



Università degli Studi di Padova

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA DEI MATERIALI

TESI

**PROTOTIPO DI UN MINI INCENERITORE AL PLASMA
PER LA PIROLISI DI RIFIUTI MEDICALI**

RELATORE

Prof. V. PALMIERI

CORRELATORI

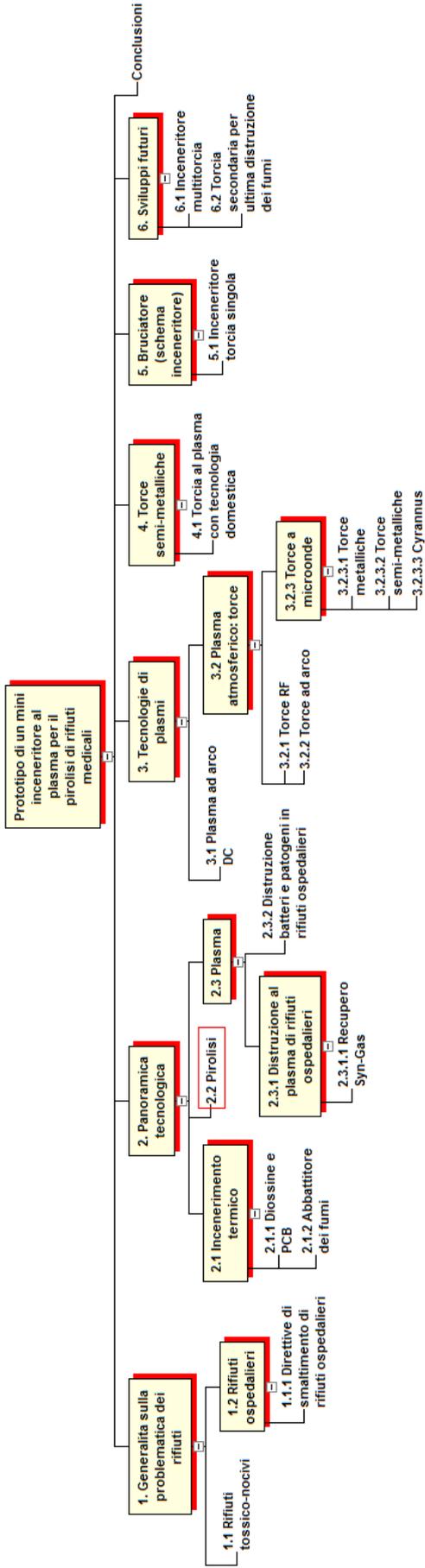
Prof. I. Calliari

Dott. A.A. Rossi

LAUREANDA

AKABERI NAZKHATOON

Matricola n° 604154



INTRODUZIONE

CAPITOLO 1 GENERALITA' SULLA PROBLEMATICAI DEI RIFIUTI	7
1.1 Rifiuti tossico-nocivi	9
1.2 Rifiuti Ospedalieri	10
1.2.1 Direttive di smaltimento di rifiuti ospedalieri	11
CAPITOLO 2 PANORAMICA TECNOLOGIA	19
2.1 Incenerimento termico	19
2.1.1 Diossine e pcb	24
2.1.2 Abbattitore dei fumi	26
2.1.3 Recupero syn-gas	30
2.2 Pirolisi	31
2.3 Pirolisi al Plasma	33
2.3.1 Distruzione al plasma di rifiuti ospedalieri	36
2.3.2 Distruzione di batteri e patogeni in rifiuti ospedalieri	38
CAPITOLO 3 TIPOLOGIE DI PLASMI	43
3.1 Plasma arco DC	45
3.2 Plasma atmosferico: torce	46
3.2.1 Torce RF	47
3.2.2 Torce ad arco	50
3.2.3 Torce a microonde	54
3.2.3.1 Torce metalliche	60
3.2.3.2 Torce semimetalliche	61
3.2.3.3 Cyrannus	63
CAPITOLO 4 TORCE SEMI-METALLICHE	65
4.1 Torcia al plasma con tecnologia commerciale domestica	65
CAPITOLO 5 PROTOTIPO DELL'INCENERITORE A TORCIA MW SEMIMETALLICA	81
5.1 Inceneritore a torcia singola	81
CAPITOLO 6 SVILUPPI FUTURI	87
6.1 Inceneritore multitorcia	87
6.2 Torcia secondaria per ultima distruzione dei fumi	87
6.3 Conclusioni	88

INTRODUZIONE

In questo lavoro di tesi verrà presentato un primo prototipo di un mini inceneritore al plasma per la pirolisi dei rifiuti medicali basato sulla tecnologia delle torce al plasma a microonde (MW) con tecnologia domestica a basso costo.

Si inizia con una breve e generale descrizione sulle problematiche dei rifiuti, della loro classificazione e delle norme che ne regolano lo smaltimento. Quindi si parlerà delle norme necessarie per l'identificazione dei rifiuti medicali ed infine verrà riassunta la modalità di gestione dei rifiuti secondo la normativa in vigore.

Successivamente saranno descritti alcuni metodi di termodistruzione dei rifiuti ospedalieri come la combustione negli inceneritori tradizionali, e alcuni metodi alternativi, come il trattamento al plasma atmosferico, andando ad analizzare vantaggi e svantaggi di ogni tecnologia.

L'attenzione sarà quindi focalizzata sul plasma atmosferico e sulla descrizione delle sue proprietà. Quindi saranno descritti diversi tipi di plasma atmosferico in base alle condizioni operative di alimentazione e delle loro strutture concentrando le nostre attenzioni verso le torce al plasma atmosferico basate sulle microonde.

Quindi si descriverà la realizzazione di una torcia al plasma atmosferico utilizzando i componenti a basso costo dei normali forni a microonde e con l'obiettivo di utilizzare questa torcia sia nel settore industriale che nella ricerca.

Tale torcia, realizzata con componenti commerciali domestici a basso costo, costituirà il cuore del prototipo di mini inceneritore che è stato progettato, realizzato, descritto e testato in laboratorio. Verrà quindi illustrata l'efficacia di trattamento di materiale rappresentativo di rifiuti medicali come: carta, cotone idrofilo e tessuti organici biologici.

Infine verranno descritte le linee guida per gli sviluppi futuri del prototipo al fine di aumentarne l'efficienza nel trattamento dei rifiuti, nel recupero dell'energia derivante dalla combustione dei syn-gas e nella purificazione dei gas da agenti inquinanti.

CAPITOLO 1

GENERALITÀ SULLA PROBLEMATICAZIONE DEI RIFIUTI

In questo capitolo si parlerà del problema dei rifiuti in generale, della loro classificazione, dell'identificazione dei rifiuti sanitari. Verrà poi riassunta la modalità di gestione dei rifiuti secondo la normativa in vigore.

Ogni anno nel mondo si producono miliardi di tonnellate di rifiuti e la loro collocazione rappresenta da sempre un problema ambientale di dimensioni rilevanti. La produzione di rifiuti organici e di altra provenienza, aumenta con la crescita proporzionale della società consumistica moderna. Lo sviluppo di settori industriali e tecnologici, contribuiscono ad una ulteriore produzione di rifiuti di svariati tipi, forse ancora più nocivi e pericolosi, i cosiddetti rifiuti ospedalieri e tossici industriali.

Un interesse particolare negli ultimi decenni riguarda la riduzione degli effetti dei rifiuti sulla natura e sull'ambiente, e la possibilità di recuperare le risorse intrinseche in essi, così come la riduzione della produzione di rifiuti stessi. Il primo livello di attenzione è rivolto alla necessità di prevenire la formazione dei rifiuti e di ridurre la pericolosità, il passaggio successivo riguarda l'esigenza di riutilizzare i prodotti (es. bottiglie) o, in alternativa, di riciclare i materiali (es. riciclaggio della carta). Infine, solo per quanto riguarda il materiale che non è stato possibile riutilizzare e poi riciclare, (come ad esempio i tovaglioli di carta) e il sottovaglio (ovvero la frazione in piccoli pezzi indistinguibili e quindi non riciclabili di rifiuti, che rappresenta circa il 15% del totale), si pongono altre soluzioni del recupero energetico: tramite sistemi a freddo o a caldo, come la bio-ossidazione (aerobica o anaerobica), la gassificazione, la pirolisi e l'incenerimento oppure l'avvio allo smaltimento in discarica. Dunque anche in una situazione ideale di completo riciclo e recupero vi sarà una percentuale di rifiuti residui da smaltire in discarica, o da ossidare per eliminarli e recuperare l'energia. Da un punto di vista ideale il ricorso all'incenerimento ed alle discariche indifferenziate dovrebbe essere limitato al minimo indispensabile. La carenza di efficaci

politiche integrate di riduzione, riciclo e riuso fanno dello smaltimento in discarica ancora l'unica soluzione finale utilizzata.

La classificazione dei rifiuti^[1]

In base alla normativa vigente (art. 184 D.lgs. 152/06) i rifiuti vengono classificati secondo:

1. l'origine: in rifiuti urbani e rifiuti speciali;
2. le caratteristiche di pericolosità, in rifiuti pericolosi e non pericolosi.

La normativa europea, inoltre, cataloga ogni rifiuto in base al cosiddetto codice CER a sei cifre.

Sono rifiuti urbani :

- i rifiuti domestici, anche ingombranti, provenienti da locali e luoghi adibiti ad uso di civile abitazione;
- i rifiuti provenienti dallo spazzamento delle strade;
- i rifiuti di qualunque natura o provenienza, giacenti sulle strade ed aree pubbliche o nelle strade ed aree private comunque soggette ad uso pubblico o sulle spiagge marittime e lacuali e sulle rive dei corsi d'acqua;
- i rifiuti vegetali da aree verdi.ecc.

Sono rifiuti speciali :

- i rifiuti da attività agricole e agroindustriali;
- i rifiuti derivanti dalle attività di demolizione, costruzione, nonché i rifiuti pericolosi che derivano dalle attività di scavo, fermo restante quanto disposto dall'art. 186;
- rifiuti da lavorazioni industriali;
- rifiuti da lavorazioni artigianali;
- rifiuti da attività commerciali;
- i rifiuti derivanti da attività di servizio;
- rifiuti derivanti dalla attività di recupero e smaltimento di rifiuti, i fanghi dalla potabilizzazione;
- i rifiuti derivanti da attività sanitarie;
- le apparecchiature ed i macchinari deteriorati e obsoleti;
- i veicoli a motore, rimorchi e simili fuori uso e loro parti;

Sono rifiuti pericolosi :

I rifiuti pericolosi sono i rifiuti individuati con un asterisco all'interno del catalogo europeo dei rifiuti, di cui alla direttiva europea 532/2000 (allegato D - parte IV - D. lgs. 152/2006).

In particolare, se un rifiuto è identificato come pericoloso mediante riferimento specifico o generico a sostanze pericolose, esso è classificato pericoloso solo se le stesse raggiungono determinate concentrazioni.

1.1 RIFIUTI TOSSICO-NOCIVI

La classificazione di rifiuto come tossico-nocivo fu introdotta dal D.P.R. 915/82 che stabiliva tre tipologie di rifiuti: a) urbani; b) speciali; c) tossico-nocivi.

Questa classificazione è stata però abrogata già nel 1997, quando con l'entrata in vigore del decreto Ronchi n. 22 del 1997, in ossequio alla normativa europea 91/689/CEE, il concetto di rifiuto "tossico e nocivo" veniva sostituito da quello di rifiuto "pericoloso".

Secondo il D.lgs. 152/06 (art. 184, comma 5), sono rifiuti pericolosi quelli contrassegnati da apposito asterisco nell'elenco CER(Codice Europeo dei Rifiuti)2002[1'].

Per "sostanza pericolosa" si intende qualsiasi sostanza classificata come pericolosa ai sensi della direttiva 67/548/CEE e successive modifiche: questa classificazione è soggetta ad aggiornamenti, in quanto la ricerca e le conoscenze in questo campo sono in continua evoluzione. Alcune sostanze pericolose e metalli pesanti sono arsenico, mercurio, cadmio, tallio, berillio, cromoesavalente, piombo, antimonio, fenoli, cianuri organico ed inorganico, isocianati, organoalogenati, solventi clorurati, solventi organici, biocidi e fitofarmaci, residui catramosi, composti farmaceutici, perossidi, clorati, perclorati, azoturi, eteri, sostanze chimiche di laboratorio e/o sostanze nuove con effetti ecobiotossicologici non noti, amianto (polveri e fibre), selenio, tellurio, composti aromatici policiclici sospetti cancerogeni, metalli carbonili, composti solubili rame, sostanze da trattamento superficiale metalli, PCB, PCT, (PCDD, PCDF).^[2] Tali rifiuti possono essere prodotti in diversi stati fisici, come gassosi, liquidi o solidi. Inoltre, un rifiuto pericoloso è un particolare tipo di rifiuto, perché non può essere eliminato con comuni metodi, come gli altri sottoprodotti non pericolosi della nostra vita quotidiana.

Il trattamento dei rifiuti pericolosi è uno dei problemi più gravi della nostra società e, anche se molte tecniche e processi per la distruzione di sostanze tossiche sono state sviluppate, il trattamento di molte di queste è difficile e costoso.

Le sostanze utilizzate in applicazioni industriali o prodotte in inceneritori come policloro bifenili (PCB), halon, freon, policloro di benzodiossine (PCDD), ossidi di azoto (NO_x), ossidi di zolfo (SO_x), sono solo alcuni dei rifiuti tossici che necessitano di un trattamento più efficiente.

1.2 RIFIUTI OSPEDALIERI

Tutti i rifiuti generati da impianti relativi alla salute sono considerati rifiuti medici ospedalieri. Altre possibili fonti includono laboratori di ricerca, studi medici, cliniche, aziende biotecnologiche, case di cura, strutture veterinarie.

I rifiuti ospedalieri sono per la maggior parte rifiuti solidi, sono materiali bio-pericolosi perché possono essere potenziale fonte di infezioni facilmente trasmissibili, fonte di basso livello di radioattività e perché possono essere tossici e infiammabili. Quindi il trasporto e lo smaltimento difettoso possono causare un forte rischio di pericolo per la salute pubblica.

E così queste fonti come ogni altra realtà aziendale produttiva, danno origine ad una notevole quantità di rifiuti. Il problema relativo al loro smaltimento è piuttosto complesso e riguarda tutti gli operatori sanitari. Le fasi di gestione dei rifiuti ed in particolare quella di raccolta dei rifiuti possono infatti comportare dei rischi per la salute degli operatori stessi.

I rifiuti prodotti negli studi medici generalmente non sono rifiuti speciali, in quanto costituiti in prevalenza da residui cartacei o, comunque, da materiale non biologico. Se invece vengono abitualmente praticate prestazioni sanitarie con interventi e terapie che comportino rifiuti di medicazioni o rifiuti biologici (potenzialmente pericolosi), questi rifiuti vengono considerati speciali: pertanto, dopo un trattamento di disinfezione o sterilizzazione, vengono immessi in appositi contenitori, per lo smaltimento, forniti da ditte specializzate e avviati poi all'incenerimento. Le parti anatomiche devono invece essere raccolte e sigillate in appositi sacchetti di plastica rinforzata insieme a un'adeguata quantità di disinfettante e smaltite tramite apposite imprese autorizzate dalla regione, di provenienza, che debbono garantire il servizio ogni 24 ore. Il tempestivo ed efficace smaltimento dei rifiuti sanitari è il modo in primo luogo per prevenire le malattie indesiderate e prevenire infezioni spiacevoli verso gli esseri umani.

La legge prevede che ogni luogo di produzione di rifiuti medico ospedalieri attui un piano di gestione di tali rifiuti. Una gestione efficace ed efficiente è fondamentale in qualsiasi sistema di assistenza sanitaria. Fino a poco tempo fa, le opinioni disponibili per smaltire i rifiuti ospedalieri erano limitate al ricorso all'incenerimento e in alcuni paesi il ricorso dell'autoclave. Entrambe le tecnologie hanno alcune limitazioni alla gestione dei volumi attuali e composizione del flusso dei rifiuti ospedalieri in materia di ambiente. L'approccio di base alla gestione dei rifiuti è quello di

ridurre la quantità di rifiuti alla fonte, per quanto possibile. I rifiuti dovrebbero essere riciclati ogni qualvolta possibile, con dovuto riguardo per considerazioni di carattere ambientale per ridurre la quantità di materiale immesso nel sistema dei rifiuti.

Storicamente, lo smaltimento in discarica è stato il mezzo privilegiato di smaltimento di rifiuti sanitari. L'opinione pubblica contraria e la correlazione positiva con la contaminazione delle acque sotterranee hanno portato al divieto di smaltire i rifiuti medico ospedalieri in discarica. In molti paesi, i rifiuti sanitari non possono più essere smaltiti in discarica, a meno che essi non siano accuratamente disinfettati portando all'assenza di pericolo per la salute umana.

1.2.1 DIRETTIVE DI SMALTIMENTO DI RIFIUTI OSPEDALIERI

Diverse direttive europee e le leggi nazionali che ne sono derivate, si sono concentrate sul problema dei rifiuti dando precisi indirizzi e indicando compiti e responsabilità.

Per quanto riguarda la gestione delle altre tipologie rifiuti, urbani, assimilati agli urbani, speciali, pericolosi e non pericolosi, il regolamento rimanda alle norme e ai principi generali di sicurezza stabiliti dalla Legge Ronchi che resta in vigore. Resta pertanto attuale la suddivisione dei rifiuti secondo l'origine in rifiuti urbani e speciali, e secondo la pericolosità in pericolosi e non pericolosi e tutta la normativa riguardante la gestione dei rifiuti speciali, il divieto di miscelazione delle varie tipologie di rifiuti, il divieto di abbandono ecc.

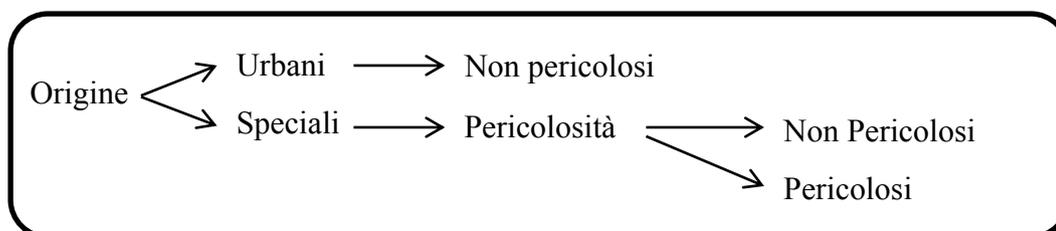


Fig. 1.1 Classificazione dei rifiuti secondo l'origine

La principale novità del DPR 254\03 (Decreto Presidente Repubblica), è che questo decreto ha come soggetto i rifiuti sanitari, e le norme in essa contenute si applicano senza distinzione a chiunque li produca.

Le norme e le leggi citate che individuano i soggetti interessati al D.P.R, sono talmente estensive da ricomprendere tutte le strutture sanitarie (ospedali, case di cura, ambulatori, studi medici) e tutti gli operatori sanitari pubblici e privati, ovvero medici di base, pediatri di libera scelta, odontoiatri, liberi professionisti, ecc., in quanto produttori di rifiuti speciali.

La gestione dei rifiuti in ospedale viene normata dal DPR 254/2003 (G.U. 211/2003), indirizzato principalmente alle Strutture Sanitarie, che rappresenta il Regolamento attuativo del Decreto Legislativo 22/1997. Questo decreto recepisce l'articolo 24 della legge 31 luglio 2002, n. 179; la vecchia normativa al riguardo è stata abrogata.

DPR 15/07/2003, N. 254

Disciplina la gestione dei rifiuti sanitari e degli altri rifiuti allo scopo di garantire elevati livelli di tutela dell'ambiente e della salute pubblica e controlli efficaci.

A seconda della tipologia del rifiuto, cambiano le norme per la gestione. Un rifiuto sanitario può presentare più di una caratteristica e pertanto rientrare in più tipologie, di seguito saranno riassunte tutte le modalità di deposito, raccolta, trasporto e smaltimento.

I rifiuti disciplinati dal presente regolamento sono:

1. i rifiuti sanitari non pericolosi:

Sono i rifiuti costituiti da materiale metallico non ingombrante, da materiale metallico ingombrante, vetro per farmaci e soluzioni privi di deflussorie, aghi, gessi ortopedici. Tali rifiuti denunciabili con il codice CER 180104 e, per gli oggetti da taglio, con il codice CER 180101, qualora non presentino condizioni di pericolosità da un punto di vista infettivo, devono essere recuperati; nel caso in cui non sia possibile il recupero, devono essere smaltiti secondo le modalità previste dal DM del 25/5/89. Sono inoltre rifiuti sanitari non pericolosi le parti anatomiche ed organi incluse le sacche per il plasma e le sostanze per la conservazione del sangue (codice CER 180102). Appartengono a questa categoria ancora i farmaci scaduti (codice CER 180105) ed i rifiuti provenienti dai laboratori dei servizi sanitari che non presentano caratteristiche di pericolosità. Esiste un formulario di registrazione e norme di carico/scarico. Lo smaltimento viene fatto tramite ditta autorizzata:

- **deposito temporaneo:** un anno se non si superano i 20 metri cubi. Il deposito temporaneo è consentito presso il luogo di produzione;
- **raccolta e trasporto:** conferimento a terzi autorizzati o al servizio di pubblica raccolta con cui sia stata stipulata apposita convenzione, o trasporto in proprio sia nel caso di conferimento a terzi o del trasporto in proprio deve essere compilato l'apposito formulario in quattro copie;
- **smaltimento:** trimestrale o quando si raggiungono i 20 metri cubi

2. i rifiuti sanitari assimilati ai rifiuti urbani:

Includono:

- i rifiuti derivanti dalla preparazione dei pasti provenienti dalle cucine delle strutture sanitarie;
- i rifiuti derivanti dall'attività di ristorazione e i residui dei pasti provenienti dai reparti di degenza delle strutture sanitarie, esclusi quelli che provengono da pazienti affetti da malattie infettive;
- vetro, carta, cartone, plastica, metalli, imballaggi in genere, materiali ingombranti da conferire negli ordinari circuiti di raccolta differenziata, nonché altri rifiuti non pericolosi;
- la spazzatura; indumenti e lenzuola monouso e quelli di cui il detentore intende disfarsi;
- i rifiuti provenienti da attività di giardinaggio;
- i gessi ortopedici e le bende;
- i rifiuti sanitari a solo rischio infettivo assoggettati a procedimento di sterilizzazione a condizione che lo smaltimento avvenga in impianti di incenerimento per rifiuti urbani.

Si ricorda che vanno raccolti in modo differenziato (rifiuti secchi e rifiuti umidi).

3. i rifiuti sanitari pericolosi non a rischio infettivo:

Rifiuti di laboratorio (solventi, reagenti, miscele) sono medicinali citotossici e citostatici, sostanze chimiche di scarto pericolose, rifiuti di amalgama prodotti da interventi odontoiatrici, soluzioni fissative, di sviluppo e attivanti a base acquosa, lampade fluorescenti, batterie al piombo e al nichel-cadmio, contenenti mercurio.

- **deposito temporaneo:** un anno se non si superano i 10 metri cubi
- **raccolta e trasporto:** conferimento a terzi autorizzati o al servizio di pubblica raccolta con cui sia stata stipulata apposita convenzione o trasporto in proprio sia nel caso di conferimento a terzi o del trasporto in proprio deve essere compilato l'apposito formulario in quattro copie.
- **smaltimento:** con cadenza almeno bimestrale o, in alternativa, quando la quantità in deposito raggiunge i 10 metri cubi.

4. i rifiuti sanitari pericolosi a rischio infettivo:

I rifiuti che presentano almeno una delle seguenti caratteristiche:

- provengano da ambienti di isolamento infettivo e siano venuti a contatto con qualsiasi liquido biologico secreto od escreto dei pazienti isolati;

- siano contaminati da: sangue o altri liquidi biologici che contengono sangue in quantità tale da renderlo visibile; feci o urine, nel caso in cui sia ravvisata clinicamente dal medico che ha in cura il paziente una patologia trasmissibile attraverso tali escreti; liquido seminale, secrezioni vaginali, liquido cerebrospinale, liquido sinoviale, liquido pleurico, liquido peritoneale, liquido pericardico o liquido amniotico.

Questi rifiuti devono essere raccolti e smaltiti applicando precauzioni particolari per evitare infezioni.

Sterilizzazione: i rifiuti pericolosi a rischio infettivo possono essere smaltiti in impianti di termodistruzione come rifiuti assimilati agli urbani, previo processo di sterilizzazione. Le norme che regolano tale procedura sono molto complesse ed onerose, difficilmente alla portata delle piccole strutture sanitarie (procedimento che risponde alle norme UNI 10384\9 che comprenda la triturazione e l'essiccamento, impianto esclusivamente dedicato alla sterilizzazione dei rifiuti situato all'interno della struttura sanitaria o necessita autorizzazione, verifiche periodiche di efficacia con prove di convalida, comunicazione preventiva alla provincia ai fini dell'effettuazione dei controlli periodici, convalida dell'impianto ecc.)

- **Deposito temporaneo:** cinque giorni dal momento della chiusura del contenitore estensibili a trenta per quantitativi inferiori a 200 litri nel rispetto dei requisiti di igiene e sicurezza e sotto la responsabilità del produttore.
- **Deposito preliminare:** non deve superare di norma i 5 giorni, sono comunque sottoposti al regime dei rifiuti pericolosi.
- **Raccolta e trasporto:** sottoposti al regime dei rifiuti pericolosi.
- **Smaltimento:** mediante termodistruzione in impianti autorizzati.

N.B.: se tali rifiuti presentano anche altre caratteristiche di pericolo, devono essere smaltiti in impianti per rifiuti pericolosi (es. amalgama dentale contaminata da prodotti biologici, fiala di farmaco citotossico contaminato da sangue ecc.)

5. i rifiuti sanitari che richiedono particolari modalità di smaltimento sono:

- farmaci scaduti o inutilizzabili; medicinali citotossici e citostatici per uso umano o veterinario ed i materiali visibilmente contaminati che si generano dalla manipolazione ed uso degli stessi;
- sostanze stupefacenti e altre sostanze psicotrope;
- piccoli animali da esperimento.

- **Smaltimento:** in impianti di incenerimento

- gli organi e le parti anatomiche non riconoscibili devono essere gestiti con le stesse modalità dei rifiuti sanitari pericolosi a rischio infettivo (es. denti);
- le sostanze stupefacenti e le altre sostanze psicotrope, devono essere incenerite in impianti autorizzati. Il deposito temporaneo, il trasporto e lo stoccaggio sono esclusivamente disciplinati dal D.P.R. 309\90.

6. i rifiuti da esumazioni e da estumulazioni, nonché i rifiuti derivanti da altre attività cimiteriali, esclusi i rifiuti vegetali provenienti da aree cimiteriali;

7. i rifiuti prodotti speciali prodotti al fuori delle strutture sanitarie che come rischio risultano analoghi ai rifiuti pericolosi a rischio infettivo

Ai fini della scelta del processo ottimale di trattamento, un'ulteriore classificazione può essere fatta in funzione della composizione dei rifiuti e dei loro residui di trattamento:

- Rifiuti ad alto contenuto di materiali organici; rifiuti con elevati valori calorici si presterebbero al recupero del calore sotto forma di gas di sintesi (syn-gas) con un processo al plasma. Tale processo rappresenterebbe una valida alternativa per completare la combustione e generare separatamente vapore da cui ricavare energia elettrica.
- Rifiuti con alta concentrazione di alogeni, per esempio la maggior parte dei materiali plastici; queste richiedono un trattamento ad alta temperatura e ed è più difficile ottenere un co-prodotto vendibile.
- Materie solide inorganiche, che possono essere trattate per il recupero di componenti preziose o possono essere ridotti in volume con la fusione o infine essere ossidate e immobilizzate in una scoria vetrosa.

Le procedure di gestione dei rifiuti sanitari, se applicate a tutti gli studi medici, non sono così complesse a fronte di una piena tutela dell'ambiente e della salute pubblica.

Ad oggi, per gli studi medici, è sufficiente stipulare un contratto con la azienda di pubblica raccolta o con privati autorizzati, eliminare i rifiuti sanitari potenzialmente infetti in apposito contenitore (fornito dall'azienda stessa), consegnare mensilmente all'operatore addetto i rifiuti, firmare la modulistica fornita dall'operatore stesso il quale provvede anche alla sua compilazione.

Stessa procedura può essere adottata per gli altri rifiuti sanitari con conferimento o trasporto in proprio in impianti autorizzati con cadenza annuale.

