\frac{n_e e^2}{m_e \epsilon_0}}$$

In maniera analoga è possibile assegnare una frequenza naturale a ciascun altro tipo di particella con carica q_α , densità n_α e massa m_α .

Dunque mediamente le cariche rimarranno separate per tempi τ dell'ordine di ω_e^{-1} .

Le condizioni di quasi neutralità saranno valide nel limite in cui osserviamo sistemi di dimensioni caratteristiche $L \gg l_{De}$, con parametri che variano con tempi caratteristici $t \gg \tau$.

Pur non essendo strettamente necessario per lo sviluppo dei successivi ragionamenti delineiamo il modello semplificato da cui derivano i valori presi in considerazione nel presente lavoro.

Consideriamo in particolare:

- il plasma è visto come fluido composto da particelle neutre e particelle cariche la cui proporzione è data dal grado di ionizzazione e le cui velocità seguono una distribuzione *Maxwelliana* (vg).
- supporremo che le collisioni tra le particelle più massive, ioni e neutri, facciano sì che la temperatura di queste specie sia la stessa.
- le pareti del catodo siano in equilibrio termico con il catodo stesso. Tale ipotesi è giustificata dal fatto che assumeremo tempi scala sufficienti alla diffusione del calore dal gas alle pareti del catodo.
- gli effetti dovuti ad eventuali campi magnetici sulla pressione siano trascurabili rispetto al termine gasdinamico.

3. Catodo cavo

3.1 Principali tipologie e caratteristiche:

I primi modelli di propulsori elettrici utilizzavano come catodo un filamento di tungsteno che riscaldato tramite corrente elettrica produceva gli elettroni necessari a ionizzare il plasma. Solitamente un altro filamento posto direttamente nel flusso di ioni provvedeva poi alla neutralizzazione dello stesso.

Questo metodo estremamente semplice, seppur abbastanza efficace, introduce diverse problematiche intrinseche come ad esempio la breve vita dei filamenti sottoposti a sollecitazioni estreme di natura termica e meccanica. Ad esempio l'alta temperatura di estrazione per il tungsteno richiede grande dispendio di energia e limita la durata del filamento a causa dell'elevata evaporazione.

Tali problematiche sono state risolte con l'introduzione del *catodo cavo*. Questo consiste sostanzialmente in un cilindro cavo di materiale refrattario, nel quale è ricavato un orifizio posto all'estremità terminale.

Nel tratto immediatamente precedente l'orifizio si troverà l'*inserto* (*insert*), anch'esso cilindrico, posto internamente al corpo del catodo, costituito di un materiale caratterizzato da una bassa temperatura di estrazione.

Solitamente la zona dell'inserto è circondata inoltre da un *riscaldatore* (*heater*) per portare l'inserto alla temperatura di funzionamento.

Esistono tuttavia catodi privi sia dell'orifizio che dell'inserto, denominati Single Channel Hollow Cathodes (SCHCs) ed in questo caso l'emissione avviene direttamente dal metallo refrattario del tubo.

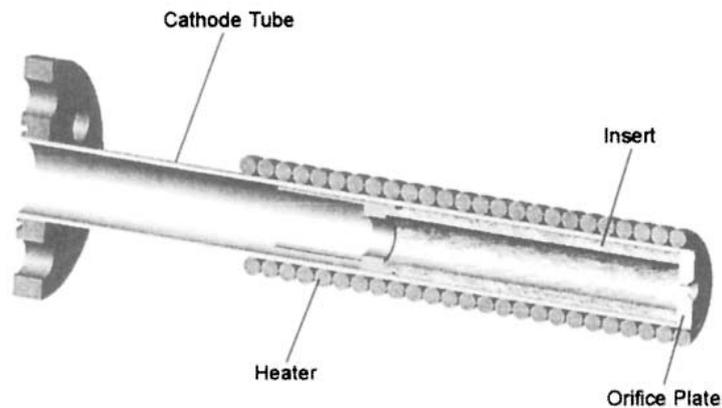


Fig 3.1: *spaccato esemplificativo della struttura di un tipico catodo cavo.*¹

Dunque gli elettroni estratti dall'inserto ionizzano il gas che attraversa il catodo formando così il plasma, questo verrà poi immesso nel propulsore per ionizzare il resto del propellente necessario a produrre la spinta.