Tabella 1.1 Tipologie di rifiuti sanitari e loro classificazione

Composizione	Tipo di rifiuti	Regime giuridico
<p>Rifiuti a rischio infettivo di cui all'articolo 2, comma 1, lettera d C.E.R.180103 o 180202</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Bastoncini cotonati per colposcopia e paptest • Bastoncini oculari non sterili • Bastoncini oftalmici di TNT • Cannule e drenaggi • Cateteri (vescicali, venosi, arteriosi per drenaggi pleurici, ecc.), raccordi, sonde • Assorbenti igienici, pannolini pediatrici e pannoloni • Circuiti per circolazione extracorporea • Cuvette monouso per prelievo biotico endometriale • Deflussori • Fleboclisi contaminate • Filtri di dialisi. Filtri esausti provenienti da cappe (in assenza di rischio chimico) • Guanti monouso • Materiale monouso: vials, pipette, provette, indumenti protettivi mascherine, occhiali, telini, lenzuola, calzari, seridrape, soprascarpe, camici • Materiale per medicazione (garze, tamponi, bende, cerotti, lunghette, maglie tubolari) • Sacche (per trasfusioni, urina, stomia, nutrizione parenterale) • Set di infusion • Sonde rettali e gastriche • Sondini (nasografici per broncoaspirazione, per ossigenoterapia, ecc.) • Spazzole, cateteri per prelievo citologico • Speculum auricolare monouso • Speculum vaginale • Suture automatiche monouso • Gessi e bendaggi • Denti e piccole parti anatomiche non riconoscibili • Lettiere per animali da esperimento • Contenitori vuoti 	<p>Pericolosi a rischio infettivo</p>

	<ul style="list-style-type: none"> • Contenitori vuoti di vaccini ad antigene vivo • Rifiuti di gabinetti dentistici • Rifiuti di ristorazione • Spazzatura 	
Rifiuti provenienti dallo svolgimento di attività di ricerca e di diagnostica batteriologica C.E.R. 180103 o 180202	Piastre, terreni di colture ed altri presidi utilizzati in microbiologia e contaminati da agenti patogeni	Pericolosi a rischio infettivo
Rifiuti taglienti C.E.R. 180103 o 180202	Aghi, siringhe, lame, vetri, lancette pungidito, venflon, testine, rasoi e bisturi monouso	Pericolosi a rischio infettivo
Rifiuti taglienti inutilizzati C.E.R. 180101 o 180201	Aghi, siringhe, lame, rasoi	Speciali
Rifiuti anatomici C.E.R. 180103 o 180202	Tessuti, organi e parti anatomiche non riconoscibili Animali da esperimento	Pericolosi a rischio infettivo
Contenitori vuoti, in base al materiale costitutivo dell'imballaggio va assegnato un codice C.E.R. della categoria 1501: 150101 - 150102 - 150103 - 150104 - 150105 - 150106 - 150107 - 150109	Contenitori vuoti di farmaci, farmaci veterinari, dei prodotti ad azione disinfettante, di medicinali veterinari prefabbricati, di premiscele per alimenti medicamentosi, di vaccini ad antigene spento, di alimenti e di bevande, di soluzioni per infusione	Assimilati agli urbani se conformi alle caratteristiche di cui all'articolo 5 del presente Regolamento
Rifiuti farmaceutici, C.E.R. 180109 o 180208	Farmaci scaduti o di scarto, esclusi i medicinali citotossici e citostatici	Speciali
Sostanze chimiche di scarto C.E.R. 180107 o 180206	Sostanze chimiche di scarto, dal settore sanitario e veterinario o da attività di ricerca collegate, non pericolose e non contenenti sostanze pericolose ai sensi dell'articolo 1 della Decisione Europea 2001/118/CE	Speciali

CAPITOLO 2

PANORAMICA TECNOLOGICA

In questo capitolo vengono descritti alcuni tipi di trattamento termico per lo smaltimento dei rifiuti ospedalieri e i loro vantaggi e svantaggi.

2.1 INCENERIMENTO TERMICO

L'obiettivo dell'incenerimento dei rifiuti è quello di trattare i rifiuti per ridurre il volume e le caratteristiche di pericolosità e di distruggere le sostanze potenzialmente nocive.

L'incenerimento è utilizzato come trattamento per una ampia gamma di rifiuti. In effetti, l'incenerimento è l'ossidazione del materiale combustibile contenuto nei rifiuti.

Nel processo di combustione le sostanze ossidabili del rifiuto contenenti carbonio e idrogeno e che costituiscono il « combustibile », vengono a contatto con ossigeno o con aria e, in condizioni ottimali di processo, attraverso una serie di reazioni chimiche esotermiche, danno luogo alla formazione di vapore acqueo e di anidride carbonica. Se nel rifiuto sono contenuti cloro, fosforo, zolfo, fluoro, metalli, nel gas finale di combustione si avrà, oltre all'anidride carbonica e al vapore acqueo, anche acido cloridrico, anidride fosforica, biossido di zolfo, acido fluoridrico, ossidi di metalli, ossidi di azoto. Se si opera con quantità di aria superiori o inferiori a quella stechiometrica, si dice che la combustione avviene in eccesso o in difetto d'aria. Le combustioni in difetto di aria (condizione di mal funzionamento), in quanto non vi è ossigeno sufficiente per una combustione completa, danno origine a sostanze intermedie di combustione e a monossido di carbonio. Quando si opera con eccessi di aria, la combustione si completa ma i gas di combustione sono più diluiti. Inoltre, si ha un abbassamento della temperatura rispetto alla reazione stechiometrica.

Nei processi di combustione in cui sono coinvolti i rifiuti o comunque sostanze che possono comportare problemi ambientali, occorre che la combustione permetta la massima ossidazione dei componenti il rifiuto e la minima produzione di sostanze inquinanti, dette « microinquinanti » che, anche in bassa concentrazione, interagiscono negativamente con l'ambiente. Ovviamente, un risultato ottimale si ottiene se, oltre al controllo della combustione, l'impianto è dotato di sistemi efficienti di abbattimento delle emissioni. A seconda della composizione del rifiuto e della

condizione di operazione si formano CO, HCl, HF, HBr, HI, NO_x, SO₂, VOCs (Composti Organici Volatili), PCDD/F, (PoliCloro-Dibenzo-p-Diossine oppure Furano), PCB (PoliCloruroBifenile).

L'incenerimento quindi, se non adeguatamente controllato, può causare grave inquinamento ambientale.

Tra le sostanze inquinanti più comunemente immesse in atmosfera dalle attività dell'uomo, si distinguono[4]:

1. Ossidi di Azoto NO_x

Le fonti di ossidi di azoto, NO_x, tipiche dei processi di combustione sono essenzialmente due:

- l'ossidazione di azoto molecolare, N₂, ad elevate temperature che porta alla formazione dei cosiddetti NO_x termici; l'ossidazione di composti azotati presenti nel combustibile alimentato che porta alla formazione dei cosiddetti NO_x da combustibile.
- La fonte predominante nei processi in esame è l'ossidazione di azoto molecolare. Poiché l'energia di attivazione di molte delle reazioni di formazione coinvolte nella produzione degli NO_x termici sono elevate, la velocità di formazione degli stessi dipende fortemente dalla temperatura. Gli NO_x termici si formano durante la combustione di tutti i combustibili nella regione di massima temperatura della fiamma: temperature elevate ed alte concentrazioni di ossigeno ne favoriscono la formazione.

2. Macroinquinanti acidi

A questa famiglia appartengono:

- acido cloridrico (HCl)
- acido fluoridrico (HF)
- anidride solforosa (SO₂)

La presenza di zolfo ed alogeni nei rifiuti porta, in fase di combustione, alla formazione di questi composti gassosi; in particolare: zolfo, cloro e fluoro.

Lo zolfo presente nei seguenti rifiuti costituiti da pneumatici, gesso, pannelli murari ed altri; la sua combustione porta alla formazione di anidride solforosa, composto che, alla temperatura di fiamma, è sostanzialmente stabile. A bassa temperatura c'è la possibilità che SO₂ possa in parte ossidarsi ad anidride solforica (SO₃) grazie all'azione catalitica del particolato: normalmente tale conversione non supera il 10%.

La presenza di cloro e fluoro nei rifiuti supera largamente quella riscontrabile in tutti i combustibili convenzionali. Il cloro presente nei prodotti organoclorati utilizzati nella fabbricazione delle plastiche (polivinilcloruro, PVC), nei solventi clorati utilizzati nella fabbricazione di inchiostro e di caoutchou, nei prodotti fitosanitari e negli insetticidi; come sale (cloruro di calcio e di sodio) contenuto in carta e cartoni, rifiuti alimentari e vegetali. La trasformazione del cloro è

pressoché quantitativa e la possibilità di ossidazione da HCl a cloro molecolare è praticamente nulla (non risente dell'azione catalitica del particolato). La sua ripartizione all'interno dei vari flussi in uscita dall'impianto di incenerimento è la seguente:

- 70% sotto forma di HCl nei fumi
- 10% all'interno delle scorie del forno
- 20% trattenuto dalle ceneri volanti

Il fluoro è per lo più presente nei materiali inerti, nelle bottiglie, nell'alluminio, nelle materie plastiche sotto forma di polifluorurati (per lo più imballaggi medici), nei tessuti sintetici e nei residui di pesticidi. La sua ripartizione all'interno dei vari flussi in uscita dall'impianto è la seguente:

- 35% nelle scorie
- 40% nelle ceneri volanti
- 25% sotto forma di HF nei fumi

Questi acidi (HCl, HF e SO_x) causano seri problemi in termini di corrosione alle strutture per condense acide a basse temperature e per l'azione degli acidi disciolti nei sali fusi ad alte temperature. Per questi motivi il loro abbattimento diventa estremamente importante, oltre che per minimizzare l'impatto ambientale, anche per il buon mantenimento dell'impianto.

3. Microinquinanti organici

Con il termine microinquinanti organici si identificano i composti che si raggruppano sotto il nome di diossine e furani: tale appellativo si riferisce ai 75 cogeneri di composti policlorurati dibenzo-p-diossine (PCDD) ed ai 135 cogeneri dei policlorurati dibenzofurani (PCDF). Tra questi 210 composti molti sono;

- tossici nei confronti di numerosi animali da laboratorio
- persistenti agli attacchi chimici, biologici e fisici

Queste caratteristiche portano le diossine ad accumularsi nell'ambiente con conseguente bioaccumulo in animali ed esseri umani.

Le principali ipotesi fino ad ora formulate per spiegare la presenza delle diossine e dei furani nei fumi uscenti dalla zona di combustione degli impianti di termoincenerimento sono:

- i PCDD/PCDF sono già presenti nel rifiuto in entrata
- i PCDD/PCDF sono prodotti dai relativi precursori clorurati (pre-diossine come policloro benzeni, fenoli clorurati e benzeni clorurati);
- i PCDD/PCDF possono essere formati attraverso processi di pirolisi di composti chimici di composti clorocarburici e/o dalla combustione di materiale organico non clorurato come

polistirene, cellulosa, lignina, carbone e particolari composti carboniosi in presenza di clorodonoratori.

Uno dei più importanti meccanismi di formazione di PCDD/PCDF vede come coprotagonista le ceneri volanti ed ha luogo quando la temperatura del flusso gassoso diminuisce, raggiungendo l'intervallo tra 450 e 250°C (durante raffreddamento gas). Tale reazione prende il nome di "sintesi De Novo".

4. Monossido di carbonio

Il monossido di carbonio (CO) è prodotto dalla combustione incompleta dei rifiuti solidi o liquidi. Se la combustione è effettuata con una quantità di aria sufficiente, il carbonio reagisce quasi totalmente con l'ossigeno dell'aria, portando alla formazione di anidride carbonica (CO₂). La combustione incompleta si verifica a causa di insufficienza di ossigeno, dovuta a cattive condizioni di miscelazione in camera di combustione, oppure di temperatura insufficiente a causa di un eccesso di aria (cool combustion). Il monossido di carbonio deve la sua pericolosità alle sue caratteristiche fisiche (incolore, inodore, infiammabile) e chimiche (alta reattività con l'emoglobina del sangue, che causa il mancato trasferimento dell'ossigeno alle cellule del corpo umano, arrivando a causare la morte per asfissia).

Tabella 2.1 Principali fonti di inquinanti nei processi di incenerimento

Emissioni in atmosfera	Inquinanti nei fumi	Fonte principale
Macroinquinanti (mg/m ³)	Ossidi di azoto (NO _x)	combustione di resine ureiche contenute nei rifiuti; aria comburente in eccesso
	Acido cloridrico (HCl)	Combustione di materiale plastico Presenza di cloruro di sodio nei rifiuti
	Anidride solforosa (SO ₂) e solforica (SO ₃)	Combustione di gomme, carta, cartoni
	Anidride carbonica (CO ₂) o ossido di carbonio (CO)	Combustione dei materiali carboniosi
	Cloruro di vinile e polivinile	Combustione in difetto di ossigeno di materiale plastico
	Cloro	Riduzione di acido cloridrico
	Acido fluoridrico (HF)	Combustione di plastiche clorurate (teflon)
Microinquinanti inorganici (ng/m ³)	Metalli pesanti	Materiali zincati ⇒ Zn Rifiuti stradali ⇒ Pb Batterie scariche ⇒ Zn, Hg, Cd, Mn, Ni Pigmenti su carta e bande stampate ⇒ Cd, Cr, Pb, Se Materiali conciari ⇒ Cr Materiali stabilizzanti delle plastiche ⇒ Cd Materiali elettronici ⇒ Cu, Cr, Ni, Sn
Microinquinanti organici (ng/m ³ o µg/m ³)	PCDD/PCDF e PCB e idrocarburi policiclici aromatici (IPA)	Sintesi / distruzione durante combustione Formazione durante raffreddamento gas (sintesi “de-novo”)

Gli impianti di incenerimento necessitano quindi di sistemi di abbattimento dei fumi e di stabilizzazione delle scorie.

Nelle popolazioni esposte alle emissioni di inquinanti provenienti da inceneritori sono stati segnalati numerosi effetti avversi sulla salute sia neoplastici che un incremento di malformazioni congenite, ipofunzione tiroidea, diabete, ischemie, patologie polmonari croniche aspecifiche, bronchiti, allergie, problemi comportamentali, disturbi nell'infanzia e alterato rapporto maschi/femmine alla nascita. Ancor più numerose e statisticamente significative sono le evidenze per quanto riguarda il cancro.

Si sottolinea e si dimostra che anche con i “nuovi” impianti nessuna valida garanzia di innocuità può essere fornita: se non altro perché trattandosi di “nuovi” impianti non esistono ovviamente indagini epidemiologiche idonee.

Gli inceneritori, anche i più moderni, al limite delle prestazioni tecniche energetiche sono;

- anti-economici;
- poco flessibili, cioè offrono un trattamento unico per differenti tipologie di rifiuti;
- sono di gestione e manutenzione complessa (periodi transitori d'accensione, spegnimento, riavvia-mento, guasti accidentali con emissioni fuori controllo e non rilevate);
- a basso rendimento energetico e con dispersioni termiche eccessive. Si risparmierebbe molta più energia, oltre a materie prime, con il riciclaggio-riutilizzo;
- sono di eccessivo impatto volumetrico-visivo e di occupazione del suolo. Le dimensioni dell'impianto sono determinate dal grande volume dei rifiuti in carica e dal complicato e costosissimo sistema di depurazione dell'enorme volume di fumi prodotti. Tutto questo è in contrasto con le politiche della raccolta differenziata, seguita da riciclaggio-riutilizzo delle materie seconde recuperate;
- sono poco efficienti nella riduzione in peso dei materiali da conferire a discarica. Hanno un impatto ambientale e sanitario intollerabile per l'enorme quantità di fumi nocivi emessi (es.:diossine).

2.1.1 DIOSSINE E PCB

I limiti di concentrazione degli inquinanti imposti dalla normativa sono riferiti al metro cubo di fumi e non all'emissione totale. Pertanto, bruciando più rifiuti si ottengono più fumi e quindi più emissioni inquinanti, ma si rimane sempre nei parametri di legge. Detto in altri termini, i limiti sono relativi alla concentrazione dell'inquinante all'emissione, ma non al suo flusso di massa: quindi la

legge si occupa della qualità dell'emissione, per incentivare l'adozione delle migliori tecnologie disponibili, ma non della quantità delle emissioni cioè dell'impatto complessivo sull'ambiente. Per tale motivo, le norme non garantiscono necessariamente un valore di concentrazione degli inquinanti "sicuro" in base a studi medici ed epidemiologici sull'effetto degli inquinanti, ma si riferiscono ai valori che è possibile ottenere tecnicamente con gli impianti migliori. I limiti sulle emissioni non sono stabili ma vengono adeguati nel tempo in base alle tecnologie di abbattimento degli inquinanti disponibili sul mercato, seppure con l'inevitabile ritardo dovuto ai tempi legislativi. Spesso però tali limiti vengono richiesti solo per la costruzione di nuovi impianti, mentre agli impianti già esistenti vengono concesse lunghe deroghe.

Diossine e furani

Il termine "diossine" (PCDD/F) indica un gruppo di contaminanti ambientali altamente lipofili ed estremamente persistenti nell'ambiente e nei sistemi biologici, appartenenti a due famiglie chimiche molto simili: policlorodibenzodiossine (PCDD; n=75) e policlorodibenzofurani (PCDF; n=135). Alcuni composti del gruppo (7 PCDD, 10 PCDF) sono considerati particolarmente pericolosi tanto da essere definiti "xenobiotici supertossici" (ogni sostanza chimica estranea all'organismo è definita uno xenobiotico come additivi alimentari, aromatizzanti, coloranti, emollienti, emulsificanti, pesticidi, sotto prodotti della combustione o della colorazione delle acque, inquinanti ambientali, farmaci); tra questi la molecola dotata di più spiccata tossicità è la tetraclorodibenzodiossina (TCDD) nota anche come diossina di Seveso. Vengono, inoltre, assimilati a tali sostanze alcuni bifenilipoliclorurati (PCB; n=12) caratterizzati da proprietà tossiche e meccanismi d'azione analoghi e perciò definiti PCB diossinasimili.[5]

Le diossine e i furani sono tossici, cancerogeni e mutageni per l'organismo umano. Sono poco volatili per via del loro elevato peso molecolare e sono solubili nei grassi, dove tendono ad accumularsi. Proprio per questo motivo tendono ad accumularsi nella catena alimentare e nell'organismo umano per cui anche una esposizione a livelli minimi ma prolungata nel tempo può recare gravi danni alla salute.

Le diossine resistono a temperature fino agli 800-1000°C, non sono solubili nell'acqua, non sono biodegradabili, sono chimicamente resistenti, non si trasformano, cioè, facilmente in altre sostanze meno nocive, ad eccezione di una certa labilità fotochimica. La tossicità di tali composti per l'uomo è molto elevata, sia a seguito di un'esposizione unica a dosi elevate (tossicità acuta) che a seguito di un'esposizione a piccole dosi ripetute nel tempo (tossicità cronica). Le sorgenti delle diossine sono varie e hanno avuto molte variazioni nel corso degli anni, ed è difficile quantificarne

esattamente la rilevanza relativa: per quanto riguarda le diossine, gli inceneritori risultano essere la prima fonte di emissione in Italia.[6]

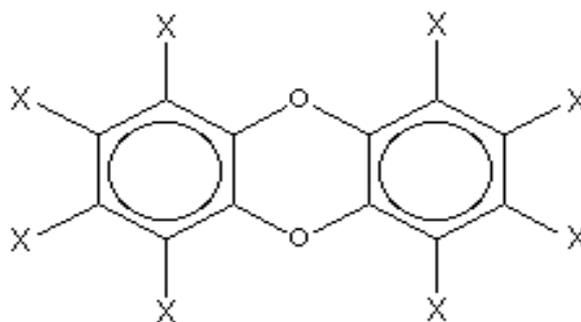


Fig. 2.1 *Struttura molecolare della TCDD, la più tossica fra le Diossine*

Per quanto concerne l'incenerimento, le diossine vengono prodotte quando materiale organico è bruciato in presenza di cloro, sia esso ione cloruro o presente in composti organici clorurati come le plastiche in PVC. La soglia minima di sicurezza per tali sostanze è ancora oggetto di investigazione scientifica; i limiti imposti dalla Unione Europea sulle emissioni sono di $0,1 \text{ ng/m}^3$.

Per ridurre l'emissione di vari inquinanti fra cui la diossina, negli inceneritori è vietato (per legge) che i fumi scendano sotto gli 850°C , che è poi il motivo per cui gli inceneritori non possono accettare materiale dal potere calorifico troppo basso oppure devono integrare la combustione con metano.[7] L'obiettivo di minimizzare le emissioni di diossine contrasta in parte con il recupero dell'energia, in quanto una elevata temperatura di combustione e un veloce raffreddamento dei fumi (condizioni ideali per ridurre la formazione di diossina) sono incompatibili con una massima efficienza nel recupero dell'energia termica. [8]

Gli impianti tecnologicamente più avanzati presentano un elevato grado di efficienza tale da contenere le emissioni a livelli significativamente inferiori al limite di legge ma bisogna considerare che la legge impone solo delle misurazioni periodiche e non continue sulla produzione di diossina, [9] e che solo in pochissimi impianti italiani è tenuta sotto costante controllo. Inoltre, le misurazioni, necessarie solo ad assicurare il rispetto della legge, spesso non sono precise e non servono a conoscere l'effettiva emissione in atmosfera. Qualunque tecnologia che non potesse essere attuata con sicurezza non dovrebbe essere ritenuta accettabile.

2.1.2 ABBATTITORE DEI FUMI

La sezione dedicata al trattamento dei fumi ha lo scopo di contenere entro i limiti di emissione previsti dalla normativa, le concentrazioni di inquinanti presenti nei fumi di combustione. Appare

evidente che questa parte dell'impianto costituisce la sezione più sensibile dal punto di vista ambientale e sulla quale è focalizzata l'attenzione di progettisti, costruttori e gestori, ovvero di coloro i quali si occupano in modo professionale di un impianto per trattamenti dei rifiuti.

Le tipologie di depurazione sono molteplici; in generale si può dire che tra tutti i sistemi non ne esiste uno che sia in assoluto migliore degli altri, ma piuttosto va detto che per ogni tipo di problema può esservi una soluzione impiantistica differente, e talvolta, sistemi di depurazione pur ispirati al medesimo principio possono risultare diversamente efficaci.

Polveri

Si parla di depolverazione quando una corrente gassosa che trasporta particelle solide viene convogliata ad un sistema che separa la fase solida da quella gassosa. L'efficienza degli impianti di depurazione dei fumi è direttamente legata alle prestazioni del sistema di filtrazione utilizzato; per ottimizzarne la scelta bisogna prendere in considerazione diversi fattori:

- limiti di emissione da rispettare
- portata dei fumi
- tipologia e qualità del particolato
- temperatura e umidità del gas
- presenza di agenti corrosivi
- lo spazio disponibile
- caratteristiche costruttive dell'impianto stesso
- costi di investimento e di funzionamento

I principali sistemi dedicati all'abbattimento delle polveri sono:

- cicloni
- elettrofiltri (o precipitatori elettrostatici)
- filtri a maniche

NO_x

Gli ossidi di azoto possono essere ridotti ottimizzando il progetto ed il funzionamento della camera di combustione e installando dispositivi supplementari quali:

- sistemi catalitici
- sistemi non catalitici
- sistemi chimici

La scelta del sistema di abbattimento degli ossidi di azoto avviene in considerazione delle concentrazioni di NO_x rilevate, dei limiti imposti dalla normativa e, nel caso di impianti già

esistenti, dal lay-out dell'impianto, a questi parametri si aggiungono quelli riguardanti le valutazioni tecniche ed economiche.

Gas acidi

Per la rimozione dei gas acidi vengono impiegati sia sistemi ad umido che sistemi a secco nonché eventuali combinazioni di questi ultimi.

Sistemi ad umido

Le torri di lavaggio ad umido sono colonne cilindriche verticali all'interno delle quali si creano le condizioni per un intimo contatto tra i fumi ed il fluido lavante, onde consentire l'assorbimento dei gas acidi nel fluido di lavaggio.

Generalmente le torri ad umido sono suddivise in due stadi in serie: il primo per la rimozione di HCl ed HF mediante lavaggio con acqua ed il secondo per l'abbattimento degli SO_x con soluzioni alcaline.

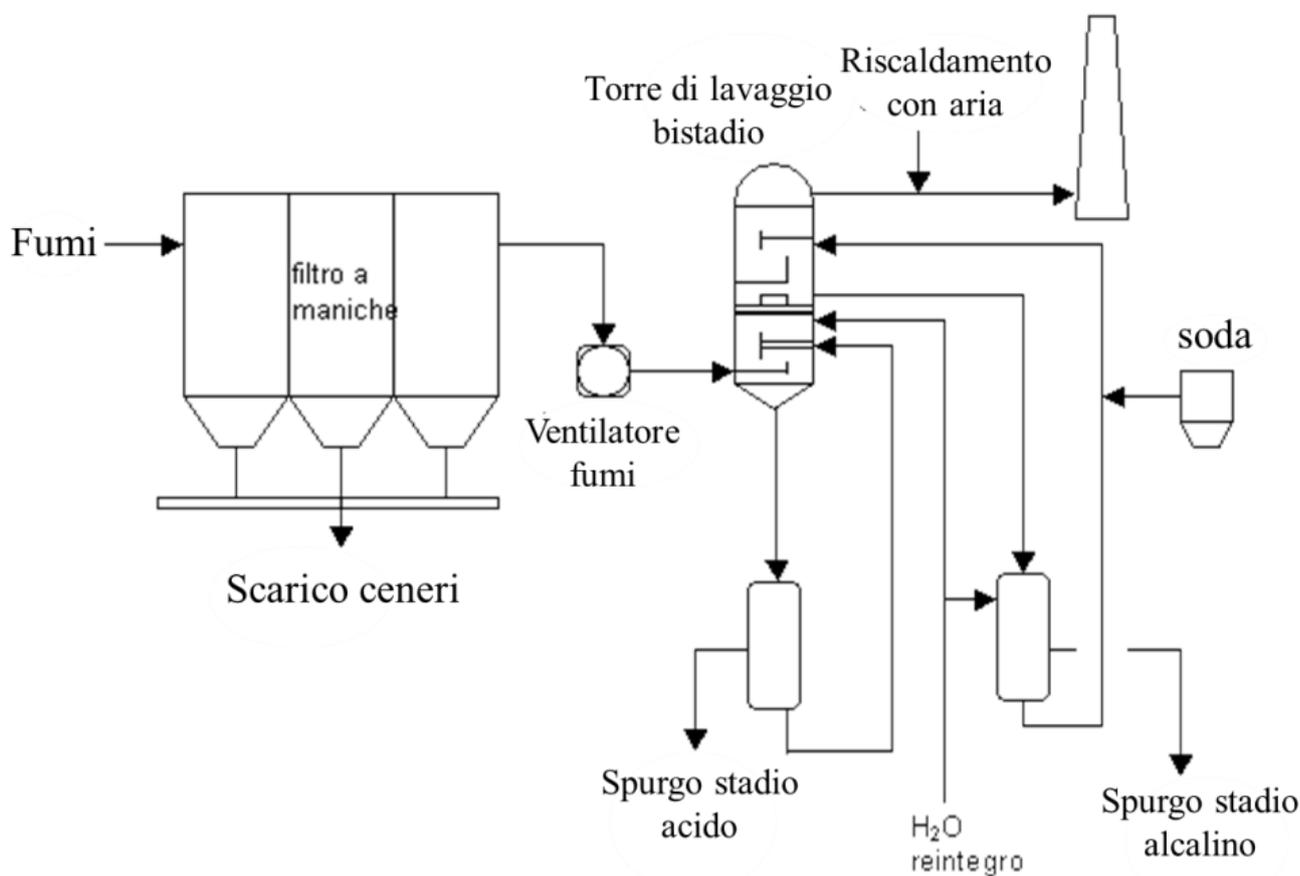


Fig. 2.2 Schema di un sistema ad umido

Le colonne di lavaggio hanno anche una buona efficienza per l'abbattimento dei metalli solubili in acqua: l'efficienza di abbattimento, crescente con l'abbassamento della temperatura, può essere migliorata mediante il sotto-raffreddamento delle acque di lavaggio.

I fumi in uscita dalle colonne di lavaggio sono in condizioni di umidità e temperatura di saturazione (circa 60-70°C) e richiedono un post-riscaldamento prima della loro immissione nel camino.

I reflui liquidi prodotti presentano un elevato contenuto salino e richiedono di norma un trattamento chimico-fisico di neutralizzazione e precipitazione.

L'abbassamento della temperatura dei fumi a seguito del loro trattamento in colonne di lavaggio si rivela estremamente importante per quanto concerne la rimozione di microinquinanti volatili, soprattutto quando le colonne sono dotate di dispositivi anti-trascinamento per trattenere il particolato più fine e gli aerosoli ricchi di elementi condensati.

Sistemi a secco

Nella configurazione base tali sistemi sono costituiti da un reattore di adsorbimento dei gas acidi e da un depolveratore. Tali sistemi si differenziano soprattutto in funzione del tipo di reagente alcalino utilizzato per effettuare la neutralizzazione degli acidi.

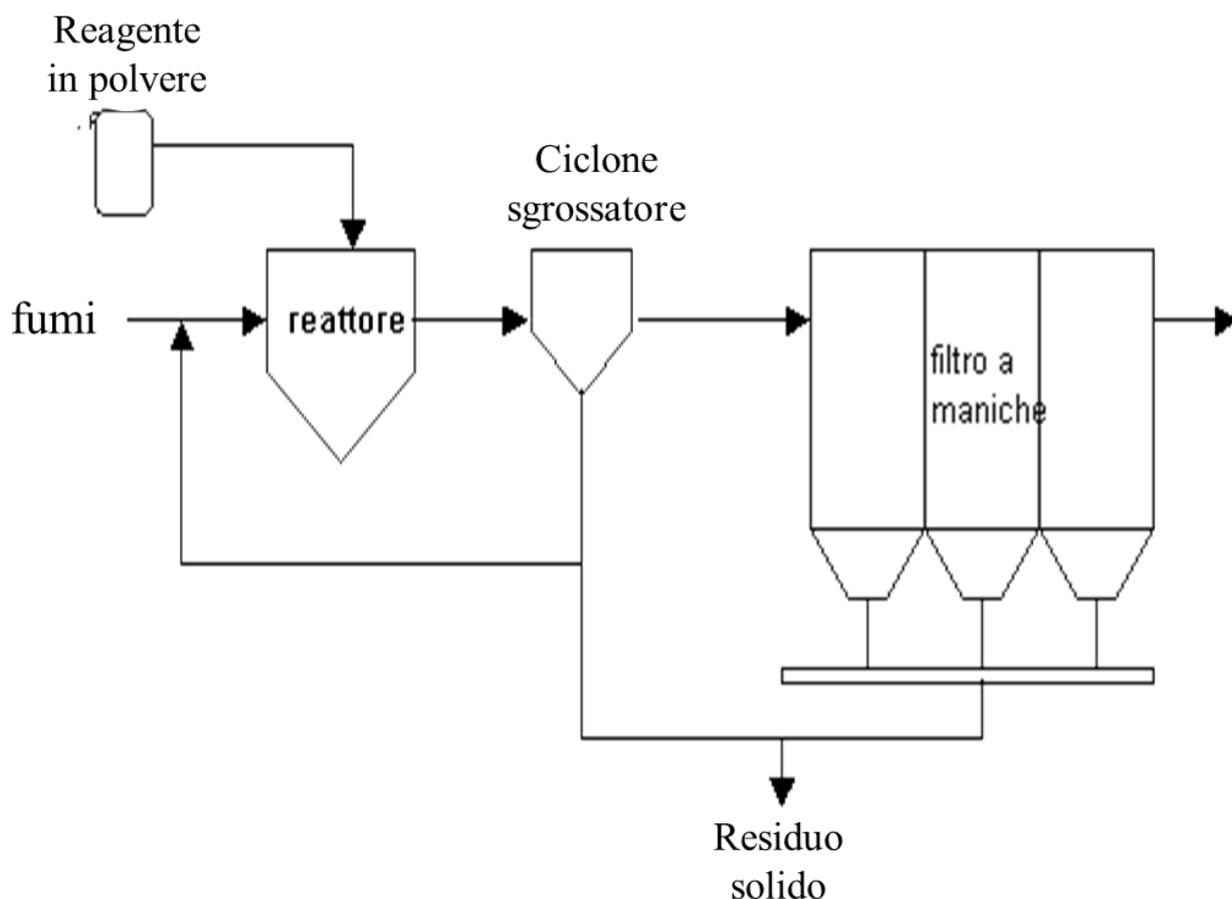


Fig. 2.3 Schema di sistema a secco

Questi sistemi di abbattimento consentono di ridurre le concentrazioni di metalli pesanti, quali il mercurio, oltre ai microinquinanti organici quali le diossine (PCDD) ed i furani (PCDF), mediante l'iniezione di carbone attivo, nella corrente dei fumi, i quali hanno la proprietà di adsorbire queste sostanze e rimuoverle dai fumi.

2.1.3 RECUPERO SYN-GAS

Il syn-gas è formato in prevalenza di CO (ossido di carbonio) e H₂ (idrogeno), depurato e immagazzinato in appositi serbatoi, può trovare i seguenti impieghi alternativi:

- combustione in ciclo combinato co-generativo per la produzione d'energia elettrica e vapore/acqua calda (da turbina a gas in serie con turbina a vapore).
- produzione di energia elettrica da motori a combustione interna, specifici per metano, o bio-gas di discarica, o syn-gas depurati derivanti da gassificazione, o miscele dei medesimi.
- ultra-filtrazione del syn-gas depurato per la produzione di H₂ purissimo. L'idrogeno così prodotto a basso costo può già oggi trovare numerosi impieghi: idrogenazione delle benzine nelle raffinerie; idrogenazione dei grassi alimentari; impieghi nei laboratori di ricerca, nel comparto delle lavorazioni dei metalli preziosi, nell'industria elettronica; autovetture e autobus a idrogeno, ecc.;

Il CO residuo dall'ultra-filtrazione può trovare impieghi nell'industria chimica (nella produzione ad es. di poli-uretani); come gas combustibile in caldaie per la produzione di vapore per usi industriali.

Il syn-gas può trovare impieghi nella nascente "chimica verde": si possono produrre miscele di gas leggeri combustibili, benzine sintetiche, diesel più puliti, cere pesanti, ecc. (USA, Canada, U.E., ma anche Sud Africa, Cina e India stanno finanziando nuovi impianti e/o ricerche in questa direzione, per la gassificazione dei carboni anche scadenti, dei pneumatici usati e delle bio-masse; nulla vieta di farlo anche per altri rifiuti non riciclabili, contribuendo a risolvere due problemi in un colpo solo: smaltimento molto più "pulito" di rifiuti e recupero di materia, di prodotti chimici o di gas pregiati); in alternativa, con reattori catalitici e in diverse condizioni di processo, è facile produrre dal syn-gas metanolo o etanolo di sintesi, con possibili impieghi per l'autotrazione (additivi e parziali sostitutivi delle benzine), o come solventi o interne.

Tabella. 2.2 Diversi impieghi di syngas

Inputs		Outputs
Biomassa : agricoltura grasses	Syngas	Elettricità : energia turbini caldaie
Combustibili fossili : carbone olio petcoke		Combustibili liquidi : etanolo metanolo diesel carburante gasoile
Rifiuti : rifiuti solidi urbani fanghi da depurazione rifiuti tossico-nocivi rifiuti medici le gomme		Idrogeno
		Gas sintetico naturale
	Prodotti chimici / Polimeri	
	Calore e vapore	

2.2 PIROLISI

La pirolisi è un processo di decomposizione termochimica di materiali organici, ottenuto mediante l'applicazione di calore e in completa assenza di un agente ossidante (normalmente ossigeno). In pratica, mentre riscaldando il materiale in presenza di ossigeno avviene una combustione che genera calore e produce composti gassosi ossidati, effettuando invece lo stesso riscaldamento in condizioni però di assenza totale di ossigeno, il materiale subisce la scissione dei legami chimici originari con formazione di molecole più semplici. Tra i principali processi pirolitici sfruttati su larga scala spiccano il cracking industriale e il trattamento termico dei rifiuti. A seconda delle condizioni operative, il processo di pirolisi può essere diviso in tre sottoclassi:

1. pirolisi convenzionale
2. fast pirolisi
3. flash pirolisi

La pirolisi convenzionale è definita come pirolisi che accade a temperature moderate, con moderati tempi di reazione. Questa condizione permette di produrre prodotti solidi, liquidi e gassosi in quantità significativa. Se l'obiettivo è principalmente la produzione di liquidi o gas, è raccomandata la fast pirolisi in cui la temperatura è relativamente bassa e le reazioni delle gasificazioni avvengono velocemente e con tempi di contatto, tra materiale e plasma, brevi in modo da ridurre il riformarsi di composti intermedi, favorendo la produzione della frazione liquida fino al 70-80% in peso della biomassa in entrata.

La flash pyrolysis produce maggiori prodotti gassosi e viene realizzata in modo da mantenere gli stessi tempi di contatto della fast pirolisi ma a temperature superiori a 1000°C e con tempi di contatto inferiore ad 1 secondo. (Demirbas and Arin, 2002)

I parametri principali dei diversi processi di pirolisi sono indicati nella tabella.

Tabella 2.3 Confronto tra i diversi tipi di pirolisi termiche

parametri	Pirolisi convenzionale	Pirolisi veloce	Flash pirolisi
Temperatura (K)	550-950	850-1250	1050-1300
Heating rate (K/s)	0.1-1.0	10-200	>1000
Dimensione di particella dopo il processo (mm)	5-50	<1	< 0.2
Tempo di permanenza (s)	450-550	0.5-10	< 0.5

I prodotti di pirolisi, pur variando a seconda del materiale alimentato, possono essere classificati nel seguente modo:

- un gas combustibile avente un medio potere calorifico (13-21 MJ/Nm³), costituito principalmente da CO, CO₂ e tracce di H₂ in percentuale variabili a seconda della temperatura della pirolisi; tale gas può essere bruciato per fornire calore allo stesso reattore di pirolisi, oppure può essere impiegato come combustibile per turbine a gas o motori a combustione interna.
- un prodotto liquido che, nella maggior parte dei casi, non è direttamente impiegabile come combustibile a causa della sua elevata viscosità ed acidità dovuta alla presenza di composti organici ossigenati, ma necessita di un trattamento.

- un prodotto solido-char (costituito da particelle sferoidali solide porose con un elevato contenuto di carbonio, quasi totalmente in forma aromatica o grafitica), costituito da residuo carbonioso e da ceneri, usato come combustibile o nell'industria chimica come precursore.

Quindi è possibile incrementare la resa di una delle tre frazioni presenti come risultato del processo di pirolisi, selezionando opportunamente le condizioni del processo quali:

- la temperatura finale di reazione
- la velocità di riscaldamento della biomassa
- il tempo di residenza del materiale alla temperatura di reazione
- la dimensione e la forma fisica della biomassa da trattare
- la presenza di determinati catalizzatori

2.3 PIROLISI AL PLASMA

La pirolisi al plasma integra le proprietà termo-chimiche del plasma con il processo di pirolisi dove ha luogo in assenza di ossigeno o in quantità di ossigeno trascurabile. La pirolisi al plasma usa l'alta temperatura del plasma per decomporre completamente i rifiuti a molecole semplici.

Non si verificano processi di combustione nella pirolisi al plasma in cui l'ossigeno è assente, ma il plasma atomizza le molecole delle sostanze introdotte in prodotti semplici quali HCl , N₂ , CH₄, H₂, CO , CO₂.

I principali prodotti generati da questo processo sono un gas di sintesi e i materiali solidi di tipo lavico (gli elementi inorganici vengono fusi e trasformati in una roccia di tipi vulcanico, una specie di lava totalmente inerte e non tossica, a bassissima viscosità nella cui matrice vetrosa sono inglobati e totalmente inertizzati i metalli pesanti ed essi quindi sono riutilizzabili come materiale da costruzione.

Il plasma è considerato il quarto stato della materia, è un fluido elettricamente conduttivo formato da ioni ed elettroni ma nella sua totalità neutro. Le specie cariche possiedono una elevata energia cinetica. L'energia cinetica delle particelle prende la forma di calore e può essere utilizzato per la decomposizione delle sostanze chimiche. Inoltre a causa della presenza di specie cariche ed eccitate il plasma diventa più reattivo e in grado di catalizzare le reazioni chimiche. E quindi quando le particelle carboniose vengono iniettate nel plasma, vengono riscaldate rapidamente e le sostanze volatili vengono liberate, poi vengono rotte dando luogo a idrogeno e pochi idrocarburi come metano ed acetilene.

Si possono distinguere quattro stadi nella pirolisi al plasma:

1. l'elevata velocità di riscaldamento delle particelle a causa di uno scambio di loro calore con il plasma;
2. la liberazione esplosiva delle sostanze volatili da particelle;
3. la gassificazione molto veloce della fase omogenea e uno scambio molto rapido tra il calore e la massa;
4. ulteriore gassificazione delle particelle solido (char) con i componenti gassosi.

Lo stadio 3 può essere sostituito con la tecnologia di quench per arrivare a determinati scopi tecnici come monomer recovery. L'acqua/vapore può essere efficientemente aggiunto nello stadio 4 per favorire la produzione di syngas (H₂ e CO).

Le proprietà dei gas e di residui solidi prodotti dipendono dal tipo di rifiuti (materiale da trattare) e dalle condizioni di lavoro. Alla base dei risultati di diversi ricercatori, i parametri più importanti nel processo della pirolisi al plasma sono discussi in seguito.

I vantaggi della pirolisi al plasma:

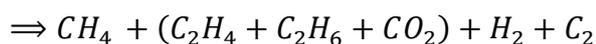
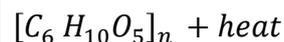
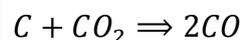
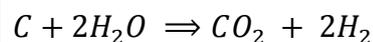
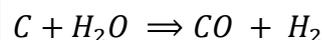
- uno scambio efficace della energia di calore sia fisicamente che chimicamente in rifiuti;
- rapido raggiungimento della temperatura efficace in un reattore molto compatto;
- le proprietà dei prodotti sono adeguate per riciclo della energia e del materiale;
- riduzione in volume (> 99%) di materiali organici;
- nessuna emissione inquinante (diossine, furani) grazie alla distruzione delle sostanze pericolose prima della combustione;
- riduzione del costo dell'impianto grazie ai minori volumi di fumi da trattare;
- realizzazione di impianti con volumi particolarmente ridotti;
- realizzazione di impianti da installare su sistemi trasportabili;
- possibilità di utilizzo direttamente in loco, evitando il trasporto all'impianto delle scorie da trattare;
- la tecnologia è molto flessibile sia come condizioni operative (temperatura, atmosfera per pirolisi/gassificazione/combustione) sia come tipologie di rifiuti trattabili (liquidi e solidi anche congiuntamente).

Le possibili reazioni che avvengono durante la pirolisi simultanea dei rifiuti ospedalieri (cotone + plastica + acqua (60 + 30 + 10%)) sono descritte in seguito:

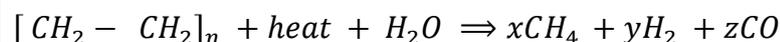
Tabella 2.4 La dissociazione molecolare con il plasma

La parziale ossidazione in presenza di vapore d'acqua

Reazioni:



(cellulose)

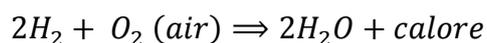
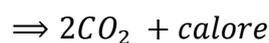
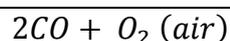


(polietilene)

COMBUSTIONE DEI PRODOTTI DOPO LA PIROLISI

I gas prodotti dal pirolisi vengono successivamente bruciati secondo la reazione:

Tabella 2.5 Le reazioni avvenute in camera di combustione



ABBATTIMENTO DELLA TEMPERATURA DEI GAS E PURIFICAZIONE

Il livello di depurazione che è necessario raggiungere dipende dall'utilizzo finale a cui il gas combustibile è destinato e si può stabilire che:

- un livello di depurazione non troppo spinto (depolverazione) può essere sufficiente nel caso di un suo utilizzo come gas riducente per processi industriali o per il suo inserimento in forni per la produzione di cemento o laterizi;
- un livello di depurazione maggiore è necessario nel caso di generazione di energia elettrica con motori volumetrici a combustione interna o turbina a gas;

Tabella 2.6 Confronto tra i diversi trattamenti per i rifiuti

	Incenerimento	Pirolisi Termica	Pirolisi al plasma
Produzione di rifiuti tossici	SI	NO	NO
Necessità di smaltimento di polveri e residui solidi	SI	SI	NO
Distruzione dei rifiuti speciali	NO	NO	SI
Inertizzazione dei residui solidi	NO	NO	SI

2.3.1 DISTRUZIONE AL PLASMA DI RIFIUTI OSPEDALIERI

I trattamenti al plasma per applicazioni ambientale è una tecnologia in via di sviluppo. Questa tesi si concentra sulla tecnologia del plasma atmosferico come una tecnica innovativa di trattamento termico dei rifiuti, che è molto efficace e presenta grandi prospettive soprattutto nella gestione dei rifiuti pericolosi.

Il processo al plasma avviene in assenza di ossigeno e non dà luogo quindi a combustione. I tempi della dissociazione molecolare alle alte temperature sono dell'ordine di millesimi di secondo. Uno sfruttamento adeguato di tale caratteristica consentirebbe pertanto di trattare grandi quantità di materiale in camere di reazione anche piccole, con una notevole riduzione delle dimensioni dell'impianto rispetto a inceneritori di potenza comparabile. Alle temperature in gioco (dai 1000 °C ai 20000°C) avviene anche la fusione e l'inertizzazione delle specie metalliche tossiche che possono essere recuperate e non si formano scorie o ceneri. I gas prodotti, iniettati in una turbina, permettono la generazione di energia.

Il primo aspetto peculiare del plasma è associato all'elevata densità di energia e alla possibilità di raggiungere elevatissime temperature non ottenibili con mezzi tradizionali, che consentono di scomporre a livello atomico pressoché qualsiasi cosa. L'efficienza di distruzione ottenibile mediante un impianto al plasma che atomizza le molecole del rifiuto in prodotti semplici quali N₂, CO, CO₂, H₂, CH₄, HCl riduce la quantità di inquinanti prodotti nel trattamento e non si limita, come talvolta avviene nelle combustioni tradizionali, a un semplice trasferimento dell'inquinante (specialmente alla fase gassosa).

Un ulteriore aspetto distintivo è costituito dal fatto che i meccanismi che portano alla produzione del plasma e a un innalzamento della sua temperatura sono di tipo cinetico, per cui è

possibile aumentare in modo scorrelato dalle reazioni chimiche che intercorrono tra i composti reagenti. Questo consente di trattare in modo efficiente qualsiasi tipo di materiale, in modo indipendente dal suo poter calorifico e, di conseguenza, non richiede una separazione del rifiuto nel caso di materiali contaminanti, con ovvi risparmi di costo e gestione.

Inoltre i meccanismi con cui viene prodotto un plasma, unitamente alla possibilità di utilizzare quasi ogni gas o miscela gassosa per la produzione di plasma permettono di operare in ambienti ossidanti, riducenti o neutri, ottimizzando così il trattamento di diverse classi di composti. Questo consente di decidere il tipo di ambiente di reazione in cui operare in funzione delle caratteristiche e della composizione del rifiuto da smaltire, ottimizzando la presenza di sostanze favorevoli allo specifico processo di trattamento. Ricordiamo che la presenza di ossigeno nel processo di trattamento è uno degli elementi caratterizzanti il processo stesso. La quantità di ossigeno presente distingue i processi di combustione, in cui l'ossigeno è presente in forma libera, quelli di gasificazione al plasma, in cui l'ossigeno è presente in quantità inferiore, a quelle stechiometriche e quelli di pirolisi al plasma in cui l'ossigeno è assente.

Un impianto al plasma fornisce, inoltre, un ottimo controllo sulle emissioni, che determina migliori prestazioni ambientali e anche un buon controllo di processo legato alla maggiore stabilità della temperatura ottenibile in reattori di volume ridotto. Inoltre, il trattamento produce by-product inerti potenzialmente riutilizzabili (syngas).

I tempi di accensione delle sorgenti al plasma consentono di realizzare impianti con tempi di avvio e spegnimento molto inferiore rispetto a quelli degli usuali inceneritori.

I limiti nell'utilizzo dei processi al plasma sono essenzialmente da ricondurre a questioni di tipo economico e impiantistico. Nel primo caso l'uso di corrente elettrica per generare il plasma si dimostra oneroso. Tuttavia il bilancio dei costi andrebbe considerato su una scala più ampia-dal trasporto di rifiuti presso l'impianto di trattamento, fino al conferimento delle scorie - anziché limitandosi alla sola fase di produzione del plasma termico. E' possibile, inoltre, prevedere azioni di recupero energetico a vari livelli in grado di assicurare l'economicità dell'impianto.

Il processo al plasma quindi fornisce una soluzione completa per distruggere rifiuti ospedalieri in modo sicuro. La tecnologia ha dimostrato che la quantità di composti tossici come le diossine e furani in emissione è stata molto inferiore al limite di standard. Le condizioni di reazione minimizzano il rischio di ricombinazione delle molecole semplici ottenute nel trattamento e, quindi, di formazione di composti ad elevato potenziale tossico.

In particolare, la tecnologia al plasma risulta particolarmente efficace nel trattamento di rifiuti a prevalente base organica contenenti composti organici alogenati quali: policlorobifenili (PCB), policlorodi benzodiossine (PCDD), policlorodibenzofurani (PCDF) oppure sostanze che

sono possibili precursori nel processo di formazione dei suddetti composti quali Amianto, terreni contaminati da PCB e rifiuti ospedalieri.

Con la combustione si creano migliaia di sostanze tossiche pericolose di cui diverse decine sono cancerogene. Poi c'è il particolato (l'insieme delle sostanze sospese in aria (fibre, particelle carboniose, metalli, silice, inquinanti liquidi o solidi)), tanto più pericoloso quanto più alta è la temperatura. Negli inceneritori la combustione avviene ad altissime temperature perché questo dovrebbe ridurre le emissioni di diossina, ma allo stesso tempo produce un particolato più fine che i filtri non riescono a trattenere.

Applicando le tecnologie al plasma per lo smaltimento dei rifiuti ospedalieri e composti organici tossici è possibile risolvere il problema del loro trattamento in quanto le elevate temperature associate all'urto con particelle elettricamente cariche provoca due distinte fasi di reazione:

- la completa dissociazione del rifiuto organico all'interno del plasma;
- una successiva ricombinazione verso molecole con struttura semplice quali idrocarburi, monossido di carbonio, idrogeno, acqua, etc..

La peculiarità di questo approccio consiste nel fatto che lo smaltimento dei rifiuti non è inteso come definitivo stoccaggio di sostanze tossiche in discarica, ma come completa distruzione dei rifiuti e/o trasformazione degli stessi in materiali non più tossici.

2.3.2 DISTRUZIONE DI BATTERI E PATOGENI IN RIFIUTI OSPEDALIERI

Per rifiuto sanitario pericoloso a rischio infettivo si intende qualunque rifiuto proveniente da lavorazioni che abbiano avuto contatto con materiale infetto o potenzialmente infetto. La manipolazione dei rifiuti di tipo sanitario richiede quindi le stesse cautele richieste durante la normale attività di laboratorio e dipenderà dalla classe di rischio che esibiscono i microrganismi. La classe di rischio dei microrganismi è rigidamente codificata nella legislazione sulla sicurezza del lavoro (D.Lgs 626/94 Titolo VIII ed Allegato XI), essa dipende dalla pericolosità nei confronti della salute dei lavoratori e della popolazione in generale. Nel determinare la pericolosità degli agenti biologici si è tenuto conto delle loro caratteristiche peculiari nei confronti di infettività, patogenicità e trasmissibilità. Le classi in cui vengono suddivisi i microrganismi sono 4:

- Classe 1 : microrganismi a bassissima possibilità di trasmettere infezioni;
- Classe 2 : microrganismi in grado di trasmettere infezioni all'uomo. Di norma sono disponibili efficaci misure terapeutiche;

- Classe 3 : microrganismi in grado di trasmettere malattie gravi, sono disponibili misure terapeutiche efficaci;
- Classe 4 : microrganismi in grado di provocare gravi malattie che normalmente si trasmettono tra individui con facilità, non sono disponibili efficaci misure terapeutiche.

Ad ogni classe corrispondono caratteristiche di contenimento previste dalla normativa sulla sicurezza, le medesime devono essere osservate anche nel trattamento dei rifiuti fino alla loro inattività con mezzi fisici o chimici.

Al fine di minimizzare il potenziale rischio infettivo i rifiuti sanitari debbono subire un “trattamento” prima di essere allontanati dai luoghi di produzione per avviarli a smaltimento. Per “trattamento” si deve intendere il trattamento di sterilizzazione. Ove non sia possibile procedere al trattamento di sterilizzazione, e solo in questo caso, si potrà effettuare un “trattamento di disinfezione”, se necessario.

Di seguito si riporta cosa si debba intendere per disinfezione e per sterilizzazione.

Disinfezione

Per disinfezione si intende la metodica che minimizza la presenza dei microrganismi patogeni, mediante l'applicazione diretta di agenti chimici o fisici. In relazione alla loro attività i disinfettanti/antisettici sono classificati in tre categorie:

1. disinfettanti ad elevato spettro di azione comprendono:
 - gluteraldeide al 2% per un tempo di contatto di almeno 3 ore;
 - perossido di idrogeno per un tempo di contatto di 2-3 ore;
2. disinfettanti a spettro d'azione intermedio comprendono:
 - alcoli (etilico ed isopropilico) al 70%;
 - composti a base di cloro (ipocloriti; biossido di cloro, cloroamina T, ecc.);
 - composti iodofori;
3. disinfettanti a spettro d'azione basso comprendono:
 - composti di ammonio quaternario (conc. 0.1-0.2%);
 - composti fenolici come l'esoclorofene (conc. 1%);
 - clorexidina (conc. 0.75-4.0%).

Nell'usare tali disinfettanti dovrà essere posta particolare attenzione alla potenziale tossicità degli stessi. In generale sono da evitare i disinfettanti classificati ed etichettati come pericolosi (ad esempio: formaldeide).

Sterilizzazione

Per sterilizzazione si deve intendere quel processo fisico o chimico in grado di eliminare qualsiasi forma vivente sporigena ed asporigena. E' molto difficile poter assicurare nelle normali condizioni di laboratorio la sterilizzazione di un rifiuto, data la sua disomogeneità; infatti alla fine del processo, c'è sempre la possibilità di ritrovare elementi non del tutto sterilizzati.

Molto spesso, quindi, nel momento in cui si parla di sterilizzazione in realtà si intende "degermazione" che consiste nell'abbassamento, superiore ad otto esponenti, della carica microbica presente in un dato materiale.

Il metodo di sterilizzazione più noto ed utilizzato è basato sull'azione del calore che può essere secco od umido. I microrganismi sono uccisi più facilmente dal calore umido piuttosto che dal calore secco.

Il calore secco si basa su un metodo più lento, richiede temperature più elevate e può trovare applicazione soprattutto per piccole quantità di rifiuti. La temperatura di sterilizzazione oscilla fra i 160°C e i 190°C, mentre i tempi di sterilizzazione variano da 2,5 a 1 ora e dipendono dal tipo di materiale e dalla quantità e modalità di confezionamento.

Il calore umido può essere costituito dall'acqua bollente o dal vapore saturo. Il metodo di sterilizzazione con vapore umido è in grado di garantire l'eliminazione dei microrganismi patogeni ed anche la distruzione delle spore in tempi brevi e costi ridotti. L'economicità è ascrivibile alle sensibili quantità di calore ceduto, per condensazione, al materiale da trattare da parte del vapore.

L'apparecchiatura è costituita sostanzialmente da una autoclave, di volume variabile da 15 a 3000 litri, dotato di una o più porte di accesso per il carico e lo scarico del materiale che deve essere sterilizzato. Temperatura, tempo di esposizione, e pressione, sono i tre parametri che regolano tutto il processo. Temperatura e tempo sono fattori strettamente collegati fra loro. Per ogni temperatura esiste infatti un tempo ottimale di esposizione.

A questo proposito bisogna dire che quando una sospensione di microrganismi è soggetta al calore, il numero di sopravvissuti diminuisce in modo esponenziale con la durata del riscaldamento. Il tempo di sterilizzazione pertanto aumenta in relazione al numero di microrganismi presenti all'inizio.

In ogni modo non è praticamente possibile specificare una temperatura alla quale una sospensione di microrganismi sia completamente uccisa. Per questa ragione è stato coniato il termine "tempo di riduzione decimale" (valore D) che definisce il tempo, espresso in minuti, richiesto per ridurre una popolazione vitale di microrganismi del 90%, cioè di un logaritmo. I valori D vengono determinati attraverso studi di sopravvivenza su particolari microrganismi o spore.

Le autoclavi in genere sono predisposte su due valori di temperatura: 121°C e 134°C. In ambito europeo è stabilito che le autoclavi operino con i seguenti tempi di sterilizzazione:

- 121°C per 40-45 minuti
- 134°C per 15-20 minuti.

In base agli ultimi disposti normativi (DPR 15 luglio 2003, n. 254), i rifiuti sanitari pericolosi a rischio infettivo, qualora avviati ad incenerimento non debbono essere sottoposti a disinfezione, in quanto i prodotti utilizzati come disinfettanti possono generare problemi per le emissioni degli inceneritori. Pur tuttavia, dato il potenziale rischio che possono esibire i rifiuti a rischio infettivo, come procedura interna di minimizzazione di detto rischio, tali rifiuti debbono essere sottoposti a processo di sterilizzazione in tutti i casi ove ciò sia possibile.

CAPITOLO 3

TIPOLOGIE DI PLASMI

In questo capitolo descriveremo i diversi tipi di plasma atmosferico in base alle condizioni operative di alimentazione ed i loro disegni. Però, prima di tutto, si parla di generalità del plasma atmosferico.

INTRODUZIONE

Il plasma è un gas elettricamente conduttivo composto da particelle cariche che si ottiene fornendo energia ad un gas neutro dando così inizio alla ionizzazione del gas. Le particelle cariche si liberano quando elettroni con sufficiente energia si trovano a collidere con gli atomi e le particelle neutre del gas.

A seconda del tipo e della quantità di energia trasferita al plasma, le proprietà di quest'ultimo cambiano in termini di densità elettronica e di temperatura. Questi due parametri distinguono plasmi in diverse categorie, presentato in figura.3.1.