Le caratteristiche principali che identificano il funzionamento e le prestazioni di un catodo sono:

- la *corrente di scarica*: è data dal flusso di carica che attraversa l'orifizio, questa fornisce il dato quantitativo delle cariche immesse nel propulsore (o nel flusso di scarico) utili a ionizzare il propellente (o a neutralizzarlo). Spesso questo è il parametro in base al quale vengono formulate le richieste per una data applicazione.
- il *flusso di propellente*: questo sarà il minimo indispensabile al mantenimento delle condizioni necessarie alla ionizzazione. Tale processo richiede infatti una pressione minima per il gas neutro al di sotto della quale non si ha ionizzazione, il flusso del propellente è uno

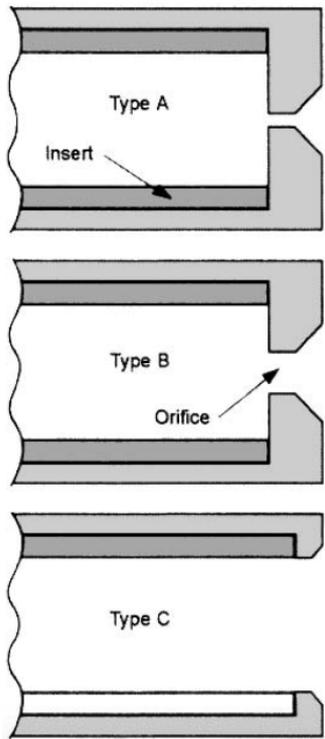
¹ Dan M. Goebel - Ira Katz, *Fundamentals of Electric Propulsion - Ion and Hall Thrusters*, John Wiley & Sons, Inc., Publication

dei parametri con i quali si controlla tale pressione. Vedremo in seguito che tale parametro influisce anche nel valore della *lunghezza efficace*, di cui parleremo ampiamente nel prossimo capitolo.

- la *geometria del catodo*: questa assieme al flusso del propellente governa la pressione interna del catodo. In particolare sono rilevanti diametro dell'inserto oltre al diametro dell'orifizio.

Contrariamente a quanto può sembrare dal precedente elenco, non vi è una sola configurazione ottimale del catodo. Ogni applicazione richiede infatti particolari valori che si traducono in diverse configurazioni del catodo.

In generale possiamo suddividere le varie configurazioni del catodo in tre categorie identificate dal diametro dell'orifizio. Come vediamo dall'immagine a fianco il *primo tipo (Type A)* è caratterizzato da un



orifizio di diametro ridotto, con un rapporto lunghezza su diametro dell'orifizio a vantaggio della prima. In questo caso avremo una corrente di scarica relativamente bassa² mentre la pressione interna del gas sarà alta. La principale fonte di calore in questo caso consiste nel cosiddetto *riscaldamento di orifizio* (orifice heating), dovuto all'elevata resistenza elettrica del plasma nell'orifizio, che si traduce in potenza dissipata per effetto Joule.

Il *secondo tipo (Type B)* è caratterizzato da un diametro dell'orifizio maggiore della sua lunghezza dunque a differenza del precedente

² Secondo il criterio empirico di Kaufman si può legare corrente di scarica e diametro dell'orifizio tramite la legge:
 $I_{sc} = 12 \text{ A/mm}$.

avrò una maggiore corrente ed una minore pressione interna. La principale fonte di calore è dovuta al continuo bombardamento dell'inserito da parte di elettroni o di ioni; in generale in questa configurazione avrò entrambi i contributi al riscaldamento, ioni/elettroni, la cui proporzione varierà al variare delle condizioni operative.

Il *terzo tipo* (*Type C*) è praticamente privo di orifizio sarà infatti utilizzato per applicazioni che richiedano alti valori di corrente ed avrà una pressione interna molto bassa. La principale fonte di calore sarà costituita dal bombardamento dell'inserito per mezzo di ioni.

Naturalmente questa distinzione non è così netta, è infatti possibile passare in maniera pressoché continua dal primo tipo al terzo variando le caratteristiche del catodo ottenendone comunque un catodo funzionante.

Ciò è evidente anche dal fatto che uno stesso catodo può evidenziare comportamenti di uno piuttosto che di un altro tipo al variare delle condizioni operative: ad esempio operando in condizioni di basso flusso di gas evidenzierà meccanismi tipici del terzo tipo, mentre all'aumentare del flusso diverranno preponderanti gli effetti caratterizzanti secondo e primo tipo.

3.2 Il catodo cavo e la lunghezza efficace:

Un parametro fondamentale nello studio del funzionamento del catodo è la *lunghezza efficace* (L_{eff}). Questa lunghezza identifica la porzione di volume sotteso dall'inserito che è occupato dal plasma.

Infatti in generale vi sarà solo una porzione dell'inserito attivamente coinvolta nella ionizzazione e produzione di plasma la cui estensione, L_{eff} appunto, dipende dalle condizioni operative e dalla geometria stessa del catodo. Nel capitolo seguente analizzeremo i meccanismi che influenzano questa quantità nell'ottica di una maggiore efficienza del sistema.

4. Lunghezza efficace

4.1 Introduzione:

Andiamo adesso a studiare un parametro fondamentale nel controllo delle prestazioni dei catodi cavi muniti di orifizio ossia la *lunghezza efficace*, L_{eff} .

Questa è definita come la porzione di inserto coinvolta direttamente nell'emissione di elettroni, identifica infatti la così detta zona attiva.

Ricordiamo anzitutto che l'emissione degli elettroni da parte dell'inserto avviene fondamentalmente per effetto termoionico, espresso quantitativamente dalla equazione di Richardson-Dushman

$$J = A T^2 e^{-\frac{e\phi}{kT}}$$

dove A è idealmente una costante di valore $120 \text{ Acm}^{-2}\text{K}^{-2}$, T è la temperatura in gradi kelvin, e è la carica elettrica e ϕ è il lavoro di estrazione (vg).

Tramite misure sperimentali si è evidenziato l'andamento reale di A , il quale può variare considerevolmente rispetto al valore teorico a causa delle disomogeneità nella struttura cristallina dell'inserto.

Questo problema è ovviato per molti degli emettitori termoionici in uso tramite un fattore correttivo alla temperatura per lavoro di estrazione

$$\phi = \phi_0 + \alpha T \quad \Rightarrow \quad J = AT^2 e^{-e \frac{(\phi_0 + \alpha T)}{kT}} = DT^2 e^{-\frac{e\phi_0}{kT}}$$

dove ϕ_0 è il valore classico del lavoro di estrazione e α è una costante trovata sperimentalmente.

Inoltre in presenza di un forte campo elettrico sulla superficie del catodo la barriera di potenziale che gli elettroni di conduzione si trovano a dover superare per liberarsi si abbassa, ciò comporta dunque una riduzione del lavoro di estrazione. Questo è il cosiddetto *effetto Schottky* e può essere preso in considerazione introducendo un ulteriore fattore correttivo. Otteniamo quindi una nuova forma per l'equazione Richardson-Dushman

$$J = DT^2 \exp\left(-\frac{e\phi_0}{kT}\right) \exp\left[\left(\frac{e}{kT}\right) \sqrt{\frac{eE}{4\pi\epsilon_0}}\right]$$

dove E è il campo elettrico sulla superficie del catodo.

Perché il valore di E risulti significativo dovremo avere all'interno del catodo cavo una condizione di densità di plasma estremamente elevata altrimenti questo contributo risulterà trascurabile.

4.2 Metodi di stima:

Dato che le ridotte dimensioni del sistema impediscono l'uso di sonde senza alterarne significativamente le condizioni operative, non è possibile una misura diretta³ della lunghezza efficace. Si possono però

³ In realtà, per catodi di dimensioni accessibili, esistono in letteratura (poche) misure dirette.

utilizzare vari metodi che ci forniscono una stima indiretta di tale grandezza. Una stima può essere data considerando l'andamento longitudinale della temperatura per le pareti del catodo: nel grafico del trend della temperatura troveremo tipicamente un picco corrispondente al punto in cui avviene l'emissione massima di elettroni per effetto termoionico. Possiamo quindi considerare la lunghezza efficace come la distanza tra il picco di temperatura e l'orifizio.

Altro metodo è quello di considerare la densità di corrente, assegnando alla lunghezza efficace il valore equivalente alla distanza tra il punto in cui si raggiunge il valore massimo di densità di corrente e l'orifizio.

5.3 Cosa influenza la lunghezza efficace:

I fattori che influenzano la *lunghezza efficace* sono diversi e non sempre univocamente determinati.

Conoscendo i processi di emissione termoionica possiamo anzitutto identificare una prima dipendenza dal *lavoro di estrazione* proprio del materiale considerato anche se una minore temperatura di emissione non si traduce automaticamente in una maggiore lunghezza efficace.

Dobbiamo infatti anche tenere conto del regime di carica spaziale che si viene a creare tra la superficie dell'inserto ed il plasma.

La condizione di massima densità di corrente verrà dunque raggiunta nel punto dove vi sono al tempo stesso condizioni di temperatura favorevoli all'emissione di elettroni ed il plasma garantisce il giusto assorbimento di cariche negative della regione adiacente l'inserto così da rimuoverne in parte l'effetto schermante.

È possibile evidenziare inoltre una dipendenza dalla *densità del gas neutro* e quindi dalla sua pressione.

Nelle misure si considera spesso per comodità il *flusso di massa* anziché la densità, in virtù del fatto che esso, tenuti costanti gli altri parametri, è comunque direttamente proporzionale alla densità. Il flusso di massa è misurato solitamente in *sccm (standard cubic centimeters per minute)* centimetri cubi standard al minuto.

Aumentando il flusso a parità di diametro del catodo, o altresì riducendo il diametro mantenendo il flusso inalterato, avremo uno spostamento del massimo della temperatura verso l'orifizio, dunque una diminuzione della lunghezza efficace.

Emblematica in tal senso è la figura sottostante (Fig 4.1) che nel caso specifico si riferisce ad un catodo di tantalio⁴ con diametro interno di 2 mm, alimentato ad Argon.