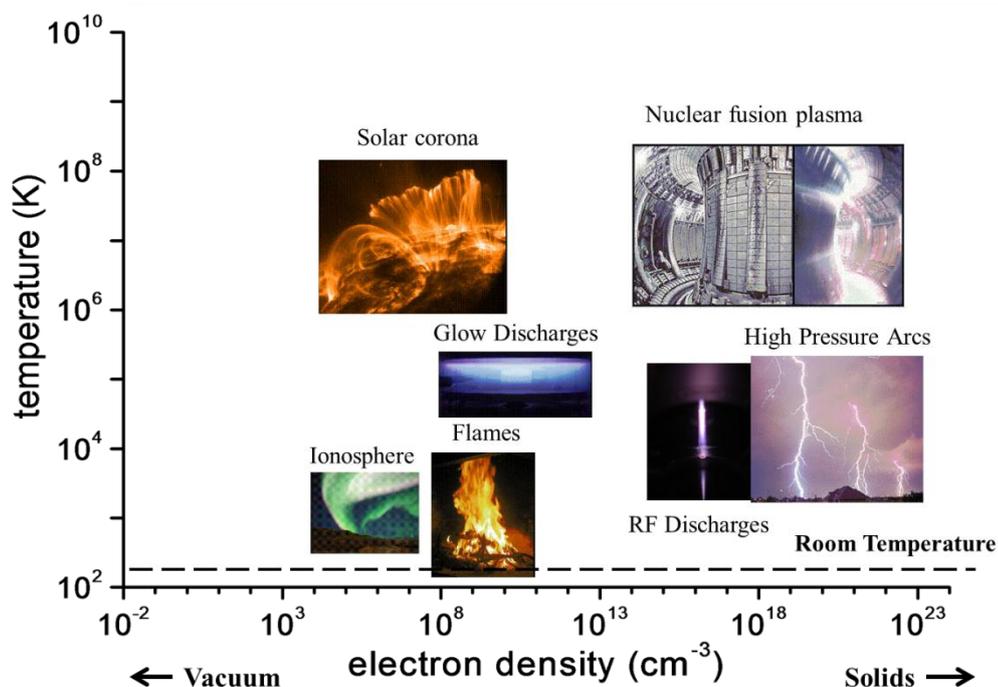


Fig. 3.1 Classificazione dei plasmi (temperatura contro densità di elettroni)[13]

In questa classificazione, una distinzione può essere fatta tra:

- Local thermodynamic equilibrium plasmas “LTE” (or thermal plasma)
- Non-local thermodynamic equilibrium plasmas “non-LTE” (or non-thermal plasma)

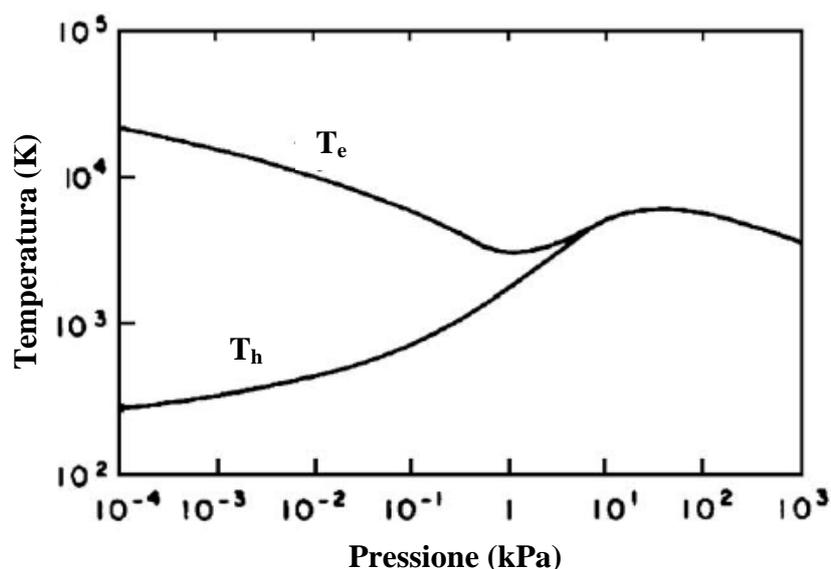


Fig. 3.2 Evoluzione della temperatura di plasma (T_e per gli elettroni e T_h per le particelle pesanti) in funzione della pressione[13]

La fig.3.2 mostra l'influenza della pressione sul passaggio da un glow discharge in vuoto ($T_e > T_h$) ad una scarica a pressione atmosferica. In generale plasmi a bassa pressione (10^{-4} a 10^{-2} kPa) sono non-LTE. La temperatura di particelle pesanti, gli ioni, indicata con T_h , è inferiore a quella degli elettroni (T_e). Le collisioni inelastiche tra elettroni e molecole neutre di gas ionizzano questi ultimi generando ioni. Tuttavia queste collisioni non aumentano la temperatura delle particelle pesanti.

Quando la pressione diventa più alta, le collisioni si intensificano. Essi inducono sia la chimica del plasma (attraverso urti anelastici) che il riscaldamento di particelle pesanti (attraverso urti elastici). In questo regime di alte pressioni la differenza tra T_e e T_h è ridotto, quindi lo stato di plasma si avvicina a LTE, ma non lo raggiunge.

La densità della potenza di alimentazione influisce molto sullo stato di plasma (LTE o non LTE). Una elevata densità di potenza induce plasmi LTE (ad esempio plasmi ad arco), mentre i plasmi non-LTE sono favoriti da una bassa densità di potenza di alimentazione o di una fornitura

elettrica ad impulsi. In quest'ultimo caso, la breve durata dell'impulso impedisce lo stato di equilibrio da stabilirsi.

Tabella 3.1 Confronto tra i Plasmi LTE e i plasmi NON-LTE. (T_p indica la temperatura del plasma)

Plasma	Stato	esempio
Plasma ad alta temperatura (Equilibrium Plasma)	$T_e = T_h, T_p = 10^6 K - 10^8 K$ $n_e \geq 10^{20} m^{-3}$	Laser fusion plasma
Plasma termico (Quasi-Equilibrium Plasma)	$T_e \approx T_h, T_p = 2 \times 10^3 K - 3 \times 10^4 K$ $n_e \geq 10^{20} m^{-3}$	Arc plasma, Atmospheric RF discharge
Plasma non-termico (Non-Equilibrium Plasma)	$T_e \geq T_h \approx 3 \times 10^2 K - 4 \times 10^2 K$ $n_e \approx 10^{10} m^{-3}$	Corona discharge

I plasmi non-LTE a pressione atmosferica possiedono delle caratteristiche uniche che hanno portato ad una serie di importanti applicazioni. L'energia di collisione tra gli elettroni e il gas può risultare in bassi livelli di dissociazione, eccitazione e ionizzazione senza un notevole incremento nella entalpia del gas. Come detto in precedenza questo è il regno di non-LTE plasma dove la temperatura degli elettroni può superare la temperatura delle particelle pesanti (atomi, molecole, ioni) di ordini di grandezza. Poiché gli ioni rimangono relativamente freddi, questi tipi di plasmi non causano danni termici a contatto con le superfici da lavorare. Quindi queste caratteristiche offrono la possibilità di usare questi plasmi per la chimica del plasma a bassa temperatura e per il trattamento dei materiali sensibili al calore compresi i polimeri e i tessuti biologici. Gli esempi tipici di questo tipo di plasma sono corona discharge, dielectric-barrier discharge (DBDs) e glow discharge.

Nei paragrafi successivi, sono descritte varie tipologie di plasma atmosferico in base alle condizioni operative di alimentazione ed eccitazione del plasma e in termini di struttura geometrica.

3.1 PLASMA ARCO DC

In questo caso l'arco viene generato tra due torce di carica opposta, cioè uno con un elettrodo che funge da anodo e l'altro con l'elettrodo che funge da catodo. Gli archi generati da ogni elettrodo accoppiano insieme e creano la zona di plasma. Il gas di plasma attraversa ogni torcia e viene ionizzato e crea il plasma. Questo processo può funzionare sia in area aperta che confinata e chiusa. Queste generi di torce (twin torch) generalmente vengono applicate nei forni (ad esempio per il trattamento dei rifiuti solidi urbani). Il twin arco è ad alta efficienza energetica. Un altro vantaggio è che viene raggiunto la zona interessata da lavorare molto rapido ad una temperatura

relativamente elevata e mantenuta. Uno svantaggio è che l'arco tende a destabilizzare quando la distanza tra due torce diminuisce oppure quando sono racchiusi all'interno di un piccolo spazio. in figura 3.3. è portato lo schema di un forno a twin plasma arco per il trattamento dei rifiuti.

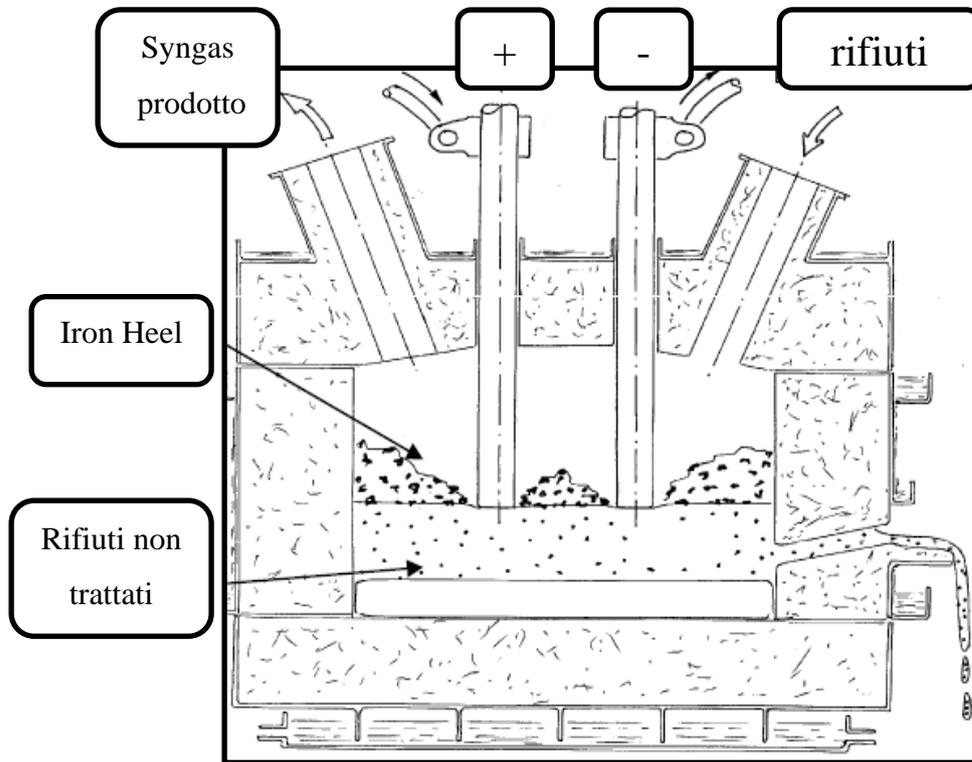


Fig. 3.3 Twin torch

3.2 PLASMA ATMOSFERICO: TORCE

La torcia al plasma è un dispositivo che genera un flusso diretto di plasma da un ugello in seguito all'applicazione di una opportuna differenza di potenziale tra due elettrodi. Il getto di plasma trova diverse applicazioni pratiche, tra le quali :

- Il taglio al plasma di metalli,
- Lo spruzzo al plasma per il deposito (coating) di materiale su varie superfici,
- L'utilizzazione in impianti di incenerimento e di gassificazione dei rifiuti,
- Analisi spettroscopiche che utilizzano il plasma per la vaporizzazione e ionizzazione degli analiti,
- La ionizzazione di reagenti gassosi in apposite camere di reazioni.

Le torce possono essere classificate per quanto riguarda il modo di eccitazione del plasma atmosferico. In questo caso tre grandi categorie possono essere evidenziate:

- Torce RF (radio frequenza)
- Torce ad arco DC (corrente continua) o a bassa frequenza
- Torce a MW (microonde)

3.2.1 TORCE RF

Le torce RF sfruttano il confinamento di onde elettromagnetiche nel range delle onde radio per eccitare il gas e formare un plasma a pressione atmosferica. Tali torce possono lavorare con un alimentatore di onde in radio frequenza ad alta o bassa potenza e tale variazione di potenza influenza le proprietà del plasma e quindi le sue applicazioni. Le torce al plasma RF sono molto compatte e forniscono una densità di energia straordinariamente alta per unità di volume.

A differenza delle torce ad arco al plasma DC, nelle torce RF non si instaurano archi di elevata temperatura localmente e nessuna parte è soggetta ad usura. Le correnti elettriche prodotte da alimentatori RF (e anche MW) possono essere trasferite tramite isolatori, quindi l'uso di elettrodi esterni a camere di reazione e confinamento del plasma è possibile. In questo modo, gli elettrodi non sono esposti a severe condizioni operative ambientali tipiche di questi plasmi termici come le elevate temperature, e quindi hanno una durata particolarmente lunga.

- Scariche RF ad alta potenza: Torce ICP

In questa configurazione il plasma è ottenuto e mantenuto stabile attraverso una spira elicoidale alimentata a RF. La corrente che fluisce attraverso la spira genera un campo magnetico variabile in prossimità della zona di plasma. Il risultante campo elettrico circolare accelera le cariche negative, sostenendo la scarica. La frequenza del plasma così generato è maggiore di 1 MHz. Questa frequenza fa sì che gli elettroni seguano le oscillazioni del campo elettrico e che né gli elettroni né gli ioni possano raggiungere le pareti della torcia. Ciò fa sì che l'inquinamento del plasma sia limitato e che sia possibile utilizzare diversi tipi di gas; inerti, ossidanti, riducenti etc [14']. Il plasma deve essere contenuto in un tubo ceramico raffreddato ad aria o ad acqua, a seconda della potenza di lavoro. Questo tipo di torce lavora in un ampio range di potenze che va dai 20 ai 1000 KW e con flussi di 10-200 lmp. In generale però al crescere della potenza di lavoro si ha un decremento del diametro della torcia ed una minore frequenza del plasma.

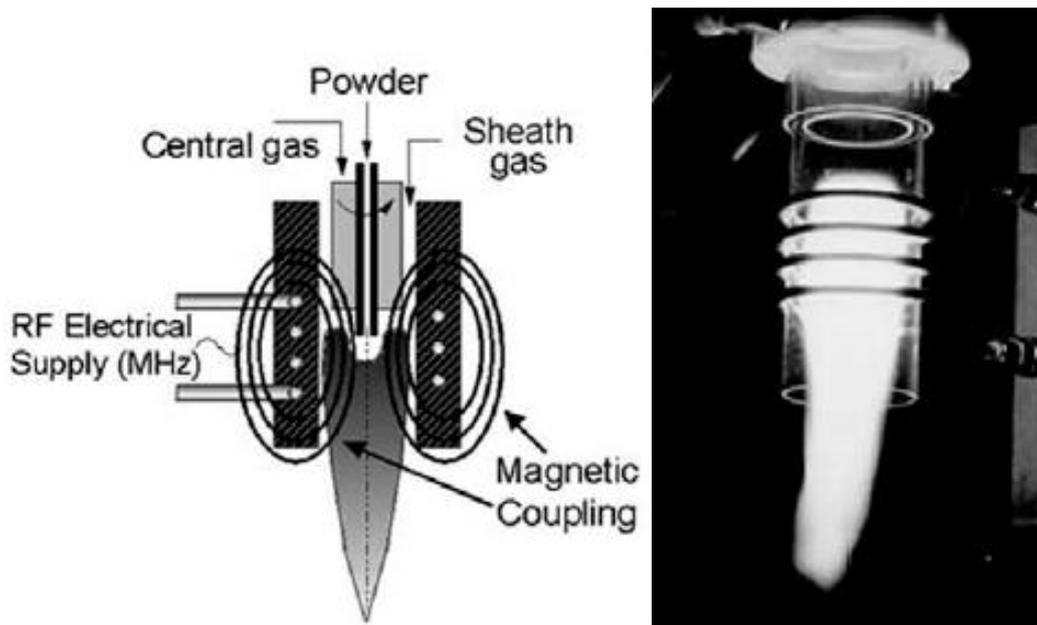


Fig. 3.4 Torcia per plasma RF

- Scariche RF a bassa Potenza:

- Jet di Plasma a Pressione Atmosferica (APPJ)

Costituito da due elettrodi concentrici attraverso i quali fluisce il gas, applicando una potenza RF a quello interno con un voltaggio tra i 100 e i 150 V si ottiene l'innesco del plasma. Il gas ionizzato esce da un nozzle ad una velocità di circa 12 m/s. La bassa quantità di potenza immessa permette di evitare la trasformazione in archi e produce una scarica più stabile. Questo tipo di configurazione è stato impiegato per la deposizione di silice amorfa idrogenata con silice aggiunta in downstream rispetto al plasma di elio ed idrogeno in numerosi esperimenti presenti in letteratura [14''].

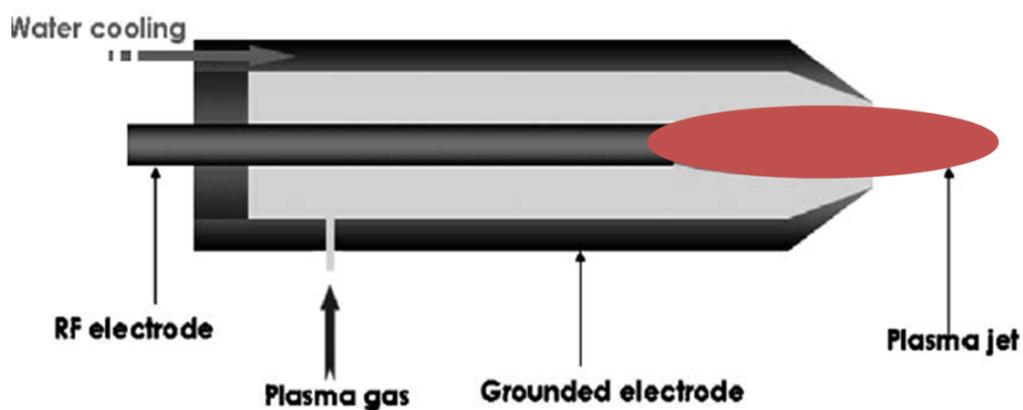


Fig. 3.5 Struttura di una torcia APPJ

- Torce al plasma freddo e sistemi a catodo cavo

Queste strutture si collocano tra le DBD e le APPJ. Sono composte da due elettrodi (quello interno è il catodo e quello esterno va a massa). La parte finale del catodo è circondata da un isolatore. In questa zona il gas immesso tra le due elettrodi si innesca e si crea il plasma. per avere maggiore stabilità al plasma si può inserire un tubo di quarzo tra il catodo e l'anodo.

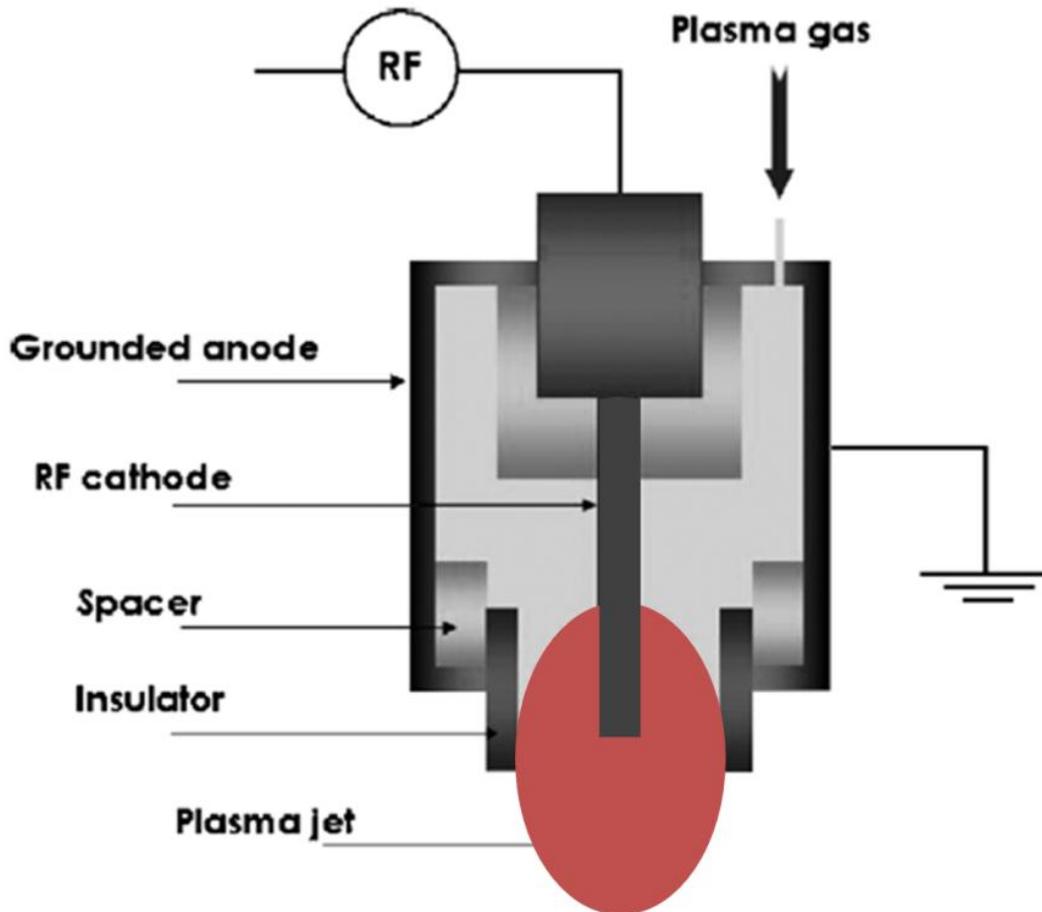


Fig. 3.6 Struttura di una torcia a plasma freddo

La torcia a catodo cavo è molto simile a quella precedente. Infatti mantengono anche esse una configurazione coassiale degli elettrodi. Una delle differenze è però nel fatto che il catodo centrale è cavo dove passa il gas da ionizzare. Il plasma si crea all'interno al catodo e viene inserito in un tubo di quarzo. In figura successiva è riportato il disegno di tale torcia.

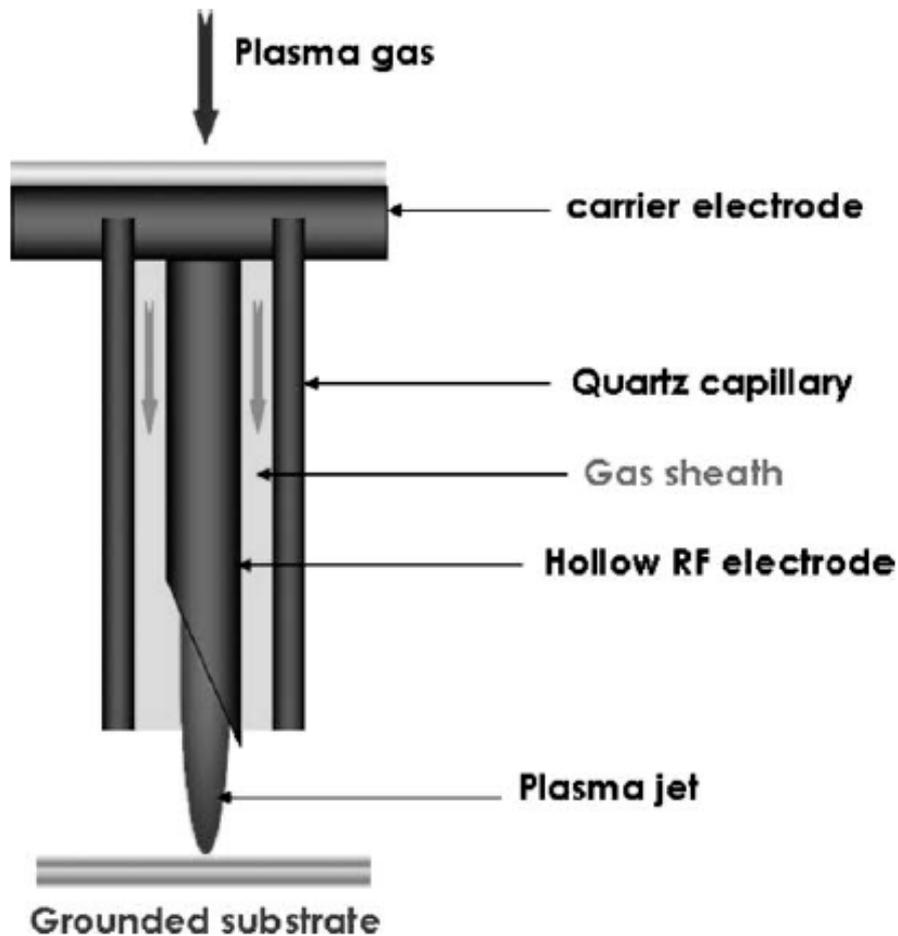


Fig. 3.7 Struttura di una torcia a catodo cavo

3.2.2 TORCE AD ARCO

A seconda della loro disegno, le scariche a DC e a bassa frequenza possono lavorare sia con una modalità continua o pulsata.

La modalità pulsata garantisce un maggior scambio di energia mantenendo limitato il riscaldamento del sistema. D'altra parte, un alimentatore ad impulso è tecnicamente più complesso di una tensione continua e compromette la riproducibilità del processo. In questa categoria appartengono corona discharge [14] e dielectric barrier discharge (DBD). [15]

1. MODO CONTINUO

Arc plasma torch

Le torce al plasma [16] invece, che sono alimentate da una alimentazione DC in modo continuo, possono essere suddivise in due categorie: current-carrying arc e transferred arc (vedi Fig.3.8), entrambi sono costituiti da:

- un catodo dove vengono emessi elettroni;
- un sistema di iniezione di plasma;
- un ugello che confina il plasma.

In una current-carrying arc, l'ugello che è polarizzato positivamente è l'anodo. Nel caso di una torcia ad arco trasferito, il materiale trattato è l'anodo mentre l'ugello è a potenziale flottante. L'arco si accende tra il catodo e anodo e ionizza il plasma. La temperatura del plasma varia da 8000 K (plasma envelop) a 15000 K (plasma core), il che permette applicazioni ad alta temperatura (usa l'effetto termico del plasma). Un arco di plasma è un mezzo conduttivo ($I = 5-60 \text{ A}$), in quanto il gas è altamente ionizzato e la densità elettronica è di circa $3 \cdot 10^{23} \text{ m}^{-3}$. Al contrario delle torce al plasma ad arco classico, lo scarico genera pochissimo calore, che permette il trattamento superficiale di vari materiali compresi materiali degradabili a bassa temperatura come polimeri.

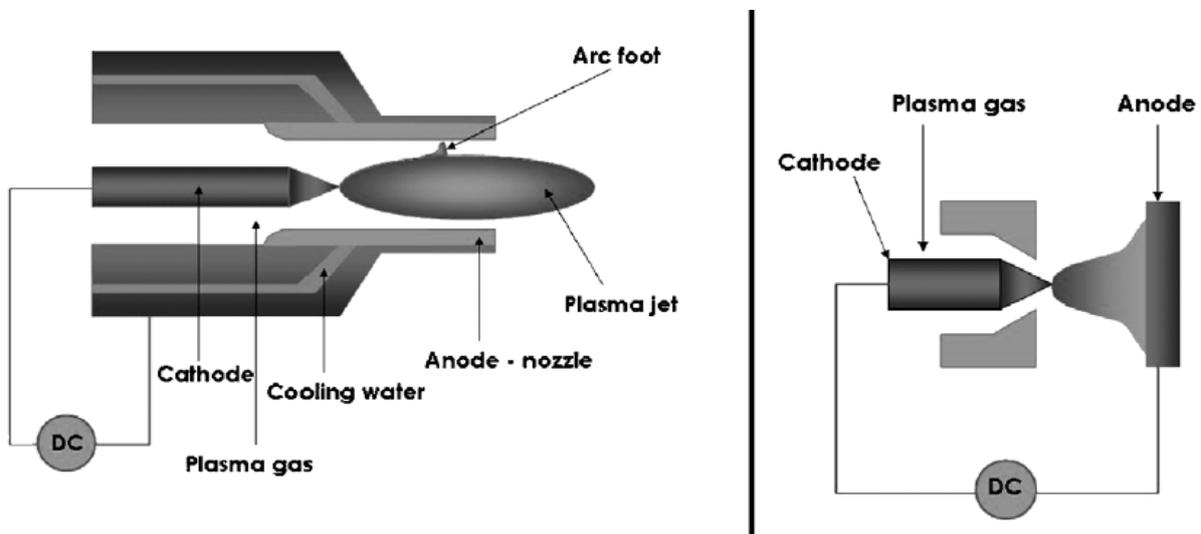


Fig. 3.8 Torcia al plasma (destra: arco non trasferito, destra: arco trasferito)

La durata media degli elettrodi è tra 200 e 500 h di lavoro in ambiente ossidante. Contaminazione del prodotto può anche verificarsi a causa di erosione degli elettrodi. (Guddeti et al., 2000).

Temperatura nel cuore di plasma può essere superiore a 30000 K, mentre nelle zone marginali, la temperatura diminuisce rapidamente e la temperatura media di lavoro può essere alto come 5000 K (Huang e Tang, 2007). Torce ad arco e gli elettrodi sono in genere raffreddati con acqua per mantenere la temperatura in maniera costante (Guddeti et al., 2000).

Torçe pencil-like

Tutte usano una configurazione caratterizzata da un omogeneo jet di plasma ottenuto tramite un current-carrying arc. Così si può lavorare sulla superficie del materiale da trattare. A differenza delle classiche torçe al plasma ad arco, queste torçe non hanno una eccessiva temperatura generata dal plasma e quindi possono essere impiegati anche i materiali più sensibili al calore come ad esempio polimeri.

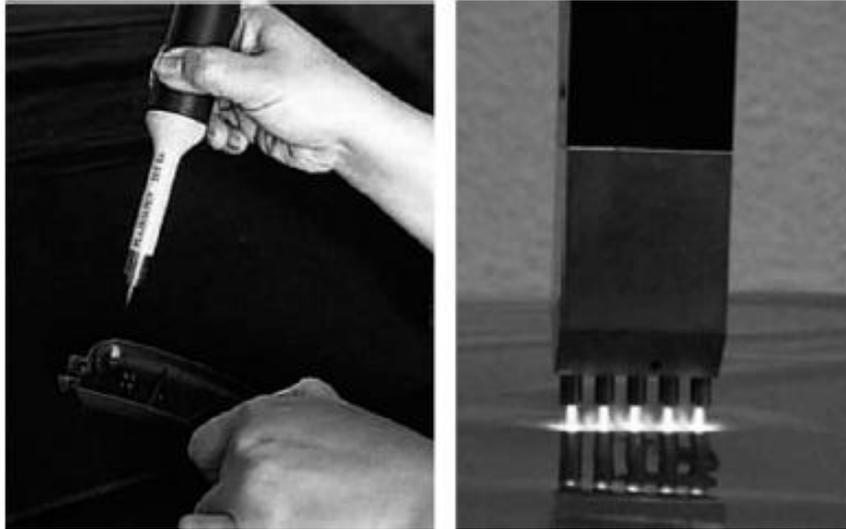


Fig. 3.9 Plasmapen (sinistra) e plasmapen Xtention (destra)

2. MODO PULSATO

Scarica a corona

Questa configurazione considera come non-LTE ed è caratterizzata da una bassa densità di corrente. La struttura è costituita da: un filo che funge da catodo, l'anodo che è il materiale da trattare e da un generatore di corrente pulsata. Dopo l'innesco il plasma avvolge il filo (corona). Se il potenziale è negativo il plasma viene chiamato corona negativa, e positiva altrimenti. Nel primo caso gli ioni positivi vengono accelerati verso il filo, mentre gli elettroni secondari sono emessi ed accelerati dentro il plasma. Questo fronte che si muove di elettroni ad alte energie (circa 10 eV) viene chiamato streamer. Le collisioni inelastiche che si verificano tra questi elettroni energetici e le particelle pesanti, inducono la formazione le specie chimicamente reattive. Il maggiore problema di questa configurazione è nella ridotta area di trattamento disponibile. Infatti dato il loro piccolo volume di plasma, si possono trattare solo piccole superfici. Per evitare questa problema può essere impiegata una barriera dielettrica.