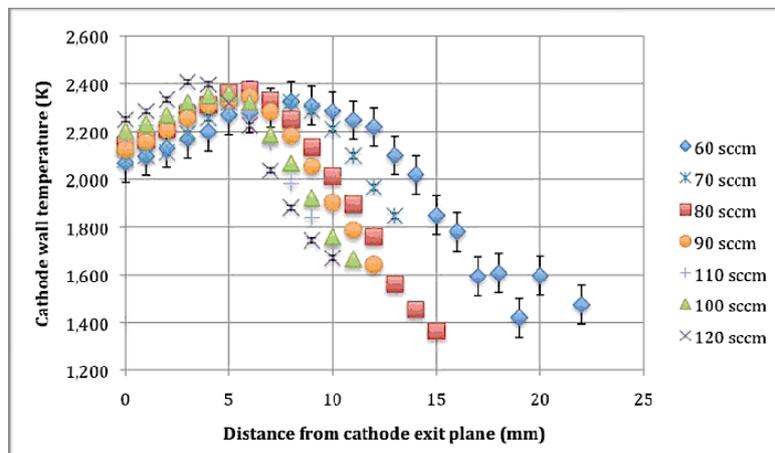


Fig 4.1: profilo assiale di temperatura con una corrente di scarica di 25A.

⁴ Elemento chimico essenziale in moltissime applicazioni tecnologiche la cui estrazione che per l'80% avviene nelle miniere del Congo è stata ed è tutt'ora causa di una tra le peggiori guerre del nostro tempo.

Il terzo e più controverso fattore che sembra influenzare la lunghezza efficace è la *corrente di scarica* (v_g). La controversia sta nel fatto che stime della lunghezza ottenute nel corso di diverse misurazioni su vari tipi di catodi giungono a conclusioni diverse o addirittura contrastanti.

Ad esempio tramite misure di densità di corrente svolte da Krishnan⁵, per un catodo di tungsteno di 2 mm di diametro, sembra che corrente di scarica e lunghezza efficace siano inversamente proporzionali. Mentre altre misure, stavolta di temperatura, svolte da Cassady⁶ per un catodo di tungsteno di 6 mm di diametro, sembrano approdare alla conclusione opposta, come possiamo apprezzare dai grafici (Fig 4.2).

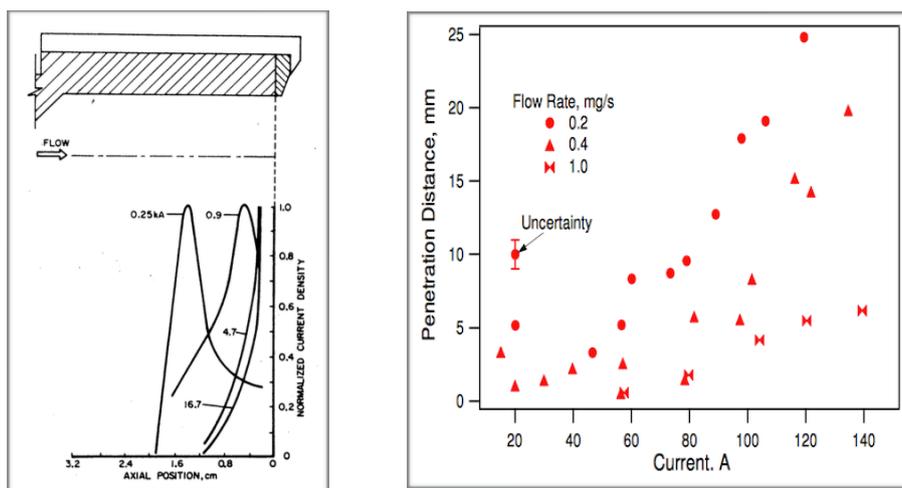


Fig 4.2: sulla sinistra un grafico dell'andamento trovato da Krishnan a destra quello individuato da Cassady.

⁵ Krishnan M., "Physical Processes in Hollow Cathodes", Journal of Propulsion

⁶ L. Cassady, E. Choueiri. "Experimental and Theoretical Studies of the Lithium-fed Multichannel and Single-channel Hollow Cathode", International Electric Propulsion Conference-2005.

Vi sono Inoltre dati raccolti da Downey⁷ per un catodo di tantalio di 2 mm di diametro che non evidenziano alcun legame tra corrente di scarica e lunghezza efficace, come possiamo vedere dal grafico sottostante (Fig 4.3).

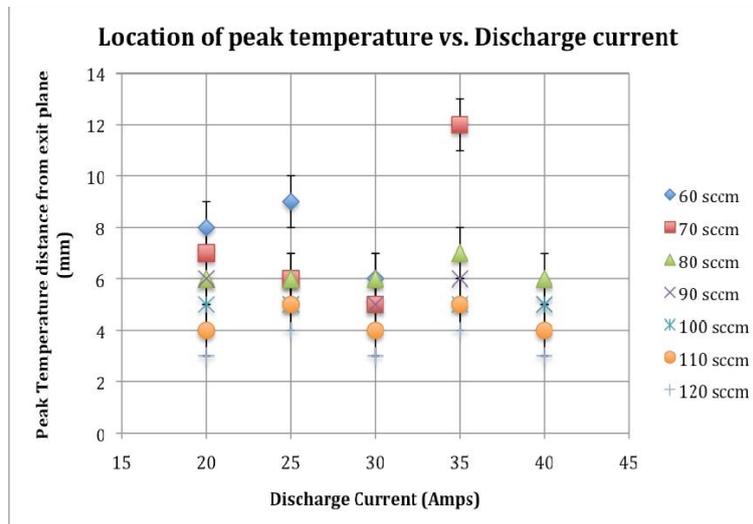


Fig 4.3: andamento del picco di temperatura al variare della corrente di scarica preso il flusso come parametro.

È evidente dunque che tale parametro non sia il migliore con il quale indagare le prestazioni del catodo o comunque, nel caso in cui fossimo obbligati a tenerne conto a causa di una richiesta specifica, sarà doveroso un approfondimento che evidenzi l'andamento specifico del catodo in esame.

⁷ Downey R. T., "Theoretical and Experimental Investigation into High Current Hollow Cathode Arc Attachment", PhD Dissertation, University of Southern California, 2008.

5.4 Metodi per massimizzare la lunghezza efficace:

Quanto detto sopra evidenzia come i fattori che governano i processi di emissione nel catodo cavo siano molteplici e tutti in qualche modo correlati l'uno con l'altro. Infatti variando una delle condizioni del sistema, geometria, flusso di massa, temperatura, ecc., prese le altre come parametri, gli andamenti che otteniamo sono fortemente dipendenti, e quasi mai in maniera banale, dai valori scelti per i parametri.

Nonostante questo ci porti a concludere che la strategia migliore per affrontare la questione delle prestazioni di un catodo sia quella di considerare il più possibile il problema d'insieme, ci limitiamo adesso ad esaminare il solo sistema dell'inserito allo scopo di massimizzare la lunghezza efficace.

Come detto all'inizio del capitolo, il processo che governa la ionizzazione nel catodo cavo è quello dell'*emissione termoionica*.

Ogni materiale è caratterizzato da una temperatura utile a mantenere tale emissione nella quantità richiesta, stabilendo quindi le condizioni operative. Questa temperatura sarà determinata a sua volta dalla potenza disponibile e dalle soglie dovute alle caratteristiche di resistenza dei materiali del sistema propulsivo.

Ecco perché la scelta dell'emettitore termoionico dovrà essere fatta subito nelle prime fasi del progetto.

Riportiamo nella tabella (Fig 4.4) il lavoro di estrazione ed i valori della costante di Richardson (D) reperibili in letteratura per i principali materiali utilizzati per gli emettitori.

	A	D	ϕ
BaO-W 411 [12]	120	—	$1.67 + 2.82 \cdot 10^{-4} T$
BaO-W 411 [10]	—	1.5	1.56
LaB ₆ [13]	—	29	2.66
LaB ₆ [14]	—	110	2.87
LaB ₆ [15]	120	—	2.91
LaB ₆ [8]	120	—	$2.66 + 1.23 \times 10^{-4} T$
Molybdenum [8]	—	55	4.2
Tantalum [8]	—	37	4.1
Tungsten [8]	—	70	4.55

Fig 4.4: valori della costante di Richardson e lavoro di estrazione per vari materiali⁸.

Utile a comprendere il comportamento di questi materiali è la seguente figura (Fig 4.5) in cui si individua l'andamento della corrente termoionica al variare della temperatura.

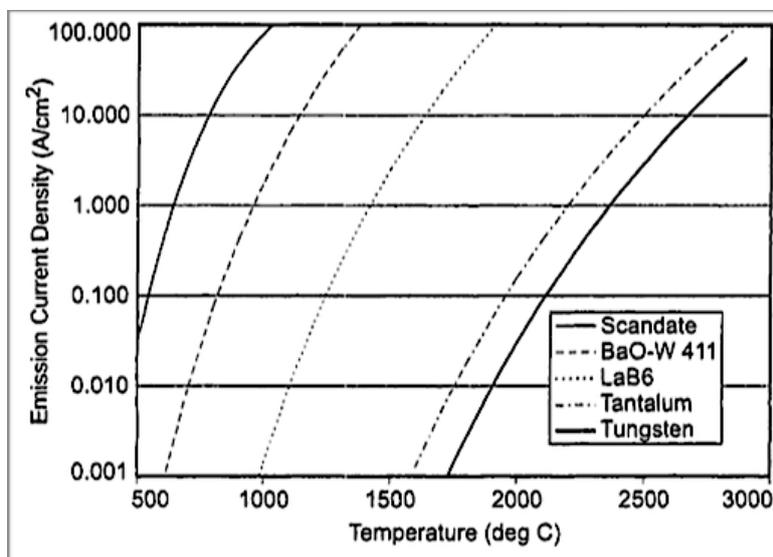


Fig 4.5: andamenti per le correnti termoioniche al variare della temperatura.