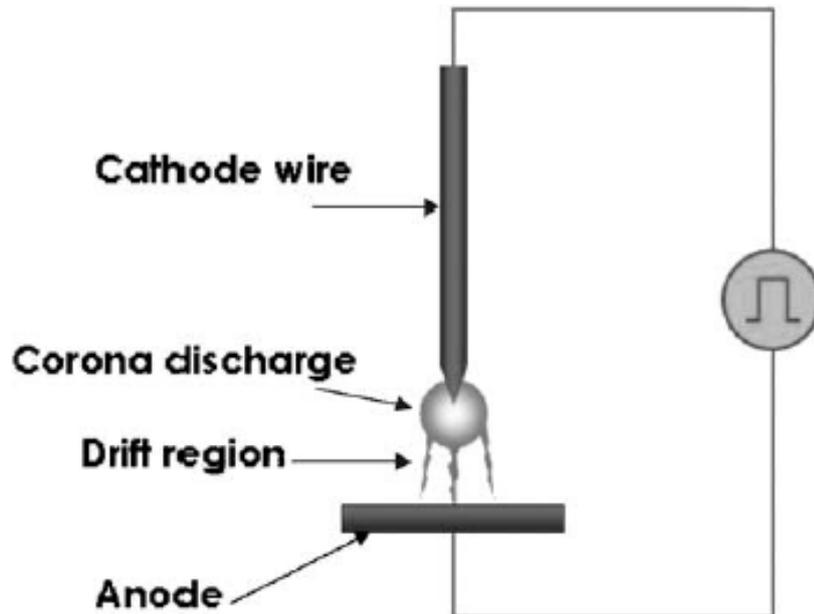


Fig. 3.10 Principio di funzionamento della scarica a corona

Scarica a barriera dielettrica (DBD)

Questa configurazione consiste di due piatti piani paralleli di metallo. Almeno uno dei due viene coperto con uno strato di dielettrico. Per assicurare una maggior stabilità di operazione col plasma, la distanza dei piatti deve essere fissata ad alcuni millimetri di distanza. Poi fluisce il gas attraverso il gap di separazione tra i piani ottenendo il plasma voluto. La scarica può essere ottenuta utilizzando una sorgente sinusoidale o pulsante. Inoltre a seconda del tipo di gas, del voltaggio e della frequenza di eccitazione si possono ottenere filamenti o una distribuzione uniforme di plasma. L'utilizzo di uno strato dielettrico gioca un ruolo molto importante in quanto:

- Limita la corrente di scarica ed evita la transizione in archi e quindi è possibile l'utilizzo di questa configurazione sia pulsante che continuo.
- La creazione degli archi ha origine dagli accumuli di cariche sullo strato dielettrico. La distribuzione casuale dei micro-archi sulla superficie dell'elettrodo permette un trattamento maggiormente uniforme.

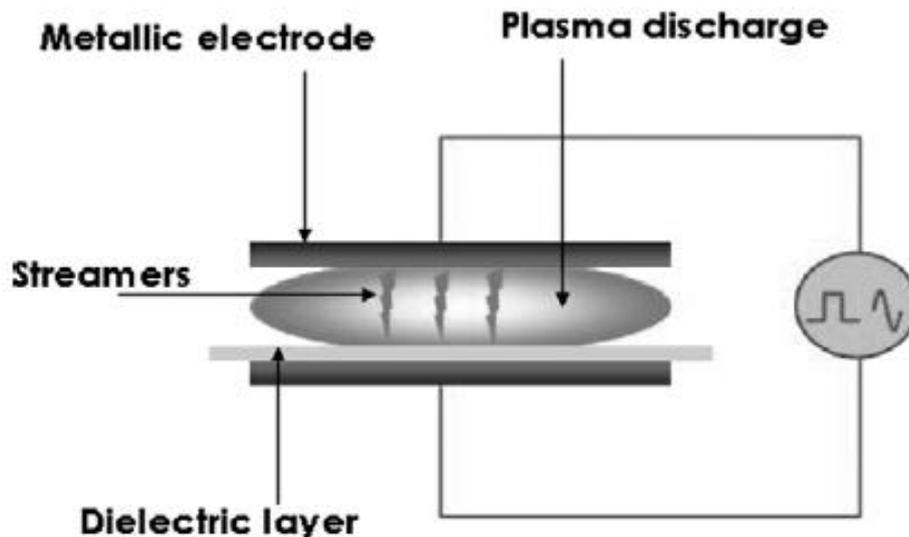


Fig. 3.11 Rappresentazione schematica di una struttura DBD

3.2.3 TORCE A MICROONDE

Il plasma a microonde si differenzia notevolmente da altri plasmi, per le interessanti proprietà. Ad esempio, la densità degli elettroni è più elevata nel plasma a microonde che in radiofrequenza (RF) o corrente continua (DC) plasma.

Vengono generati tanti tipi di specie radicale con alta densità in circostanza di elettroni ad alta densità, quindi si prevede che la reattività del plasma a microonde sia molto elevata.

Tutti i sistemi per la produzione del plasma con microonde si basano allo stesso principio. Le microonde si trasmettono all'interno del sistema e l'energia viene trasmessa agli elettroni del gas di plasma. Si verificano urti elastici tra elettroni e particelle pesanti. A causa della grande massa di particelle pesanti, elettroni in collisione rimbalzano indietro mentre le particelle pesanti restano ferme. Gli elettroni sono quindi accelerati e le particelle pesanti sono leggermente riscaldate. Dopo diversi urti elastici, gli elettroni ottengono energia sufficiente a produrre collisioni anelastiche eccitanti o addirittura ionizzanti. Il gas è parzialmente ionizzato e diventa plasma che sostiene la propagazione delle microonde [17].

Queste strutture generalmente sono costituite da:

- Una sorgente di microonde (power supply, e magnetron e circolatore per proteggere il magnetron dalla potenza riflessa);
- Strumenti per le microonde (guide d'onda, sistema di regolazione);
- Un sistema d'innesco;

- Un sistema per il passaggio del gas;

L'innesco è la chiave delle sorgenti a micro-onde. Infatti un auto-innesco della scarica assicura condizioni di lavoro flessibili e permette l'industrializzazione del processo. L'energia da trasferire deve essere alta abbastanza per innescare il plasma.

Analizziamo ora i componenti più importanti per produrre il plasma a microonde.

Il magnetron

Esso è infatti il dispositivo che permette la creazione delle microonde. Il magnetron è un tipo di valvola termoionica (tubo a vuoto) ad alta potenza per la produzione di microonde. È costituito da un cilindro generalmente di rame con cavità di diversa forma scavata al suo interno. Al centro si trova una piccola bacchetta cilindrica sottile che funziona da catodo. All'interno del catodo c'è un sottile filamento conduttore avvolto a spirale che costituisce il riscaldatore del magnetron per consentirne l'emissione termoelettronica. Tale catodo viene posto a potenziale negativo molto elevato rispetto all'anodo creando una differenza di potenziale che produce l'accelerazione degli elettroni. L'anodo e il catodo sono posti in un tubo in vuoto. Sopra e sotto sono posti due magneti permanenti atti a curvare la traiettoria degli elettroni.

In una delle cavità viene messa un' antenna atta a portare fuori le microonde prodotte, rilasciandole in una guida d'onda per la propagazione delle microonde.

Durante il processo si genera calore, proporzionalmente alla potenza emessa. Per tale motivo ai lati della struttura del magnetron è posta una serie di alette di alluminio per facilitare il raffreddamento del magnetron. In ogni caso un sistema di raffreddamento è sempre necessario.

I principi di funzionamento di un magnetron sono ben radicati nella teoria dell'elettromagnetismo. Infatti per produrre le microonde si deve ricorrere all'effetto termoionico, all'induzione elettromagnetica e al processo di interazione di particelle cariche immerse in un campo elettromagnetico stabile ed uniforme.

L'effetto termoionico è quel fenomeno per cui un determinato tipo di materiale, in questo caso tungsteno, riscaldato ad una certa temperatura comincia a produrre un' emissione di elettroni. Tra l'anodo ed il catodo viene applicata una forte differenza di potenziale. Ciò fa sì che gli elettroni emessi siano attratti fortemente dall'elettrodo positivo. In tal caso entra in gioco lo studio del movimento di particelle cariche in campi elettromagnetici. Si sa che in tali casi si deve porre una correzione alla sola forza di elettrica dalla presenza di un campo magnetico, detta forza di Lorentz :

$$f = eB^{\vec{}} \times v^{\vec{}}$$

Si nota che la sua intensità dipende dal modulo della velocità e dato il prodotto scalare anche dal coseno dell'angolo tra i due vettori B e v. Quindi se la velocità della particella si trova su un piano

perpendicolare al campo magnetico, l'elettrone procede lungo una traiettoria circolare. Si può quindi calcolare la sua frequenza di ciclotrone

$$\omega = v/r = eB/m$$

ove r è il raggio di curvatura, B è il campo magnetico e m la massa della particella. Si nota che tale frequenza non dipende dalla velocità iniziale della particella ma è determinata unicamente dall'intensità del campo magnetico applicato ad essa. In presenza di solo campo magnetico esse seguirebbero delle orbite totalmente circolari intorno al catodo. Quando invece viene aggiunto un campo elettrico accelerante, perpendicolare al campo magnetico, le traiettorie delle particelle cariche assumono una forma quasi cicloidale. Ciò è dovuto al fatto che man mano che il campo elettrico applicato tra anodo e catodo svolge la sua funzione accelerante, si ha un incremento del raggio di curvatura. Ciò avviene fino a che non si raggiunge il punto in cui la forza del campo elettrico non è perpendicolare al percorso compiuto dall'elettrone.

Da questo momento la particella ha direzione opposta all'azione della forza elettrica. Conseguentemente la sua velocità e la sua curvatura decrescono fino a quando non si troverà di nuovo un punto di minima azione della forza elettrica. Da qui si ricomincia il processo appena descritto che culminerà nel raggiungimento da parte dell'elettrone dell'anodo.

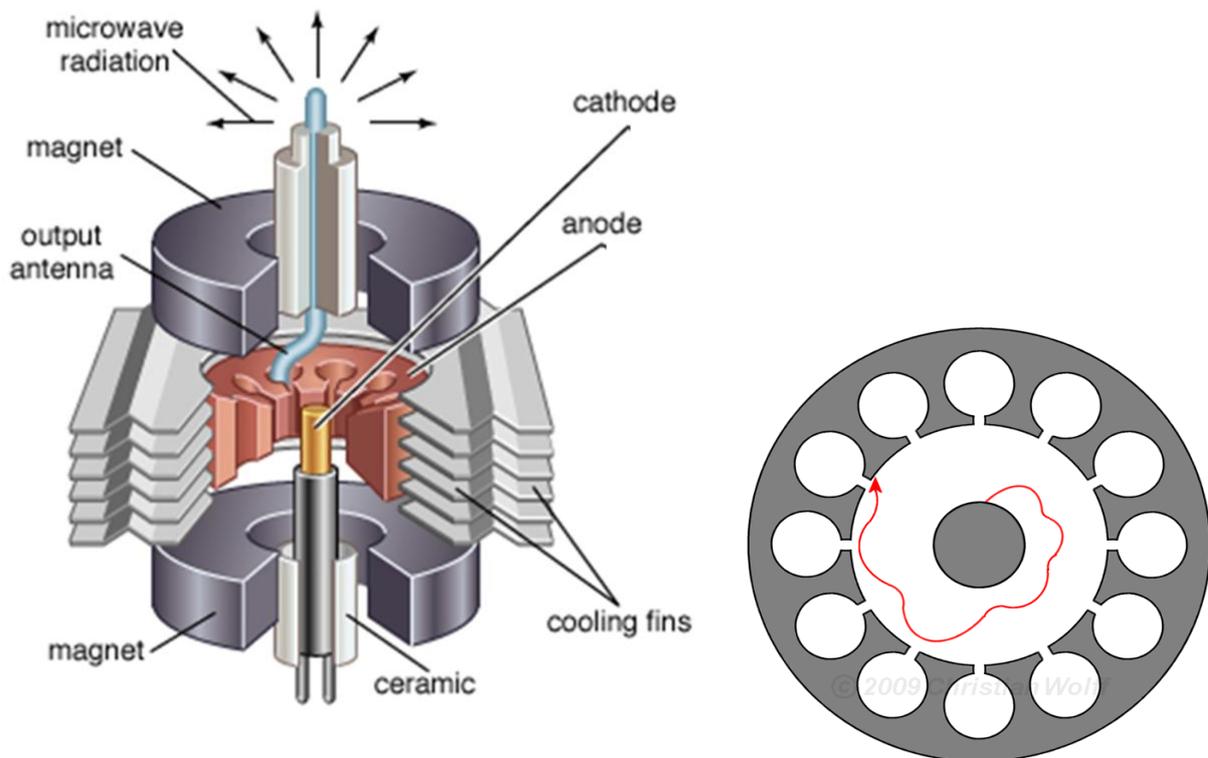


Fig. 3.12 A sinistra : Struttura di un magnetron. A destra: Rappresentazione del moto dell'elettrone soggetto all'azione di un campo elettrico E perpendicolare ad un campo magnetico B .

A questo punto abbiamo analizzato il movimento delle cariche all'interno del magnetron. Particolare molto importante da aggiungere alla trattazione risulta essere il processo di induzione, che, per effetto del moto degli elettroni, si ha sulle piastre che costituiscono l'imboccatura delle cavità risonanti presenti nell'anodo.

Tale evento è l'effettivo generatore delle microonde che poi si ricaveranno dal dispositivo. Infatti la polarizzazione che si viene a creare cambia di segno al passare degli elettroni, e quindi crea un andamento oscillante nel campo elettromagnetico indotto nell'anodo.

La prossima figura rende più chiaro il concetto:

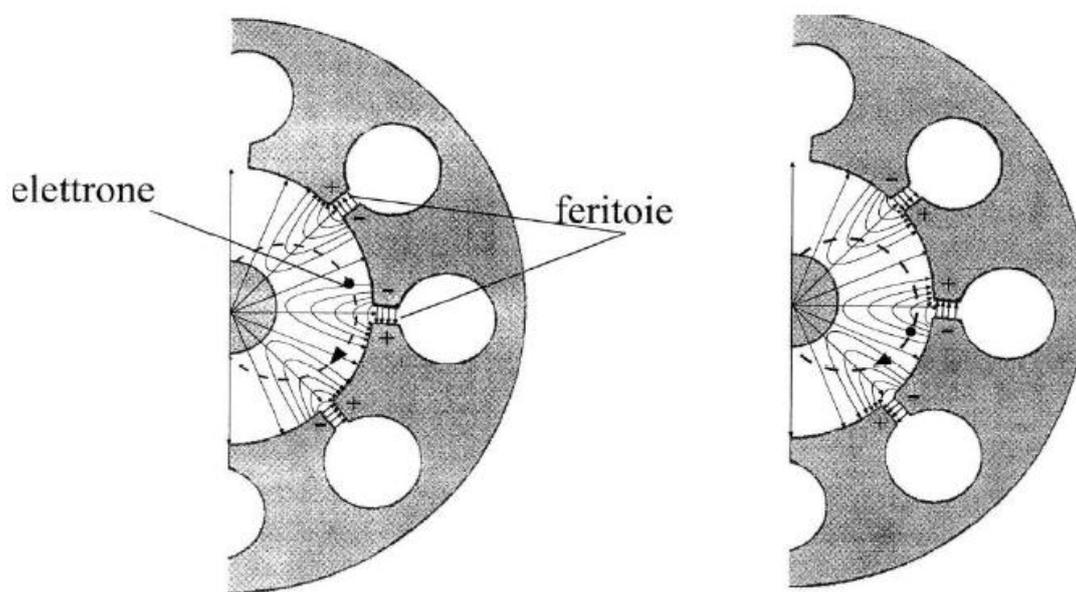


Fig. 3.13 Effetto del moto dell'elettrone sulla polarizzazione indotta sulle bocche delle cavità risonanti

Inoltre questo campo elettrico aggiuntivo che si viene a creare fa sì che si crei una distinzione tra gli elettroni emessi dal catodo; infatti, a seconda che essi vengano prodotti in zone con un campo accelerante o decelerante, il distinguo che si può fare è tra elettroni "inutili" o "utili". Il principio regolatore di questa fondamentale differenza risiede nel fatto che, mentre i primi non contribuiscono al sostentamento delle microonde indotte nelle cavità, i secondi sono i veri mediatori del trasferimento di energia che avviene tra il campo elettrico stabile, fornito dal trasformatore, e quello oscillante creato per effetto dell'induzione. Infatti, mentre gli elettroni "inutili" seguono traiettorie che li riporteranno velocemente a tornare in prossimità del catodo, quelli "utili", seguendo orbite cicloidali, e quindi più lunghe, assorbono energia dal campo elettrico stabile e la cedono al campo oscillante prodotto nelle cavità; si creeranno quindi dei fasci di elettroni che si

muoveranno in sincrono con le oscillazioni delle microonde. La seguente figura dovrebbe risultare esplicativa di tale fenomeno:

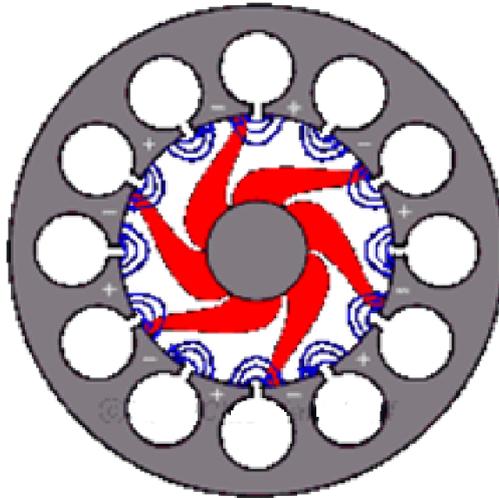


Fig. 3.14 Rappresentazione del moto delle “onde” di elettroni

Un fattore importante per giudicare la qualità di un magnetron è il fattore di efficienza di trasferimento dell'energia; esso è dato dalla seguente formula:

$$\eta = 1 - \frac{mc^2}{2eE} \left(\frac{2\pi r}{n\lambda} \right)$$

ove E è il potenziale anodico. Tale fattore viene calcolato confrontando l'energia persa dagli elettroni utili e da quelli inutili. Si è visto in precedenza l'insieme degli effetti che portano alla creazione delle oscillazioni all'interno delle cavità anodiche del magnetron. La frequenza delle oscillazioni prodotte dipenderà dalla geometria delle cavità. La velocità con cui le feritoie si polarizzano sarà quindi dettata da tale frequenza

Guide d'onda rettangolari

Le cavità risonanti hanno svolto un ruolo dominante nello studio e nelle applicazioni dei plasmi sostenuti con le microonde.

Tra le cavità risonanti, quelle maggiormente utilizzate sono quelle a base rettangolare di dimensioni standard, chiuse ad un'estremità. Le dimensioni della guida e la frequenza di lavoro vengono scelte in genere per far sì che le onde elettromagnetiche si propaghino al suo interno nel modo fondamentale TE₁₀.

La figura successiva chiarisce il concetto ed i modi vibrazionali del campo in questione:

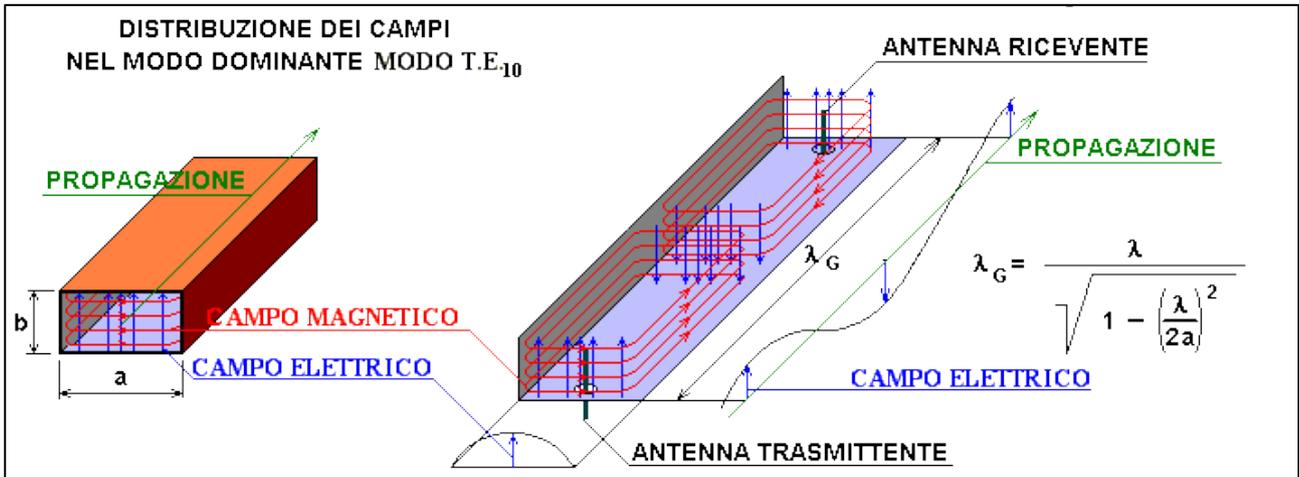


Fig. 3.15 Metodo di propagazione del campo elettromagnetico in configurazione TE₁₀

Al variare delle dimensioni delle guida d'onda, la lunghezza d'onda dell'onda propagante cambiano secondo la formula:

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{2a}\right)^2}}$$

ove λ_0 rappresenta la lunghezza d'onda dell'onda elettromagnetica nel vuoto, a è la dimensione del lato lungo della guida d'onda e λ_g è la lunghezza d'onda dell'onda all'interno della guida d'onda.

Una guida d'onda risulta essere risonante quando la sua lunghezza è pari a $n\lambda_g/2$. Quando in effetti un'onda elettromagnetica entra nella guida d'onda, arrivata in fondo ad essa, viene riflessa creando così un'onda stazionaria con piccole perdite, se le dimensioni della guida sono adeguate; all'aumentare delle onde entranti nella guida, si verificano delle interferenze costruttive per cui si ha un incremento dell'energia globale del campo elettromagnetico. In aggiunta si otterrà un confinamento dell' massimo di campo elettrico; quindi sarà utile porre la zona di innesco in tale punto.

Per ottenere quindi una scarica è opportuno confinare il plasma tramite, per esempio, un tubo di quarzo in ben determinate posizioni; in particolare si usa di solito una collocazione a $\lambda_g/4$ dalla fine della guida, in modo da porsi nel punto di massimo campo elettrico. Inoltre l'asse del tubo deve essere perpendicolare alla guida e parallelo alla direzione del campo elettrico, in modo da

avere un maggiore range di condizioni sperimentali a disposizione. Tale tubo verrà fatto passare attraverso dei fori passanti per tutta la profondità della guida.

Le configurazioni che usano guide d'onda rettangolari maggiormente studiate sono principalmente due: le torce metalliche e quelle semi-metalliche.

3.2.3.1 TORCE METALLICHE

La TIA (torche a` injection axiale) torcia al plasma a microonde è stato sviluppato da Moisan et al. [20]. Funziona con una normale transizione guida d'onda - linea coassiale. Il plasma fluisce nella linea coassiale più interna ed esce attraverso un ugello (vedi fig.12). Le microonde sono generate dal magnetron e raggiungono al plasma utilizzando le guide rettangolare. La scarica viene accesa in punta all'ugello.

La guida seleziona la modalità di propagazione: TE_{10} nella guida rettangolare ($E_z = 0$ con z la direzione di propagazione dell'onda) e TEM nella linea coassiale ($E_z = H_z = 0$), che limita la perdita di energia che potrebbe venire da eccitazioni parassite. Questa torcia microonde metallica è stata brevettata da P. Leprince et al. [21] (Laboratoire de Physique des Gaz et des plasmi, Orsay, Francia).

Altri laboratori hanno studiato altre torce a microonde utilizzando la stessa linea di transizione guida d'onda -coassiale. Il disegno cambia leggermente a seconda del campo di applicazione della torcia. Al fine di limitare le interazioni con l'atmosfera circostante, Jasinski et al. [22] hanno ulteriormente confinato il plasma inserendo un tubo di quarzo intorno al nozzle. Okamoto et al. [23] ha messo un tubo di quarzo (più lungo della linea coassiale) all'interno del conduttore interno per iniettare campioni di aerosol e confinare il plasma (torcia per l'analisi spettroscopica). L'accensione di scarico è indotto da una bobina a spirale. Questa torcia produce plasma a forma anulare.

Suzuki et al. [24] ha progettato una torcia che utilizza la transizione in guide-coaxial senza iniziatore pistone mobile. L'acqua scorre all'interno del conduttore interno la cui parte superiore è fatta di molibdeno per evitare danni termici. Un ugello di rame è posta alla fine della torcia. Il gas viene iniettato nel gap di linea coassiale. Lo scarico è generato nello spazio tra la parte superiore di molibdeno e il nozzle dove il campo elettrico si concentra.

Visto che il progetto TIA è piuttosto sofisticato, la sua costruzione richiede una lavorazione avanzata e costosa. Così, questa torcia coassiale è stata semplificata. Moisan et al. ha progettato la Tiago (guida sur TIA d'Onde). Si tratta di un sistema di un ugello semplice e compatto [25], ma le radiazioni elettromagnetiche possono essere emesse dal gap tra l'ugello e la guida d'onda.

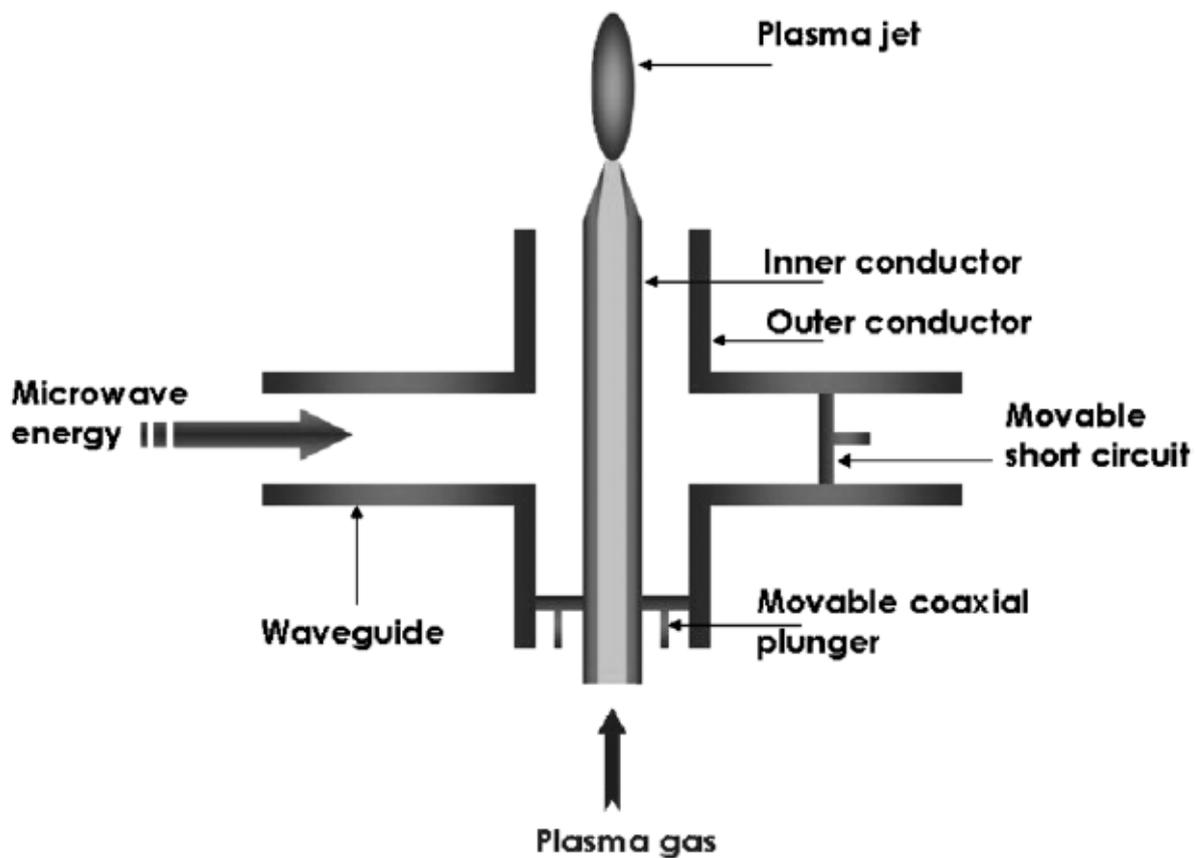


Fig. 3.16 Rappresentazione schematica di un TIA

Per proteggere il personale e lo strumento da tali radiazioni, Jasinski et al. [26] ha posto una griglia cilindrica di metallo all'interno del reattore, coassialmente intorno al nozzle. Questa griglia influenza la fiamma al plasma, migliorando la stabilità. Questo sistema è chiamato Microwave Torch Discharge (MTD).