⁸ Goebel D. M., Katz I., "Fundamentals of Electric Propulsion: Ion and Hall Thrusters", John Wiley & Sons, 2008.

Come possiamo vedere il fatto che i metalli refrattari⁹ abbiano valori per il lavoro di estrazione superiori ai 4 eV portano a temperature operative estremamente alte.

È evidente come in questo caso le possibilità di azione per aumentare il valore della lunghezza efficace siano limitate, da un lato dal materiale scelto per l'inserto (tramite il lavoro minimo di estrazione), e dall'altro dai limiti energetici imposti dal sistema.

Sarà utile in questo caso quindi fare una considerazione generale sull'efficienza del sistema catodo e valutare il valore della lunghezza efficace in questa ottica (non è detto che il valore massimo di L_{eff} sia quello che massimizza anche l'efficienza dell'apparato).

Studiamo adesso l'altro fattore che influenza la lunghezza efficace, la *pressione del gas neutro*.

La pressione all'interno del catodo cavo è regolata principalmente attraverso il flusso di massa del gas neutro ma dipende anche dalle dimensioni dell'orifizio, essa dovrà essere sufficientemente alta affinché si produca plasma per effetto delle collisioni.

Questa condizione è essenziale per produrre ioni "lenti" ossia a bassa energia cinetica così da allungare la vita dell'inserto preservandolo dall'erosione dovuta al bombardamento ionico detto *sputtering* (vg).

Quindi per quanto riguarda il flusso dovremo individuare il valore minimo per cui si abbia uno stato di equilibrio sufficientemente stabile da garantire la formazione di questo tipo di plasma.

⁹ Solitamente vengono considerati refrattari i metalli che fondono a temperature superiori ai 1850°C.

Ciò che rende difficile questo compito è lo scarso potere dei modelli teorici in nostro possesso.

In particolare attualmente non vi sono modelli capaci di predire la lunghezza efficace senza il supporto di dati empirici. L'attività di ricerca in questo ambito è indirizzata infatti in questa direzione e tramite la raccolta di dati per un ampio range di condizioni e configurazioni catodiche si cerca di giungere ad un modello unitario.

Dunque nel caso del flusso dobbiamo tener conto per quanto possibile dei dati raccolti in casi analoghi a quello d'interesse, e in base a questi e a successive misure dirette trovare la configurazione più efficiente.

Ovviamente esistono tutt'ora modelli, che seppur non in maniera trasversale, permettono una trattazione teorica sicuramente adeguata alle esigenze di questo lavoro.

In particolare potremmo utilizzare, in accordo con il lavoro di Lidsky¹⁰, l'assunzione che la lunghezza efficace possa essere identificata come il luogo ove sia soddisfatta una particolare condizione sulla pressione del gas neutro

$$p \times d \approx 1 \text{ cm Torr}$$

dove p è la pressione del gas neutro e d è il diametro interno del catodo. Il lavoro di Minoo¹¹ mostra come questo valore aumenti debolmente all'aumentare del flusso, ma non dipenda assolutamente dal diametro del catodo.

¹⁰ Lidsky L. M., Rothleder S. D., Rose D. J., Yoshikawa S., Michelson C., Mackin R. J., "Highly Ionized Hollow Cathode Discharge", Journal of Applied Physics, Vol. 33, pp. 2490-2497, 1962.

¹¹ Minoo H., "Etude des Décharges à Cathode Creuse à Flux de Gaz en Régime d'Arc", Thèse d'état, Orsay, 1969.

È ragionevole dunque considerare come direttamente proporzionali diametro e lunghezza efficace e quindi introdurre un nuovo parametro

$$K = p \times L_{eff}$$

Questo può essere calcolato dal prodotto di pressione sperimentale e lunghezza efficace corrispondente (proveniente da misure dirette o indirette) ed assume generalmente il valore di 11 cmTorr.

K fornisce dunque il parametro naturale per identificare la lunghezza efficace all'interno di un qualsiasi modello teorico.

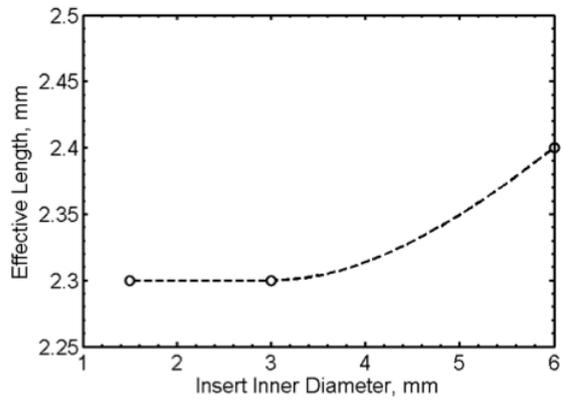
I grafici riportati in (Fig 4.6) descrivono un esempio degli andamenti ottenuti tramite una modellizzazione della lunghezza efficace al variare di tre parametri fondamentali: diametro interno dell'inserto, diametro dell'orifizio e lunghezza dell'orifizio (utilizzata nella tesi di laurea di Daniela Pedrini¹²).