La cavità di plasma è costituita da una guida d'onda a sezione rettangolare. L'ugello di gas è all'interno della cavità direttamente sopra l'apertura nella guida d'onda, un quarto della lunghezza onda dal (short circuit) circuito corto, dove si produce il massimo campo elettrico. Questo sistema è generalmente eccitato sia a 2,45 GHz sia a 896 MHz [27] (la lunghezza d'onda di quest'ultima limita la radiazione elettromagnetica, nonostante l'apertura di guida d'onda).

3.2.3.2 TORCE SEMIMETALLICHE

Il disegno di questa torcia è molto simile a quella delle torce metalliche. La differenza principale è la modalità di propagazione delle onde elettromagnetiche e la mancanza di una transizione guida-linea coassiale.

Nella torcia semi-metallica, il gas di plasma fluisce attraverso un tubo di quarzo. In generale le caratteristiche che deve avere un tubo in cui avverrà l'innesco del plasma sono questi :

- La costante dielettrica
- La resistenza ai gradienti termici
- La resistenza alla temperatura molto elevata
- La facilità di reperibilità

e il quarzo che risponde a tutti i requisiti sopra riportati.

In questa modalità invece di innescare sulla parte superiore dell'ugello, la scarica viene innescata all'interno del tubo nella zona che interseca la guida d'onda rettangolare[28]. (see Fig.13) Questo sistema (detto anche 'guida surfatron' [29]) coinvolge onde superficiali: la modalità di propagazione è convertito dal modo TE_{10} (nella guida d'onda rettangolare) in modalità TM_{10} (nel capillare di quarzo). Le microonde si propagano lungo l'interfaccia tra il tubo di quarzo e il plasma: allora, il plasma può essere esteso su distanze lunghe. La più semplice semi-metallic torch è chiamata torcia di plasma a micro-onde (MPT). Essa crea una scarica a forma di fiamma luminosa e il colore varia a secondo il gas impiegato. [30]

La figura 13 rappresenta una torcia semi-metallica:

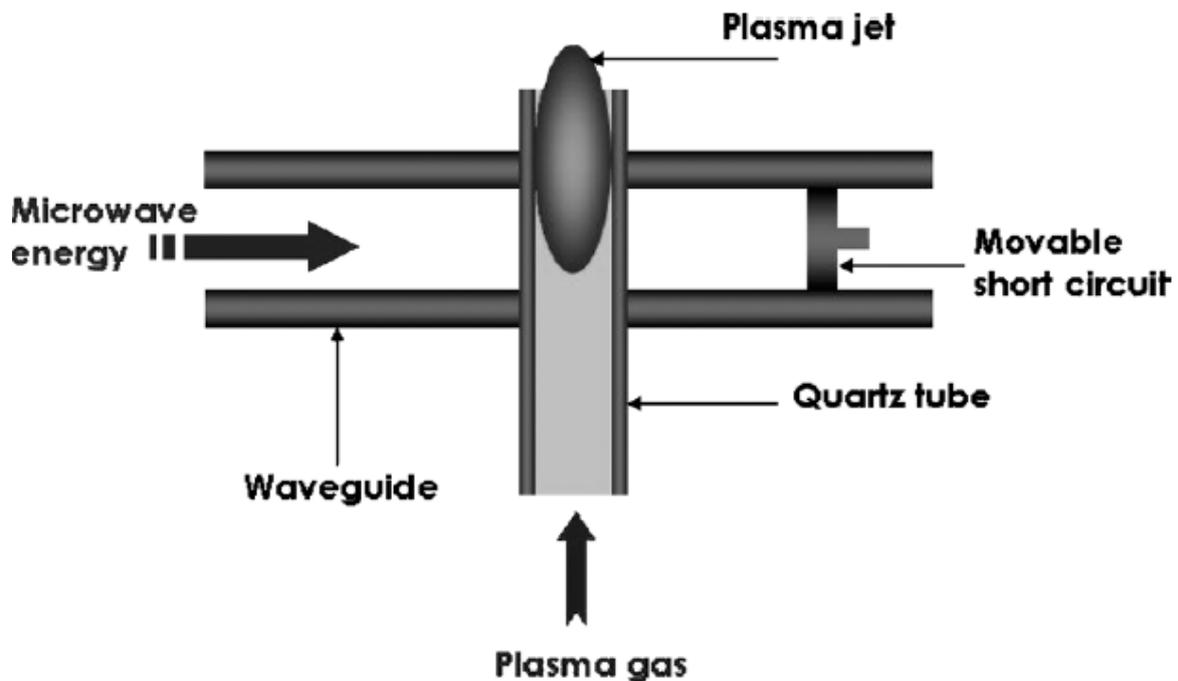


Fig. 3.17 Rappresentazione schematica di una torcia semi-metallica

3.2.3.3 CYRANNUS

Tutte queste torce al plasma a microonde sono ancora in sviluppo nei laboratori. CyrannusRI (risonatore cilindrico con slot anulari) è un esempio di plasma atmosferica di sorgente a microonde che è stato sviluppato in Germania da Iplas [31]. Esso genera un plasma uniforme ed omogeneo in un tubo di quarzo sia in bassa pressione che in pressione ambiente (Fig. 3.18). Questo sistema si adatta molto bene per la preparazione superficiale (attivazione polimero) ma il suo disegno chiuso evita l'integrazione diretta di produzione linee.

L'affidabilità e la velocità elevata sono i due grandi vantaggi ottenuti da questa tecnologia. Lavorare a pressione media o a pressione ambiente consente di ottenere i processi più efficaci.

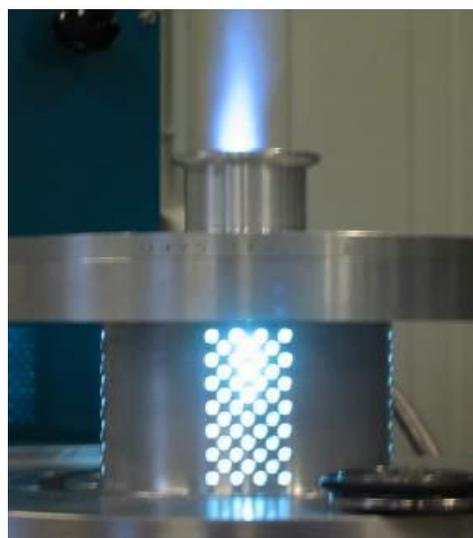
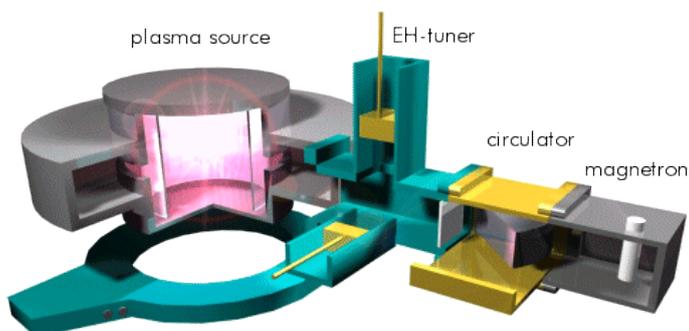


Fig. 3.18 Cyrannus I source(Iplas, Germany) [31]

Qui sotto è portata una tabella per confronto tra questo sistema e il sistema di plasma al vuoto.

Tabella. confronto tra le caratteristiche del plasma di cyrannus e di quello convenzionale in vuoto

Processo al plasma	Plasam a vuoto convenzionale	Cyrannus plasma a pressione medio
Activation of textiles or plastic parts	trattamento di 2-5 min	2-10 sec
Deposition of polymers or glass on plastics	$1\mu m/min$	$2-5\mu m/min$

Diamond deposition	$\ll 1\mu\text{m}/\text{h}$	1-10 $\mu\text{m}/\text{h}$
--------------------	-----------------------------	-----------------------------

CAPITOLO 4

TORCE SEMI-METALLICHE

Lo scopo di questo capitolo è quello di realizzare una torcia al plasma atmosferico utilizzando i componenti a basso costo dei normali forni a microonde e con l'obiettivo di utilizzare questa torcia sia nel settore industriale che nella ricerca.

4.1 TORCIA AL PLASMA CON TECNOLOGIA COMMERCIALE DOMESTICA

Come già accennato precedentemente, per la realizzazione di una torcia al plasma a pressione atmosferica in configurazione semi-metallica, ci si deve avvalere di un sistema che produca e conduca le microonde fino alla zona predisposta per l'innesco del plasma. Tale tipo di sistema è composto da un equipaggiamento che può essere diviso in due categorie:

- componenti attive: le sorgenti vere e proprie delle microonde (Magnetron, Klystron, etc);
- componenti passive: parti dedicate alla trasmissione delle onde (guide d'onda, cavi coassiali), all'adattamento (adattatori di impedenza, carichi, circolatori) e alla misura dell'intensità di campo nella zona di interesse (directional coupler).

La maggior parte di questo elenco però è molto costoso (il circolatore, il directional coupler) oltre che d'intralcio per una miniaturizzazione del sistema, ne rende difficile l'evoluzione su scala industriale. Si è quindi pensato di ridurre i costi cercando di adattare la tecnologia già esistente per i forni a microonde per le nostre esigenze.

Le componenti che si sono decise di tenere, in quanto assolutamente necessarie per creare una torcia al plasma sono state:

- il magnetron (alimentato da un power supply),
- le guide d'onda (di diverse geometrie),
- il tubo di innesco.

Struttura dei forni con tecnologia inverter.

Conservando il magnetron, abbiamo utilizzato l'alimentazione usata nei forni a microonde domestici con tecnologia ad inverter. Tuttavia prima di spiegare cos'è un inverter è necessario spiegare perché il forno a microonde con inverter si presta alle nostre applicazioni mentre un comune forno a microonde tradizionale è inadatto alle nostre esigenze.

In particolare, nei forni a microonde tradizionali le componenti principali del circuito elettrico per la produzione di microonde sono solo il magnetron, un trasformatore ad alto voltaggio e un circuito di alimentazione Half-Wave (l'accoppiata diodo-capacitore).

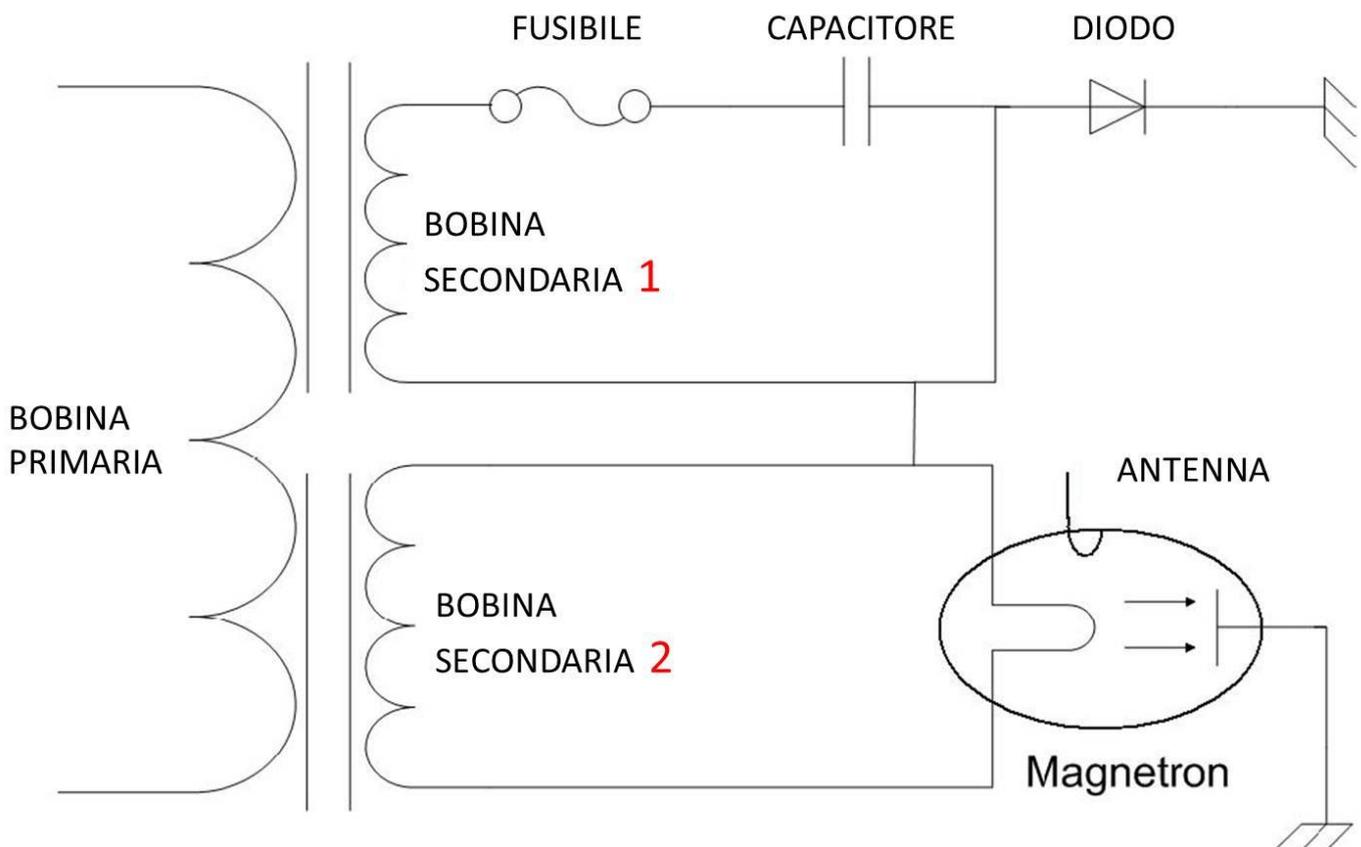


Fig. 4.1 Rappresentazione schematica di un circuito di alimentazione di un forno a microonde tradizionale.

Tali circuiti sono progettati per erogare picchi di potenza non stabilizzata in tensione e quindi, nel caso di innesco del plasma, si osserva una caduta della tensione anodica, e di conseguenza una flessione nella potenza erogata dal generatore. Tale caratteristica non consente di sostenere l'innesco del plasma.

Il sistema che permette di gestire in maniera continua la potenza è detto *inverter* ed esiste in un' altra categoria di forni a microonde. La figura di seguito riporta lo schema elettrico principale dei forni a microonde con tecnologia ad inverter:

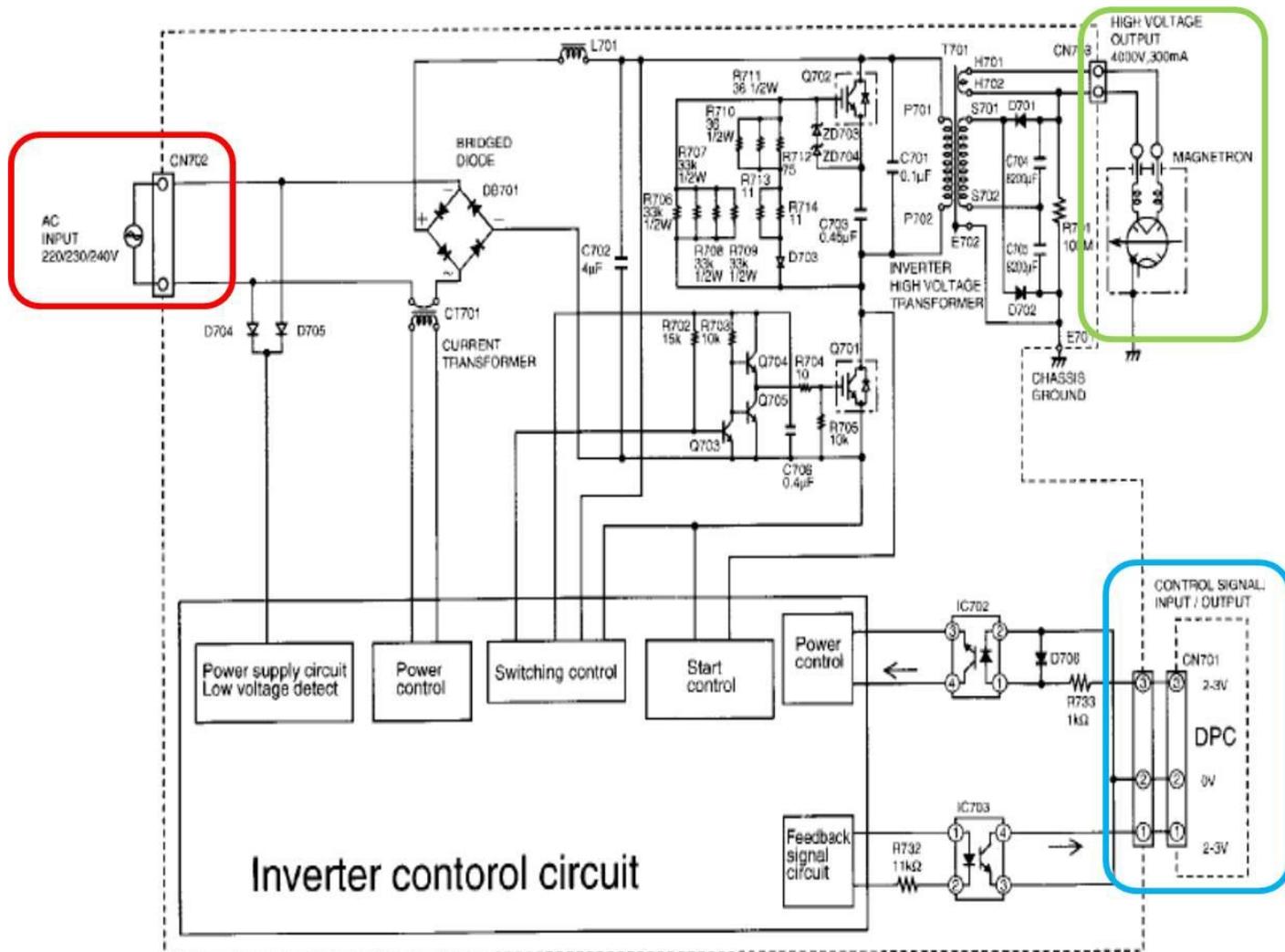
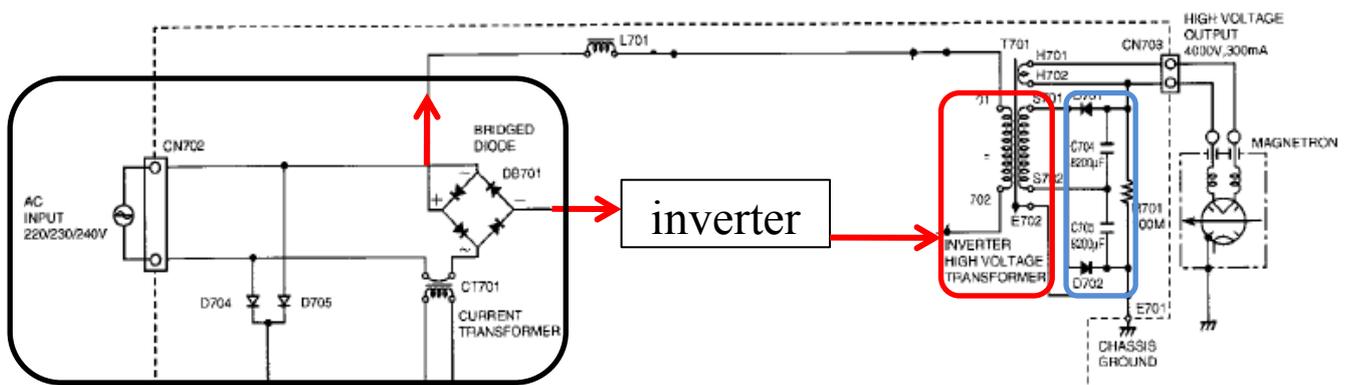


Fig. 4.2 Schema a blocchi del circuito di alimentazione del magnetron.

In tal caso vi sono due input: uno proveniente dalla tensione di rete, AC input, segnato nel riquadro rosso, ed un altro proveniente da un circuito di controllo input/output, DPC, segnato nel riquadro azzurro. L'output dell'alta tensione al magnetron è segnato nel riquadro verde. Analizziamo nello specifico la funzione di ognuno di essi.



Collegamento rete-ponte di diodi

Fig. 4.3 In figura è rappresentato il collegamento tra la rete 220V-AC raddrizzata dal ponte di diodi (riquadro nero) con il trasformatore ad alto voltaggio (riquadro rosso) il quale a sua volta si collega al circuito raddizzatore/raddoppiatore (riquadro azzurro).

Come si vede, l'input proveniente dalla tensione di rete è direttamente connesso ad un ponte di diodi, il quale provvede ad un ribaltamento della semionda negativa proveniente dalla rete, in modo da ottenere un segnale composto da sole semionde positive. La prossima figura riporta il grafico della tensione rispetto al tempo prima del ponte e dopo il ponte;

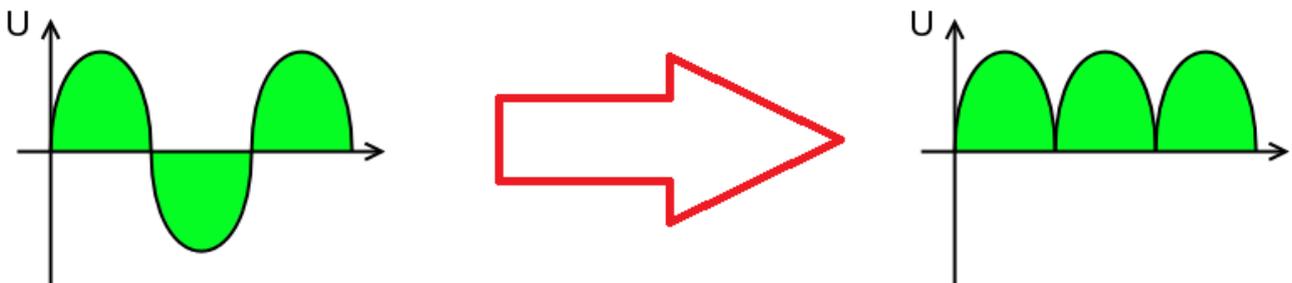


Fig. 4.4 Potenziale prima e dopo il ponte di diodi

Un'uscita del ponte di diodi, quella col segno positivo, è connessa ad un trasformatore ad alto voltaggio, il quale porta la tensione di rete a valori intorno ai 2 kV. Un'altra uscita, si collega all'inverter. Per alimentare il magnetron, però, la tensione che viene prodotta dal trasformatore non è ancora sufficiente, quindi, per incrementarne ancora di più il valore, dopo il trasformatore, si fa ricorso al circuito Full Wave (due diodi e due capacitori). Tutto ciò è visibile nella figura 4.2, ove in rosso è evidenziato il trasformatore ad alto voltaggio (connesso anche al circuito inverter) mentre in azzurro è segnalato il circuito raddoppiatore/raddrizzatore già noto. Si può anche notare che dopo

tali circuiti l'output prodotto per alimentare il magnetron risponde alle caratteristiche necessarie (4 kV e 300 mA).

L'inverter fa parte della classe degli Switched-Mode Power Supply (SMPS), ed in particolare è chiamato così quando questi lavorano trasformando un ingresso DC in AC. Essi controllano il voltaggio e la corrente in uscita inserendo o meno gli elementi di stoccaggio ideale, quali gli induttori ed i capacitori, all'interno di diverse configurazioni elettriche.

In realtà l'inverter è costruito basandosi sul funzionamento dei transistor IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor). Questi sono capaci di controllare la potenza in base a un segnale esterno a bassa tensione applicata al gate di IGBT. Ciò significa che un segnale a bassa tensione permette di controllare un grande flusso di corrente attraverso il canale source-drain. Quindi applicando al gate un segnale di onda quadra, abbiamo lo stesso impulso in alta tensione in uscita dall'IGBT, il quale viene trasformato di nuovo in DC tramite un LC-filter.

La conclusione di quanto detto sopra è che usando un segnale PWM (Pulse Width Mode) applicata al gate, siamo in grado di controllare l'intensità della tensione di output ed è esattamente questo che fa l'inverter in un forno microonde.

Caratterizzazione sperimentale:

Adesso andiamo a caratterizzare i livelli di potenza del forno a microonde (modello PANASONIC NN-GD469M) che ha sei livelli di potenza: Max (1000 W), 600 W, 440 W, 250 W, 100 W e Min.

Per i tre livelli più bassi esso funziona in maniera simile ad un forno a microonde "standard": la larghezza dell'impulso di controllo è la stessa (vedi figura) ma il tempo per cui viene fornita potenza al magnetron diminuisce da 250 W a Min, quindi l'integrale nel tempo della potenza sarà variabile anche se il magnetron istantaneamente eroga la stessa potenza.

Come si può vedere dalla Figura 4.1 (nella parte evidenziata in nero), il bus di controllo ha tre canali:

- Input: il segnale di controllo pulsato dal controller all'IGBT
- Output: il segnale di feedback generato dall'on-board controller dell'inverter e necessario per impedire il sovraccarico del magnetron
- Messa a terra

A causa di fattori legati alla composizione del circuito, e del suo on-board controller, l'inverter deve essere avviato in due o più stadi partendo dall'ampiezza di impulso più piccola (t_0) e finendo alla ampiezza di impulso nominale (t_1) che corrisponde al livello di potenza selezionato. Il periodo dell'impulso su tutti i livelli di potenza rimane lo stesso ed è uguale a 4,48 ms che corrispondono

alla frequenza di 223 Hz. Il livello di tensione corrisponde ai livelli logici TTL che sono uguali a 0-0,4 V (logic 0) e 2,4-5V (logic 1).

Nella figura 4.4 è rappresentato il segnale di controllo dell'avvio dell'inverter (t_0) registrato dall'oscilloscopio. Questo segnale pulsato è lo stesso per tutti i livelli di potenza. La larghezza dell'impulso a t_0 è uguale a 0,747 ms. Come si può vedere nella figura a t_0 non c'è nessun segnale di feedback.

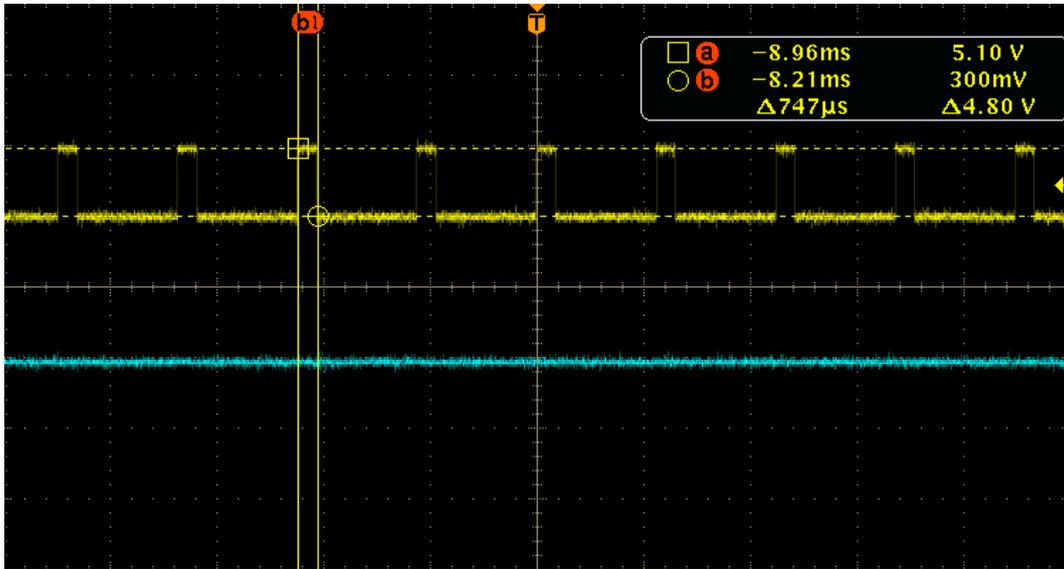


Fig. 4.5 Controllo "avvio inverter" segnale giallo (t_0).

L'ampiezza di impulso non è sufficiente ad accendere il magnetron ma si rende necessario per il riscaldamento del filamento del magnetron, il quale inizia a produrre gli elettroni necessari per il suo funzionamento.



Fig. 4.6 Controllo “livello di potenza preliminarmente settato” segnale giallo (t_1) al max (1000W)

Il magnetron si accende allo stadio successivo (t_1) che è diverso per tutti i livelli di potenza. L'immagine presa dall'oscilloscopio rappresentante t_1 corrispondente alla potenza massima (1000 W) è presentata nella figura 4.5.

Come si può vedere dalla figura 4.5 la larghezza di impulso a tale potenza è uguale a 2,93 ms che corrisponde a un pulse ratio del 65% circa.

Al tempo t_1 appare anche il segnale di feedback che non cambia nel tempo. È solo un segnale di onda quadra alla frequenza di 111 Hz con un pulse ratio del 50% .

L'alta tensione fornita al magnetron, a questo livello di potenza (1000 W), è rappresentata nella figura 4.6, è stata misurata usando una sonda ad alta tensione con un coefficiente di divisione di 1/1000 .

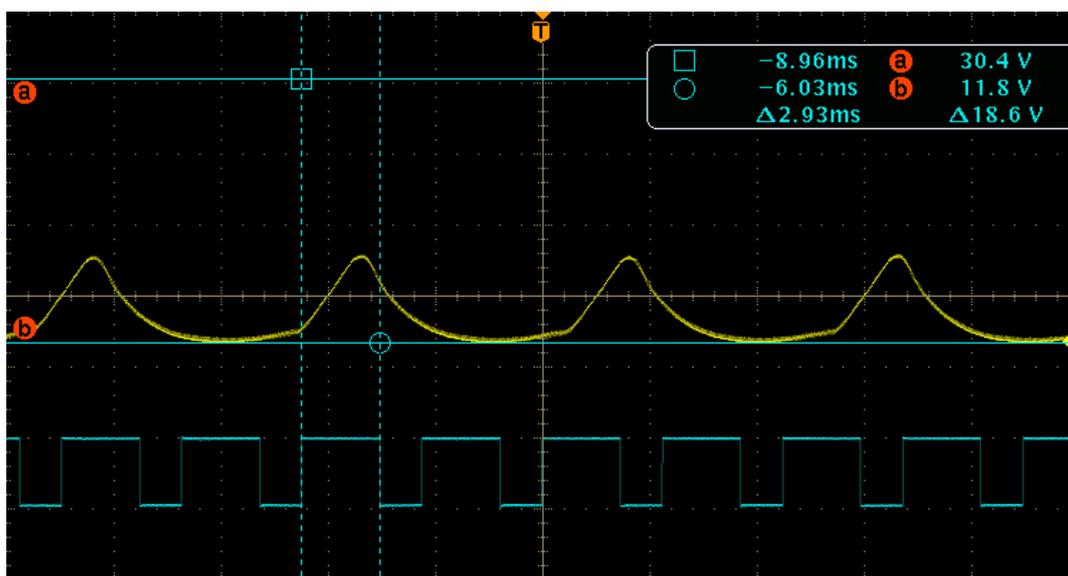


Fig. 4.7 In giallo il segnale dell'alta tensione fornita al magnetron, in azzurro il segnale PWM di controllo della potenza. (1000W)

Come si vede dalla figura 4.6 alla potenza massima la tensione è uguale a -3,64 kV.

Non andremo a caratterizzare i livelli di potenza più bassi del forno a microonde in questo lavoro perché per avere un plasma atmosferico stabile abbiamo bisogno della potenza più alta possibile. Questo è il motivo per cui abbiamo deciso di stimare la massima potenza che si può ottenere dall'inverter. Per fare questo abbiamo costruito il seguente setup: il segnale PWM di controllo è stato fornito da un generatore PWM esterno basato su un microcontroller che riscalda il

filamento del magnetron alla stessa maniera del controller Panasonic e ha la possibilità di aumentare manualmente la larghezza dell'impulso. Il segnale di feedback viene passato dall'inverter al circuito di controllo interno al forno e controllato tramite l'oscilloscopio. Il diagramma a blocchi dell'esperimento è rappresentato in figura 4.7.

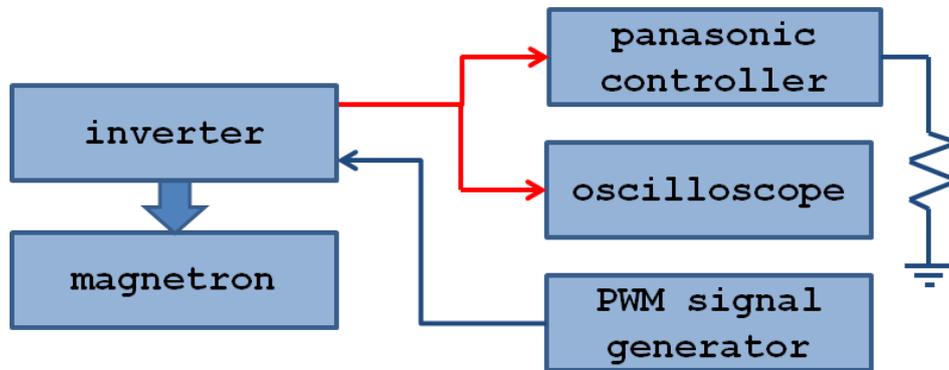


Fig. 4.8 Diagramma a blocchi dello schema dell'esperimento con il generatore PWM esterno.

L'idea è di stimare a quale larghezza di impulso di segnale di controllo, il controller interno all'inverter interrompe il segnale di feedback, il che corrisponde al massimo livello di potenza in uscita che il magnetron può sostenere. dell'esperimento sono rappresentati in figura 4.8. La tensione massima che è stata possibile raggiungere è 3,8 kV che corrisponde a una larghezza di impulso di 3,47 ms e ha un pulse ratio del 77,5 % circa.

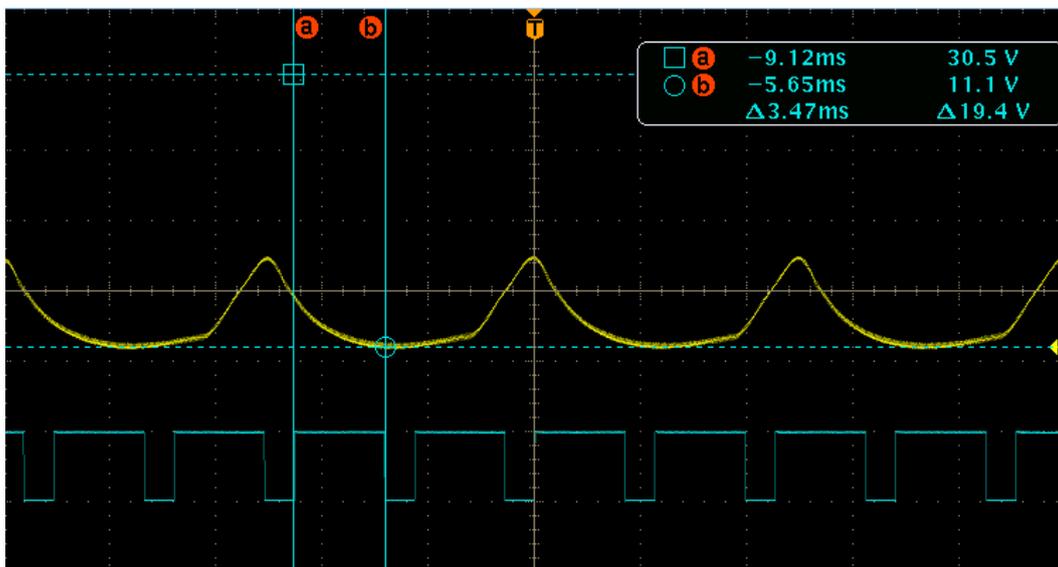
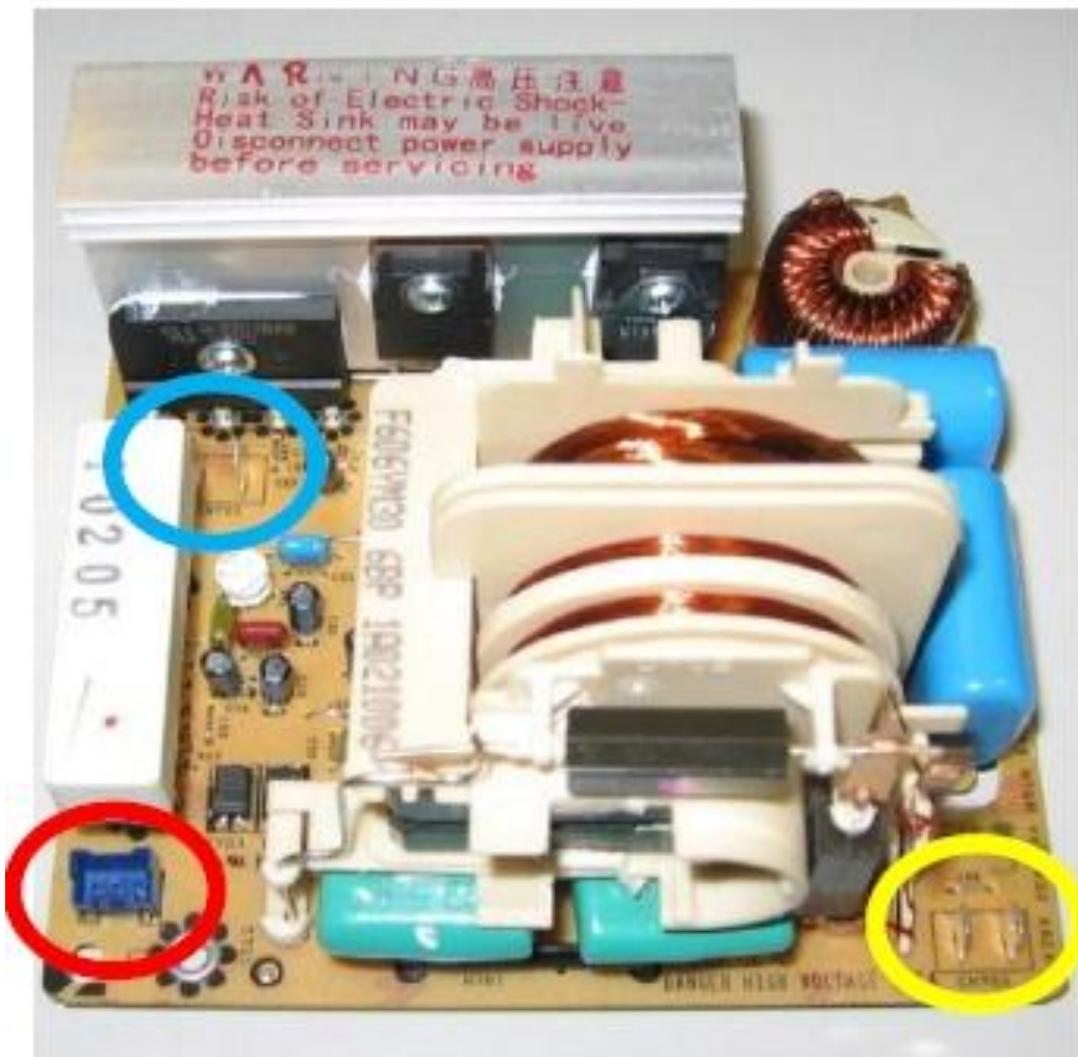


Fig. 4.9 In giallo il segnale di tensione massima raggiungibile dall'inverter.

Il vantaggio enorme di tale circuito risiede nella possibilità di controllarne l'output agendo su un segnale a bassa tensione in ingresso. Infatti la peculiarità del circuito inverter risiede nel fatto che è possibile ottenere da un segnale a bassa tensione DC uno in AC a frequenza variabile, controllabile elettronicamente. Un altro vantaggio grande di tale sistema di controllo della tensione risiede nel fatto che, tramite un programma apposito, è possibile stabilizzare la tensione applicata al magnetron in modo da evitare eventuali cadute di tensione all'atto dell'innesco del plasma, cioè quando l'impedenza di carico varia bruscamente da un valore di cortocircuito a quella equivalente del plasma stesso.

Nella figura 4.9 riportiamo l'immagine del circuito di alimentazione del magnetron del microonde, si possono notare i collegamenti della tensione di rete nel cerchio azzurro, quelli del chip di controllo per le onde quadre entranti, nel cerchio rosso, mentre in quello giallo si notano i pin di collegamento per l'alta tensione. Analizzeremo in seguito i risultati ottenuti con tale approccio e le considerazioni ricavate da tale esperienza.



Guide d'onda Tapered

Il tapering consiste nell'applicare un restringimento di una parte della guida in modo da incrementare la densità di campo elettrico. Sono state effettuate delle simulazioni per trovare la geometria ottimale.

Il problema di come intensificare il campo all'interno della guida non è di facile risoluzione. Il metodo migliore è creato attraverso un restringimento della guida delle dimensioni volute, in modo da ottenere l'intensificazione richiesta. Sorge però il problema delle attenuazioni e delle riflessioni delle microonde dovuto al restringimento stesso infatti variando le dimensioni della guida cambiano le frequenze di risonanza e i modi di propagazione dell'onda.

Quindi sono state effettuate diverse simulazioni di diverse configurazioni di guide d'onda per ottenere delle informazioni di massima su come costruire una guida d'onda reale che esaltasse al massimo il campo elettrico nella regione della torcia al plasma.

Un fattore molto importante, più per lo shift geometrico del punto di massimo del campo che per l'intensità massima, risulta essere la lunghezza del restringimento. Anche in questo caso sono state effettuate diverse simulazioni, al termine delle quali è stato evidente che per ottenere un risultato ottimale si doveva praticare un restringimento di lunghezza pari a $\lambda/2$ dove λ è la lunghezza d'onda delle microonde all'interno di guida.

Tuttavia il fattore che influenza pesantemente l'incremento del campo elettrico di guida tapered è lo spessore finale della guida. Infatti più è piccolo più il campo elettromagnetico viene intensificato nella zona ristretta. Esiste però un limite a questo restringimento infatti non può superare i 5 mm altrimenti si ottiene una totale soppressione delle microonde nella regione tapered.

Simulazioni:

Il primo punto da risolvere prima di effettuare le simulazioni era stabilire, in termini di aumento della potenza in ingresso, una struttura geometrica della guida d'onda con un restringimento a gradini o tramite una parte diagonale. Le forme sono state scelte in base a criteri ben precisi. Lo scopo infatti era osservare i cambiamenti nell'intensità e nella posizione del massimo campo di elettromagnetico al variare della geometria della guida.

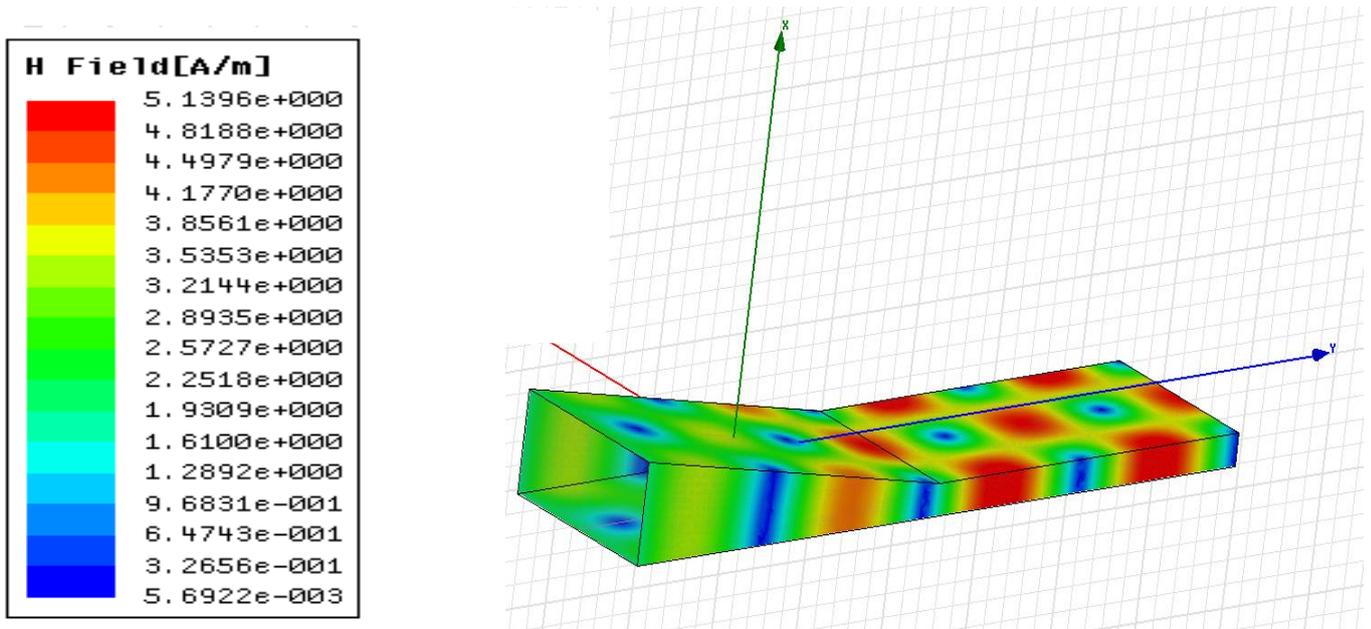


Fig. 4.11 Guida d'onda di lunghezza pari a 2λ con angolo di $14,85^\circ$ e restringimento pari a 13,5 mm i vari colori rappresentano l'intensità del campo magnetico, dal più basso (blu) al più alto (rosso).

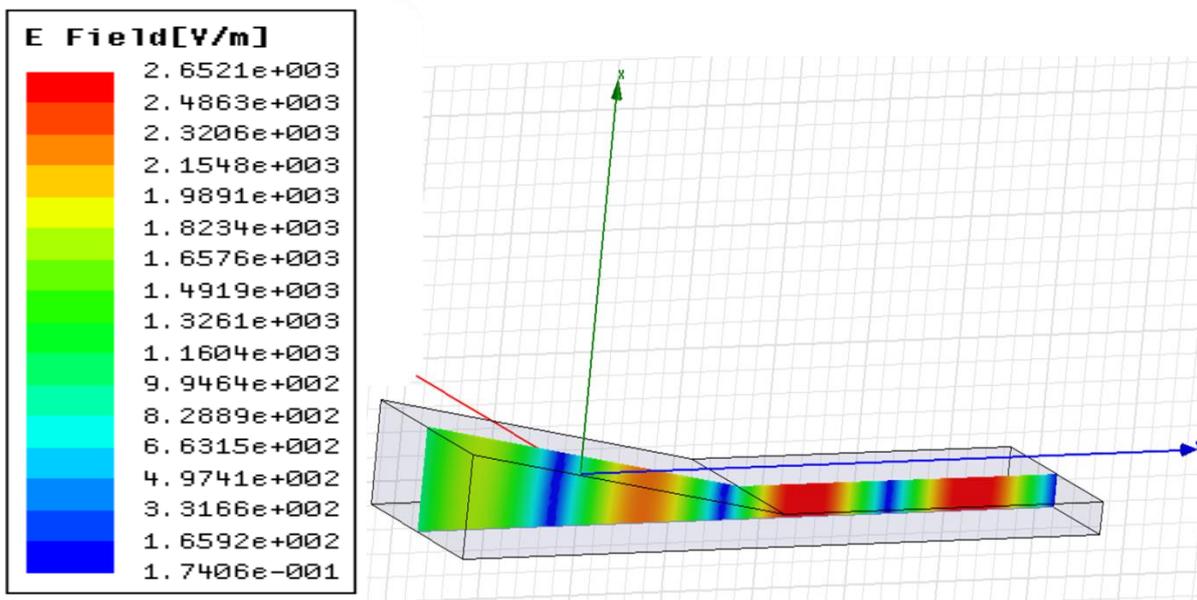


Fig. 4.12 Guida d'onda di lunghezza pari a 2λ con angolo di $14,85^\circ$ e restringimento pari a 13,5 mm (vista laterale) l'intensità del campo elettrico, dal più basso (blu) al più alto (rosso).

In questo caso il massimo campo è posto a metà della zona dritta e quindi giace esattamente a $\lambda/4$.

La successiva guida , figura 4.13 , mantiene inalterati lo spessore finale e l'angolo ma cambia la lunghezza delle parti. Infatti per non cambiare i due parametri, la parte diagonale doveva essere più lunga della parte dritta. Questo si ripercuote sulla posizione del massimo all'interno di guida d'onda. Come infatti si può notare esso giace sulla parte diagonale mentre nella porzione di guida successiva appare solo il minimo. Questa configurazione è stata quindi scartata subito.

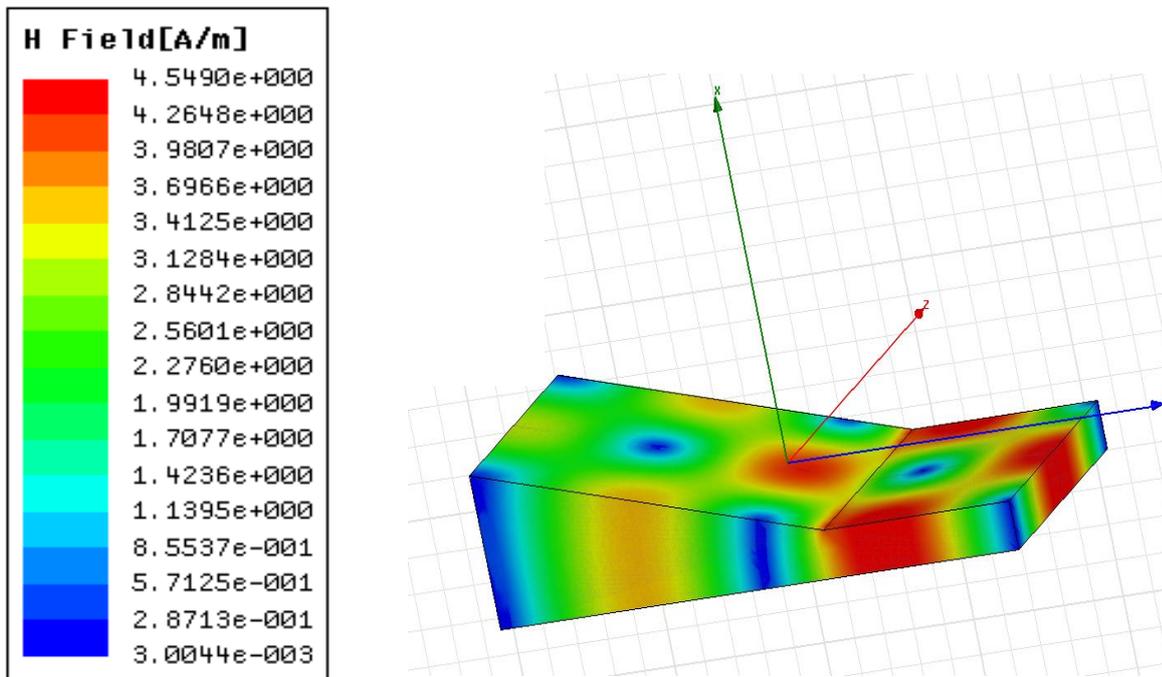


Fig. 4.13 Guida d'onda di lunghezza pari a λ con angolo $14,85^\circ$ e restringimento pari a 13.5 mm.

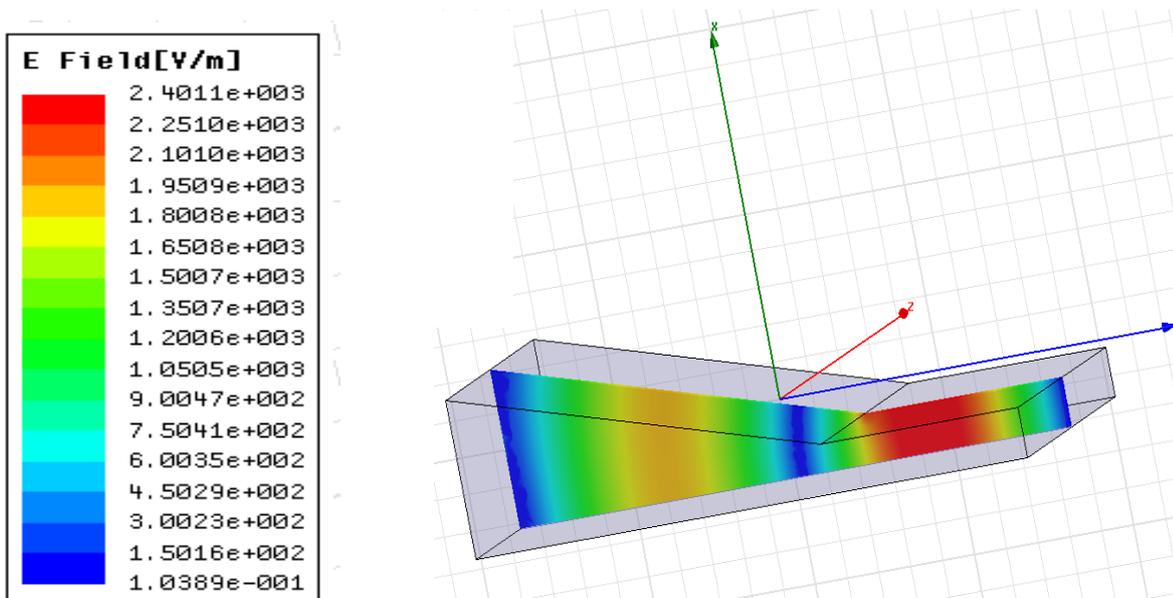


Fig. 4.14 Guida d'onda di lunghezza pari a λ con angolo $14,85^\circ$ e restringimento pari a 13.5 mm.(vista laterale)

Successivamente si è provato a simulare una guida che avesse una doppia parte diagonale, figura 4.15, per studiare meglio come cambiasse la distribuzione spaziale del campo e la sua intensità. La prima parte diagonale ha un angolo pari a $24,84^\circ$ circa mentre la seconda è inclinata di $29,68^\circ$ circa. Mantenendo la lunghezza complessiva pari a λ ed imponendo che la somma delle lunghezze della parte diagonali fosse $\lambda/2$, si è ottenuto uno spessore finale di 6,8 mm circa. Come si può vedere in questa configurazione le intensità sembrano essere aumentate dalla doppia curvatura della guida. Sembra quindi che la porzione delle onde riflesse sia minore rispetto alle situazioni precedenti.

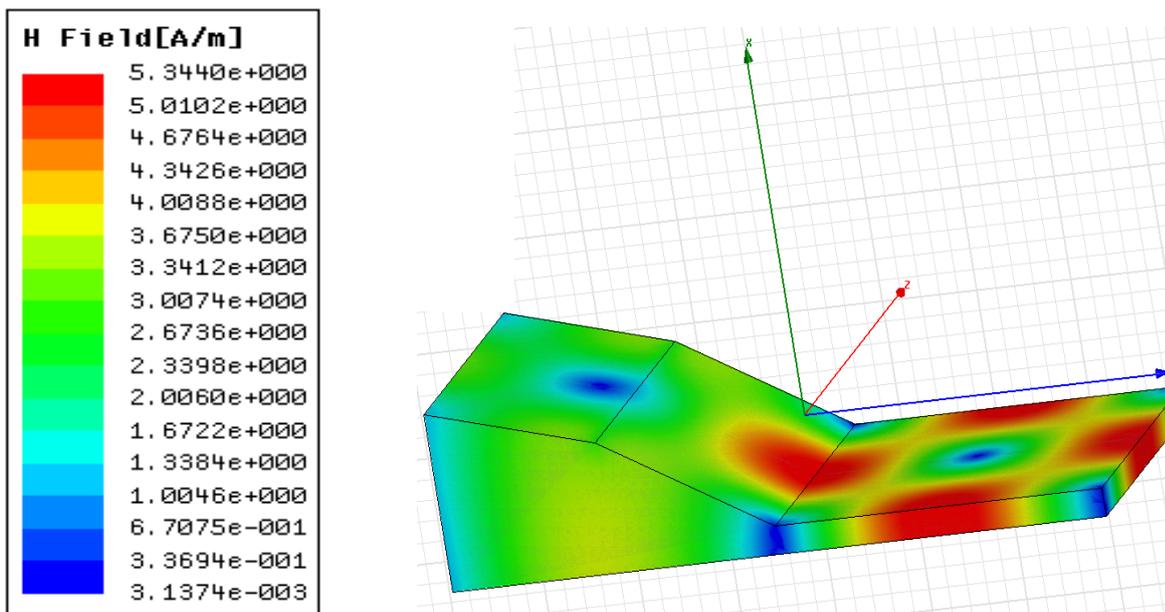


Fig. 4.15 Guida d'onda di lunghezza pari a λ con angolo $24,84^\circ$ e $29,68^\circ$ restringimento pari a 6,83 mm.

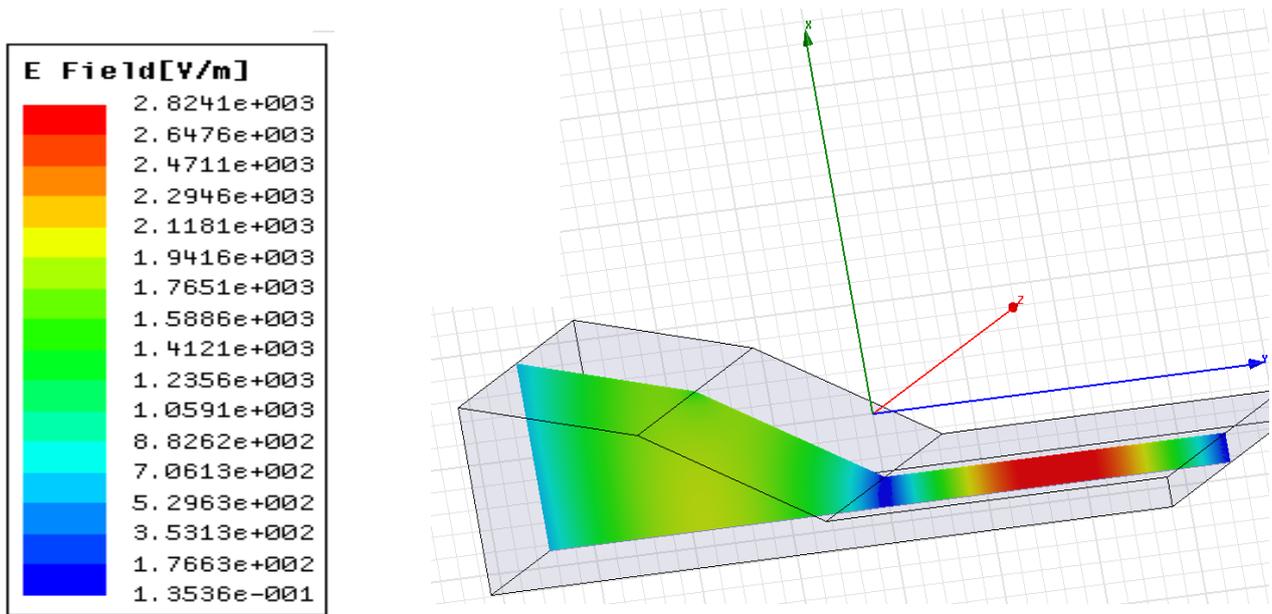


Fig. 4.16 Guida d'onda di lunghezza pari a λ con angolo $24,84^\circ$ e $29,68^\circ$ restringimento pari a 6,83 mm.(vista laterale)

L'ultima delle simulazioni è una guida di lunghezza λ che ha una differenza rispetto alle precedenti per quanto riguarda sia l'angolo che lo spessore finale. Come si può vedere dalla figura 4.17, in questo caso il massimo si presenta prima della parte tapered ed in più il valore assoluto sia del campo elettrico che di quello magnetico, è notevolmente diminuito in intensità rispetto alle simulazioni precedenti. Evidentemente però in questa situazione si instaurano delle perdite parassite che sono superiori ai vantaggi che in linea teorica è possibile ottenere.