Mostrano in particolare come si comporti la lunghezza efficace al variare della configurazione del catodo (Fig 4.6 a, c, e) a parità di flusso.

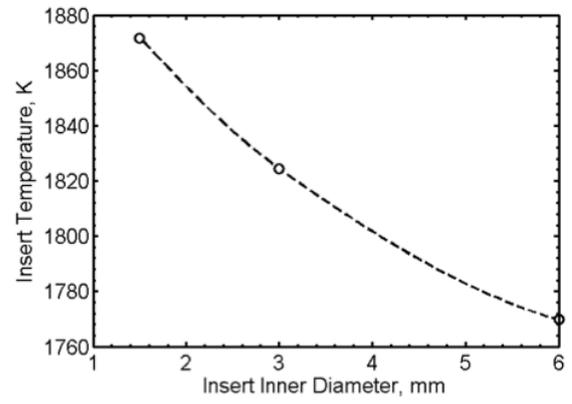
Sappiamo inoltre che l'efficacia del processo di ionizzazione è strettamente legata alla temperatura, sia a causa della sezione d'urto sia per i processi di emissione termoionica dell'inserto. D'altro canto come possiamo osservare dai grafici (Fig 4.6 b, d, f) l'andamento della temperatura, al variare delle caratteristiche del catodo, risulta essere in opposizione con quello della lunghezza efficace.

Dovremmo trovare dunque anche in questo caso uno stato di equilibrio che garantisca il giusto apporto di calore trasferito dagli ioni all'inserto tramite collisioni, senza eccedere nella pressione del gas neutro.

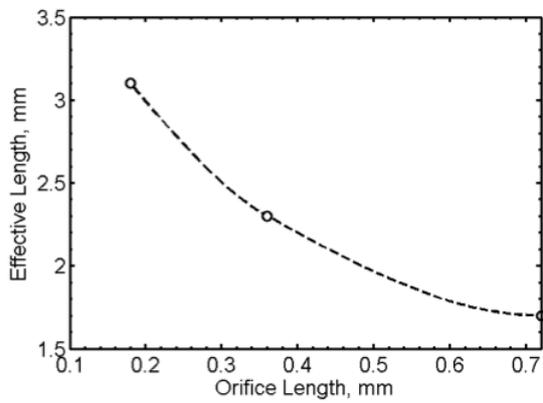
¹² Daniela Pedrini “*Theoretical Modeling Of Low-Current Hollow Cathodes*” Anno Accademico 2011-2012



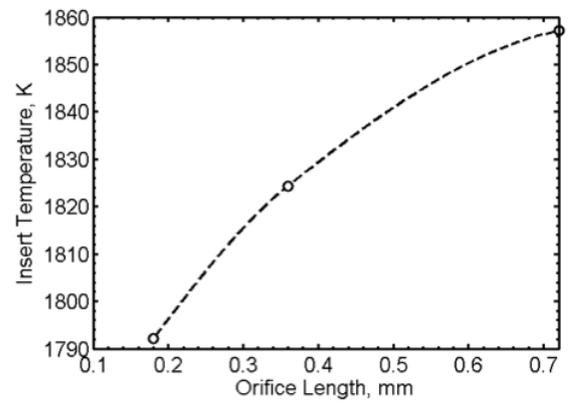
(a)



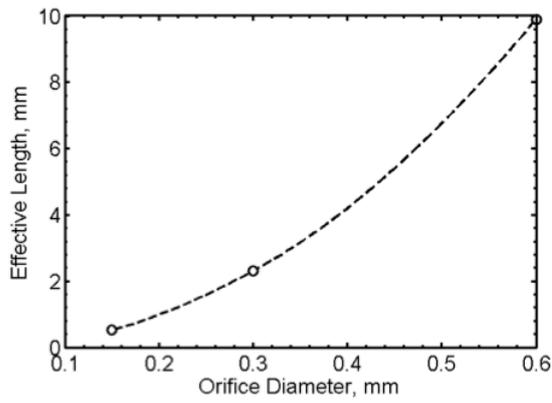
(b)



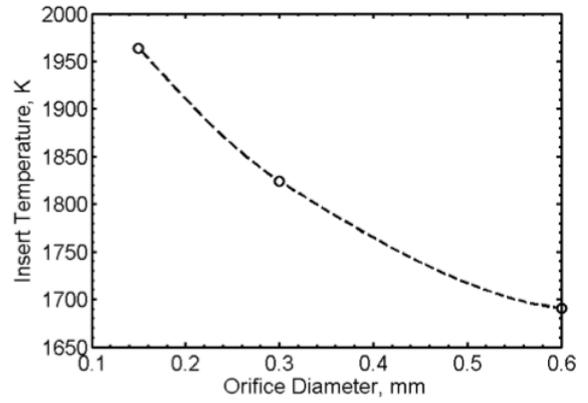
(c)



(d)



(e)



(f)

Fig 4.6: modelli di andamento per la lunghezza efficace e la temperatura al variare delle dimensioni del catodo.

5. Conclusioni

Possiamo concludere con i dati in nostro possesso che massimizzare il valore della lunghezza efficace significa trovare un compromesso tra fattori fortemente correlati gli uni gli altri, spesso in maniera inversa rispetto ai parametri sui quali possiamo agire.

Ciò ci porta a ricercare un ulteriore fattore nella scelta di questi parametri, il quale è peraltro uno dei più importanti, ossia l'efficienza del sistema.

Studiando ad esempio la potenza di scarica in funzione del flusso di massa, a parità di corrente di scarica, (Fig 5.1) troviamo che questa ha un valore minimo per un certo valore di flusso che può essere interpretato proprio come condizione di massima efficienza.

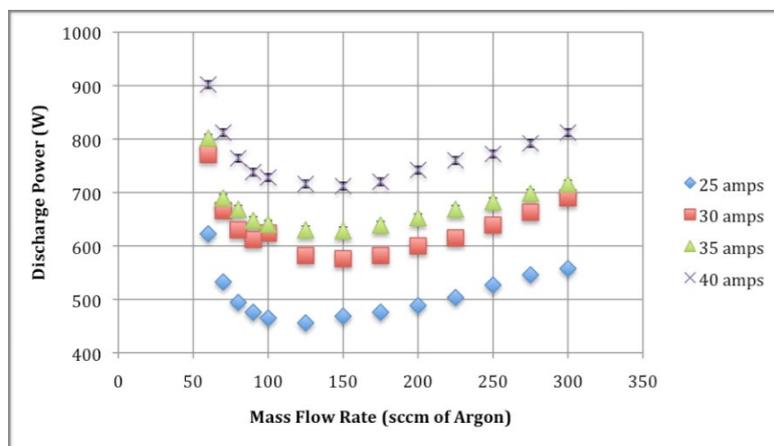


Fig 5.1: *Potenza emessa in funzione del flusso di massa.*

In campo teorico uno studio rigoroso dei fenomeni propri del catodo cavo, dal punto di vista della natura del plasma potrebbe risultare utile nello sviluppo di modelli sempre più vicini alla fisica del sistema.

In particolare si potrebbe così cercare una spiegazione al comportamento singolare della lunghezza efficace al variare dei suddetti parametri.

Ad esempio potrebbe essere interessante valutare, tramite un modello noto di gas, la variazione delle condizioni che abbiamo assunto necessarie per ottenere plasma di tipo collisionale, in altre parole dove in un tubo percorso da gas comprimibile si vengono a creare le condizioni di $p \times d \approx 1$ Torr cm, al variare di geometria, flusso, ecc.

In campo sperimentale potrebbe essere interessante studiare ad esempio l'effetto di campi magnetici esterni sulle prestazioni del catodo, strada peraltro già intrapresa in altri tipi di applicazioni come ad esempio per il cosiddetto microplasma¹³. Questo a maggior ragione riuscendo a sfruttare i campi generati negli altri processi del propulsore così da aumentare ulteriormente l'efficienza del sistema.

¹³ D.-L. Biborosch, B.-J. Lee, J. McGurk, L. Mares, K. Frank, *The Influence of an External Magnetic Field on a "Macro" Hollow Cathode Discharge in Argon*

Bibliografia:

- Dan M. Goebel - Ira Katz, *Fundamentals of Electric Propulsion - Ion and Hall Thrusters*, John Wiley & Sons, 2008
- Daniela Pedrini “*Theoretical Modeling Of Low-Current Hollow Cathodes*” Anno Accademico 2011-2012
- Krishnan M., “*Physical Processes in Hollow Cathodes*”, Journal of Propulsion
- L. Cassady, E. Choueiri. “*Experimental and Theoretical Studies of the Lithium-fed Multichannel and Single-channel Hollow Cathode*”, International Electric Propulsion Conference-2005
- Downey R. T., “*Theoretical and Experimental Investigation into High Current Hollow Cathode Arc Attachment*”, PhD Dissertation, University of Southern California, 2008
- Lidsky L. M., Rothleder S. D., Rose D. J., Yoshikawa S., Michelson C., Mackin R. J., “*Highly Ionized Hollow Cathode Discharge*”, Journal of Applied Physics, Vol. 33, pp. 2490-2497, 1962.
- Mino H., “*Etude des Décharges à Cathode Creuse à Flux de Gaz en Régime d’Arc*”, Thèse d’état, Orsay, 1969
- D.-L. Biborosch, B.-J. Lee, J. McGurk, L. Mares, K. Frank, “*The Influence of an External Magnetic Field on a “Macro” Hollow Cathode Discharge in Argon*”