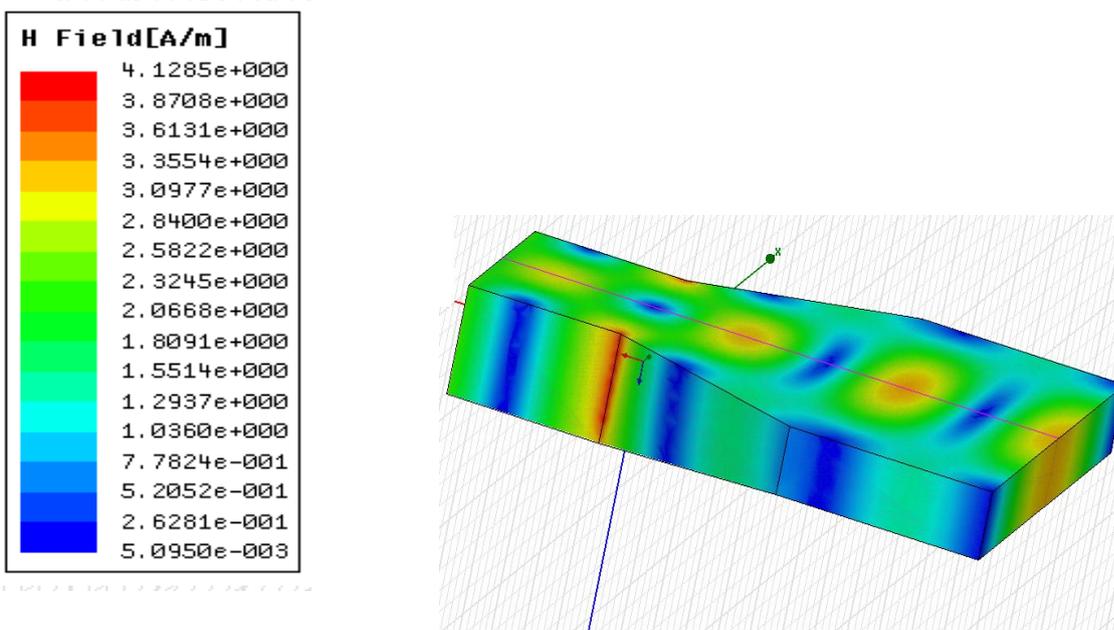


Fig. 4.17 Guida d'onda di lunghezza pari a λ con angolo $10,46^\circ$ con restringimento pari a 6,83 mm sul piano x-z ed un allargamento della parte diagonale sul piano x-y

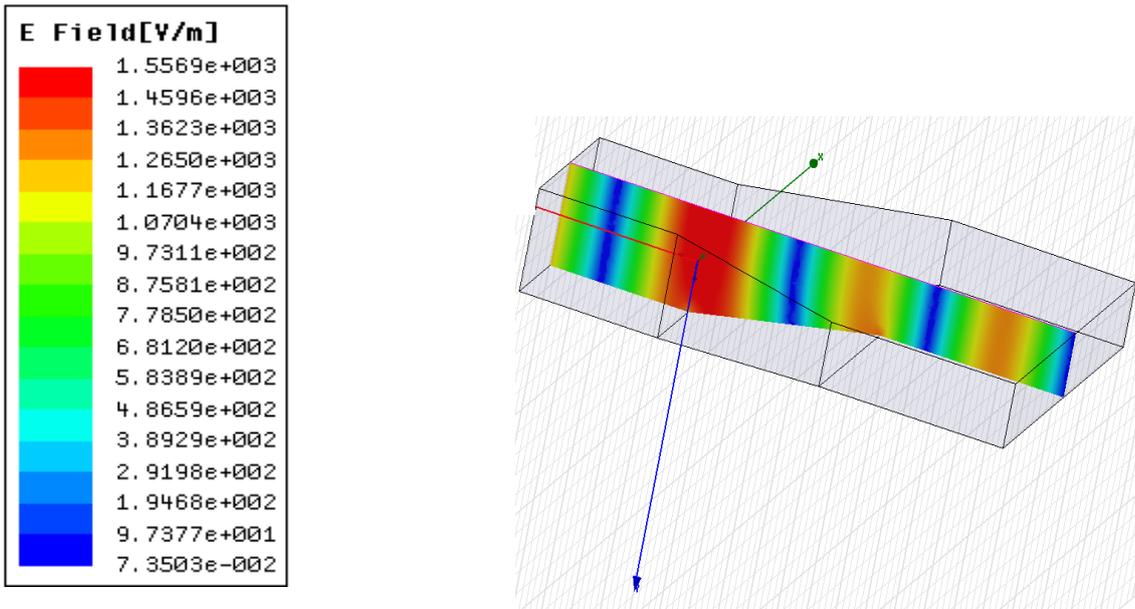


Fig. 4.18 Guida d'onda di lunghezza pari a λ con angolo $10,46^\circ$ con restringimento pari a 6,83 mm sul piano x-z ed un allungamento della parte diagonale sul piano x-y.(vista laterale)

Cut Off

Uno dei problemi principali riscontrati lavorando con le microonde è stato il confinamento dei campi elettromagnetici per preservare i lavoratori da eventuali danni dovuti alla dispersione nell'ambiente di microonde. In un primo momento si è adottata una struttura a gabbia di Faraday; siccome però inizialmente il sistema era molto ingombrante la gabbia era molto voluminosa e di difficile collocazione in ambienti a grandezza limitata. Con l'idea di miniaturizzare il sistema si è dovuto pensare ad un sistema alternativo per limitare la propagazione delle microonde all'esterno della guida d'onda. Inoltre si stava cercando un metodo per poter allungare il campo elettrico al di fuori delle guide, in modo da poter ottenere un allungamento della fiamma.

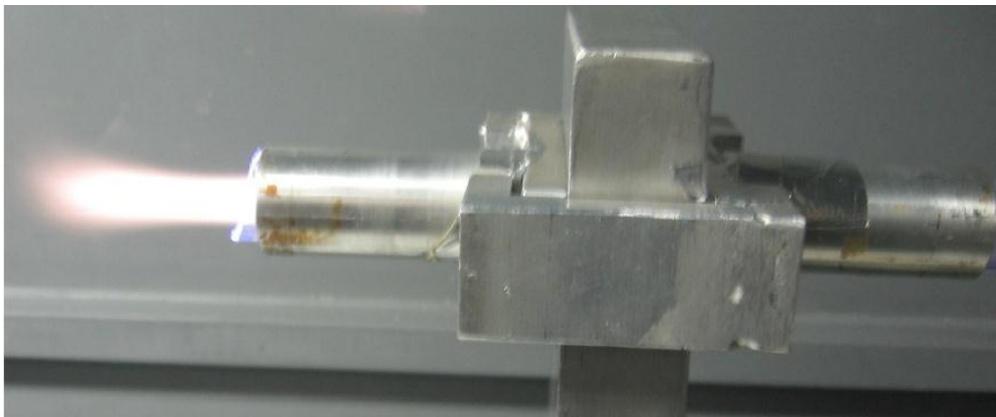


Fig. 4.19 Guida d'onda con i cut off applicati.

Per questo modo si è cominciato a lavorare con prolungamenti metallici alla guida d'onda in corrispondenza dei fori della torcia, due tubi metallici (cut off), nel caso specifico alluminio, come riportato in figura 4.18.

In questo caso sono stati ottenuti entrambi i risultati con un'unica soluzione. Infatti i campi al di fuori della guida, una volta applicati i cut off, sono notevolmente diminuiti, tanto da rendere inutile l'utilizzo di una gabbia di protezione. Inoltre si è avuto così anche l'incremento della lunghezza della fiamma.

CAPITOLO 5

PROTOTIPO DELL'INCENERITORE A TORCIA MW SEMIMETALLICA

In questo capitolo vengono descritte la struttura e il funzionamento di un primo prototipo bruciatore realizzato in laboratorio. Verrà quindi illustrata l'efficacia di trattamento di materiale rappresentativo di rifiuti ospedalieri come: carta, cotone idrofilo e tessuti organici biologici.

5.1 INCENERITORE A TORCIA SINGOLA

La camera di combustione ha una doppia parete nella cui intercapedine viene fatta scorrere dell'acqua di raffreddamento. Il plasma viene generato mediante la torcia semi-metallica a microonde, descritta nel capitolo precedente. I gas che sono stati sperimentati sono l'aria compressa e/o l'azoto.

Il magnetron è alimentato tramite il circuito inverter ottenuto dal forno microonde ed è raffreddato utilizzando una ventola.

Il prototipo è costituito dalle seguenti sezioni:

- La bocca del forno in alto per l'introduzione rifiuti
- La camera della pirolisi al plasma
- Torcia al plasma
- Power supply
- Lo scarico

La schema della fornace della pirolisi al plasma è mostrata in figura seguente.

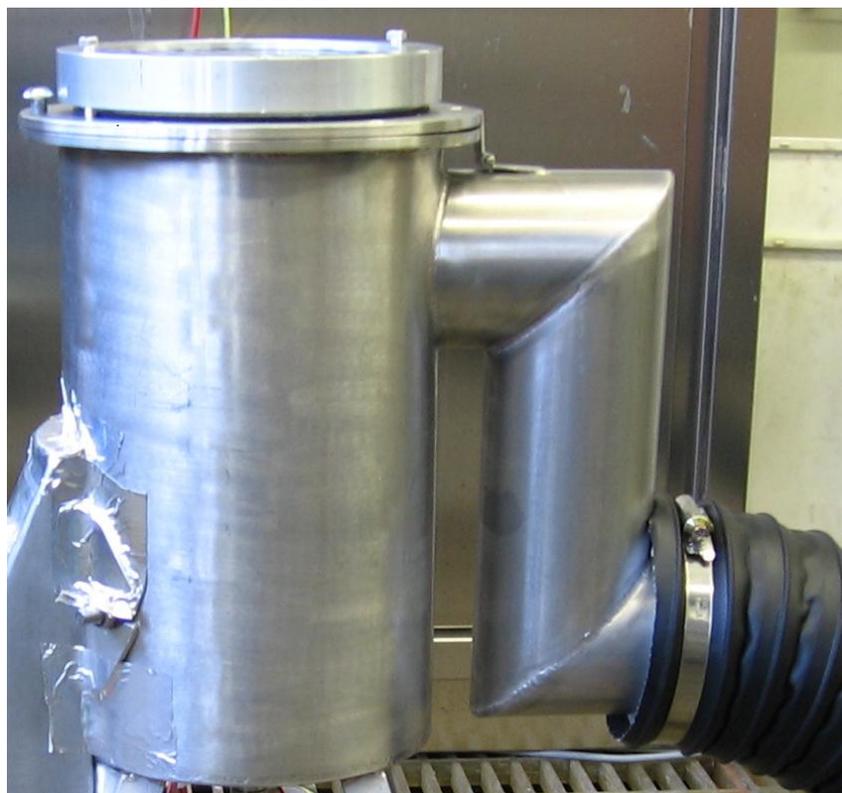


Fig. 5.1 Fornace al plasma



Fig. 5.2 La struttura interna della fornace

Sono state eseguite delle prove con una composizione di rifiuti medicali simulata:

- un cartoncino di una scatola di farmaco
- cotone idrofilo secco
- un tessuto organico con osso (in simulazione di residui umani o animali da amputazione)

Per tutti e tre gli esperimenti abbiamo utilizzato prima l'azoto e poi l'aria come gas di processo.

Si è immediatamente notato che nel caso dell'utilizzo dell'azoto i rifiuti non hanno subito sostanziali modificazioni al contatto con il plasma (Fig.5.3).

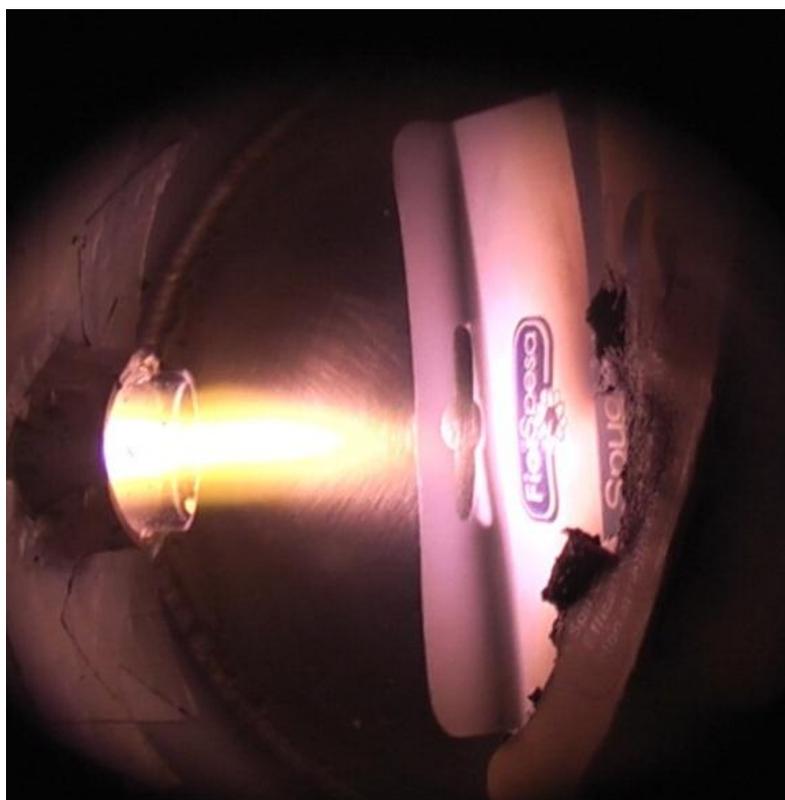


Fig. 5.3 Combustione cartoncino con l'azoto dopo 150 secondi

Tuttavia appena viene inserita un po' d'aria assieme all'azoto, parte la combustione molto velocemente. Mentre l'ossigeno è il comburente necessario per far avvenire la reazione di combustione, l'azoto è un gas inerte che per reagire con le altre sostanze ha bisogno di elevatissima temperatura.

Infatti si nota dalla figura 5.4 come il cartoncino sia totalmente bruciato dopo pochi secondi a contatto con la fiamma di plasma ottenuto con aria.

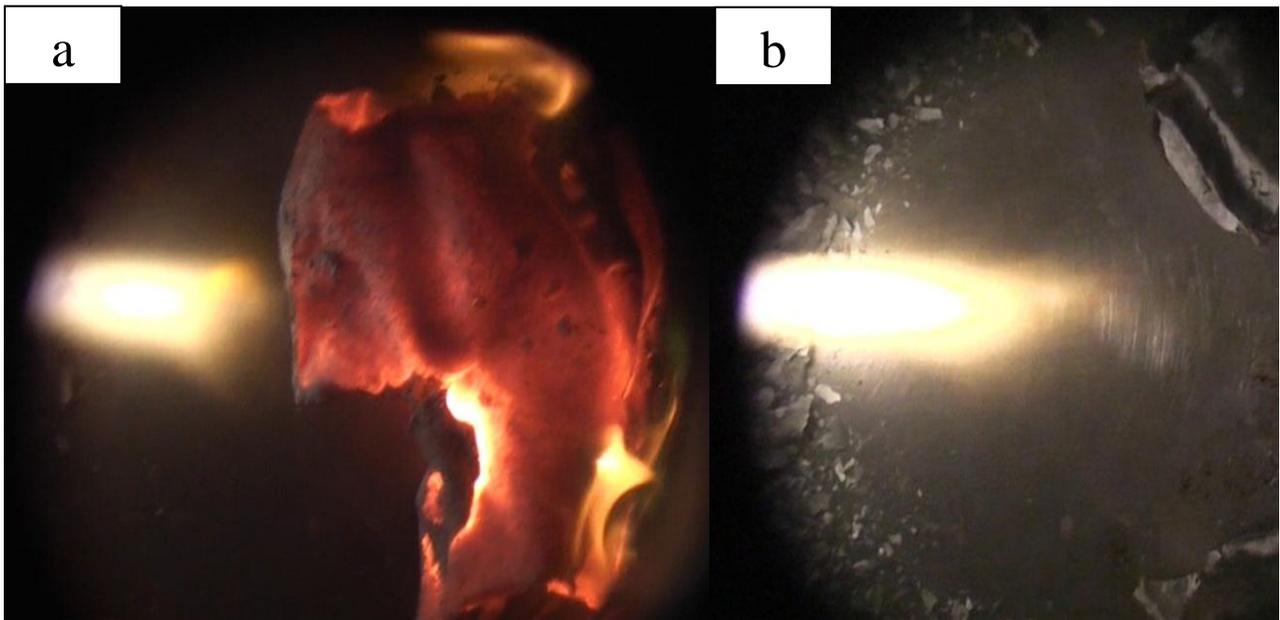


Fig. 5.4 Con l'aria a) a 160 secondi , b) a 200 secondi

Analogamente al cartoncino anche il cotone idrofilo secco è rimasto sostanzialmente inalterato a contatto con il plasma di azoto mentre con il plasma di aria è stato velocemente bruciato senza lasciare residui (Fig.5.5).

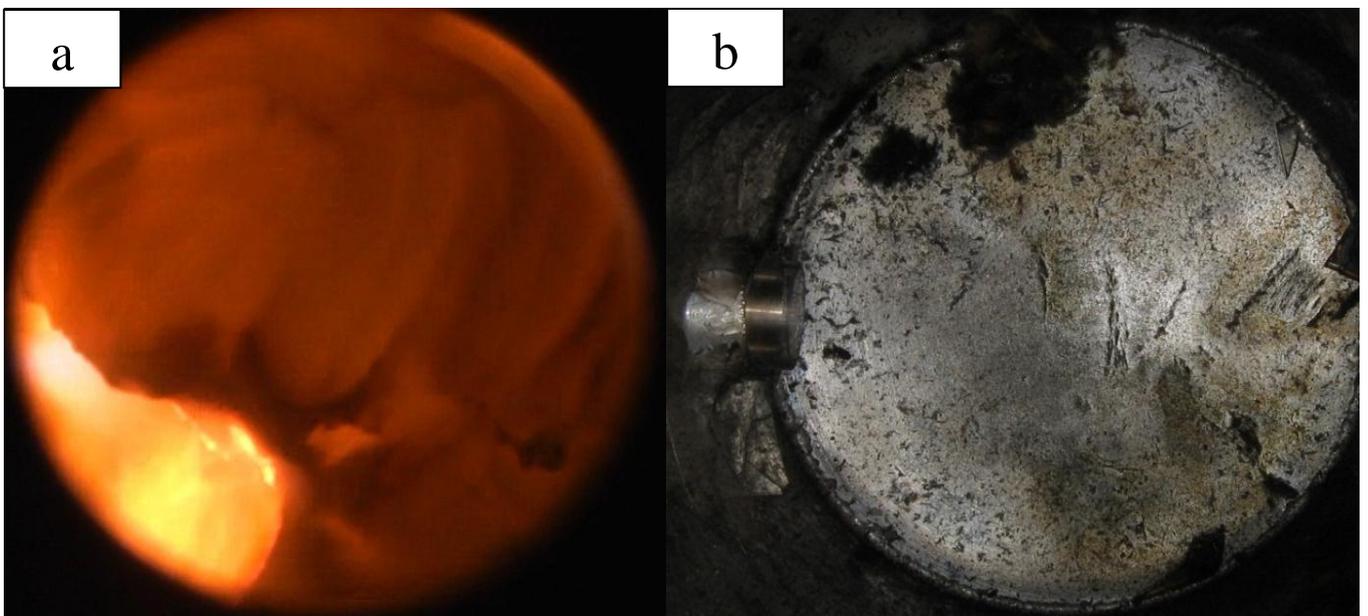
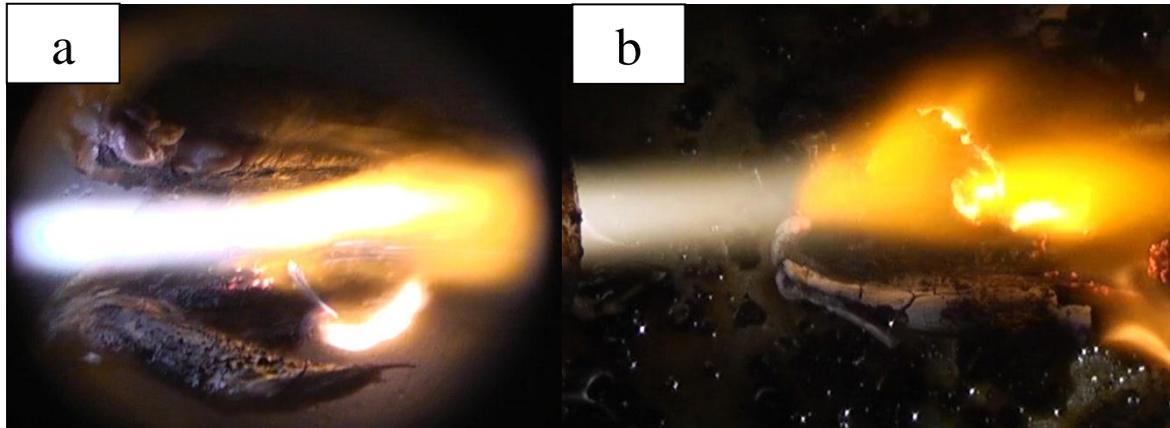


Fig. 5.5 Combustione del cotone con l'aria a) a 60 secondi, b) a 90 secondi

Nell'ultimo caso studiato, il un tessuto organico con osso, si è confermata l'incapacità del plasma di azoto di bruciare il tessuto organico mentre ancora una volta l'utilizzo del plasma con aria ha portato alla distruzione del tessuto compreso l'osso.



*Fig. 5.6 Combustione di tessuto organico (ala di pollo con osso) con l'aria
a) a 5 minuti, b) a 15 minuti*

Tuttavia si nota dalla figura 5.6 a) che solo nella zona davanti alla fiamma del plasma, il componente viene bruciato quasi completamente mentre il resto del tessuto che è lontano dalla fiamma rimane inalterato. Per ottenere la completa distruzione del tessuto di è dovuto intervenire per spostare i residui di fronte al plasma per trattarlo completamente. Durante il processo vengono prodotti gas con alta temperatura e residui solido carboniosi mostrati nella figura 5.7.



Fig. 5.7 Il residuo solido carbonioso

L'esperimento è riuscito. Tuttavia durante la combustione sono stati riscontrati alcuni problemi:

- un elevato riscaldamento dello scarico a causa dell'alta temperatura dei fumi
- rottura del vetro (pyrex) della bocca del forno a causa della diversa dilatazione termica rispetto al metallo
- dispersione delle microonde dalla camera di combustione
- poca efficienza del processo di pirolisi probabilmente dovuta a una temperatura bassa con solo una torcia.

Con una semplice aggiunta di elemento radiante nello scarico e con un opportuno dimensionamento del coperchio che ospita il vetro, parte di questi problemi sono di facile risoluzione.

CAPITOLO 6

SVILUPPI FUTURI

In questo capitolo verranno descritte le linee guida per i possibili sviluppi futuri al fine di aumentare l'efficienza nel trattamento dei rifiuti, nella purificazione dei gas da agenti inquinanti e nel recupero dell'energia derivante dalla combustione dei syn-gas.

Riguardo ai problemi descritti nel capitolo precedente, in seguito vengono riportati alcuni suggerimenti e soluzioni per il miglioramento del sistema:

- ampliamento dell'impianto di raffreddamento allo scarico per condensare i fumi residui
- aggiunta di altre torce per aumentare la temperatura e l'efficienza della pirolisi
- inserimento di una torcia secondaria nel condotto di scarico per il trattamento dei gas prodotti dalla combustione
- sviluppo di filtri per l'abbattimento degli inquinanti
- analisi dei gas di scarico prodotti

6.1 INCENERITORE MULTITORCIA

In futuro si prevede l'aggiunta di altre due torce per aumentare la temperatura e l'efficienza della pirolisi.

Infatti per distruggere un rifiuto organico e trasformarlo in molecole semplici con il processo di pirolisi al plasma (in assenza o in bassa percentuale di ossigeno) si richiedono altissime temperature.

6.2 TORCIA SECONDARIA PER ULTIMA DISTRUZIONE DEI FUMI

Nel futuro verrà implementato un secondo stadio con una quarta torcia al plasma per la combustione dei gas generati nel processo di pirolisi dei rifiuti. In questo processo si ottengono principalmente CO₂ e H₂O ad alta temperatura, per questo occorre che i gas caldi passino attraverso un scrubber (quanching sistem) per ridurre la temperatura a circa 70°C.

6.3 CONCLUSIONI

La tecnologia di pirolisi al plasma, per distruggere la grande varietà di rifiuti medicali contaminati e non, in modo sicuro e con pressoché inesistenti emissioni inquinanti nell'ambiente si è dimostrata in letteratura assolutamente promettente per il futuro. Infatti attualmente è in forte via di sviluppo soprattutto nei paesi asiatici.

Uno degli aspetti più critici nella combustione classica dei rifiuti negli inceneritori è la produzione in quantità elevate di componenti volatili tossici come diossine e furani prodotti dalla combustione di componenti plastici clorurati. Dato che i rifiuti ospedalieri, come del resto i rifiuti solidi urbani, contengono molti componenti plastici clorurati e dal momento che la pirolisi al plasma ottimale si traduce in una limitatissima emissione di diossine e furani, va da se che il trattamento di tali rifiuti con plasmi atmosferici può rappresentare una valida alternativa rispetto allo smaltimento in un inceneritore.

Un ulteriore vantaggio è rappresentato dal fatto che nel trattamento al plasma della parte organica del rifiuto si ottiene la generazione di gas combustibili (syn-gas), i quali possono essere efficacemente convertiti in energia termica e poi elettrica attraverso la loro combustione realizzando così un utile recupero di energia nel processo dalla distruzione dei rifiuti.

Negli esperimenti pensati, realizzati e descritti in questa tesi abbiamo ottenuto un primo successo dato dalla combustione di cartoncino, cotone idrofilo e tessuto organico in simulazione di un rifiuto medicale tipo, all'interno di un prototipo di bruciatore alimentato con un plasma sostenuto da microonde. Si è subito notata l'efficacia del bruciatore utilizzando come gas di processo la semplice aria. Tuttavia ci si è resi conto che è necessario potenziare ulteriormente il prototipo per rendere il processo di combustione ancor più efficace. In particolare con il nostro prototipo si sono capiti i punti su cui intervenire:

- il rifiuto è trattato efficacemente se è ancor più direttamente a contatto con il plasma
- la reazione di pirolisi del rifiuto sarà efficace se si riuscirà ad aumentare la temperatura del plasma all'interno del sistema.

Quindi gli sviluppi futuri del bruciatore porteranno all'aumento della sua efficienza in termini di trattamento rapido completo del rifiuto, produzione di syn-gas e recupero dell'energia attraverso:

- l'aggiunta di altre torce (4-6 torce) per aumentare la temperatura interna del plasma nel bruciatore
- lo studio delle miscele ideali di gas di processo aria-azoto, supportato da un sistema di analisi dei fumi allo scarico

- l'inserimento di una ulteriore torcia al plasma nello scarico per decomporre eventuali coprodotti residui indesiderati e per rendere più efficace la produzione di syn-gas (CO e H₂) per il recupero dell'energia
- l'inserimento a valle di sistema (nello scarico) di una camera di combustione dei sym-gas per il recupero dell'energia attraverso uno scambiatore termico
- l'inserimento a valle della seconda camera di combustione di un sistema per il raffreddamento dei gas di scarico e per la riduzione di eventuali inquinanti prodotti come HCl o HF.

Nel tentativo di individuare in ordine di priorità il primo intervento per un successivo lavoro di tesi sull'argomento, il processo dei fumi tramite la stessa torcia al plasma atmosferico è senz'altro il punto più importante. A complemento l'acquisizione di un analizzatore di fumi sarà una delle prime operazioni di implementazione del lavoro, qualora eventuali sponsor del settore interverranno.

- [1] (D. Lgs. 152/06 art. 184, c.1)
- [2] europa.eu>...>Ambiente>Gestione dei rifiuti
- [3] Tata A, Beone F. Hospital-waste sterilisation: a technical and economic comparison between radiation and microwaves treatments. *Radiat Phys Chem* 1995;46(4-6):1153–7.
- [4] Mario Tozzi, *L'Italia a secco: la fine del petrolio e la nuova era dell'energia naturale*, Rizzoli, 2006.
- [5] Dioxin, 2005, Wikipedia in lingua inglese, Come funziona un inceneritore?, 2005, Greenpeace Italia
- [6] Fatto menzionato nello studio sul futuro inceneritore torinese del Gerbido, p. 40.
- [7] R.R. Guddeti, R. Knight and E.D. Grossmann, Depolymerization of polypropylene in an induction-coupled plasma (ICP) reactor, *Ind Eng Chem Res* **39** (2000), pp. 1171–1176.
- [8] L. Tang, H. Huang, Z.L. Zhao, C.Z. Wu and Y. Chen, Pyrolysis of polypropylene in a nitrogen plasma reactor, *Ind Eng Chem Res* **42** (2003) (6), pp. 1145–1150.
- [9] I.B. Georgiev and B.I. Mihailov, Some general conclusions from the results of studies on solid fuel steam plasma gasification, *Fuel* **71** (1992) (8), pp. 895–901
- [10] M.I. Boulos, P. Fauchais, E. Pfender, *Thermal Plasmas: Fundamental And Applications*. Volume I, Plenum Press, New York, ISBN: 0-306- 44607-3, 1994, 452 pp.
- [11] P. Fauchais, *Plasmas thermiques: production et applications*. Techniques de l'Inge'nieur, Traite' Ge'nie e'lectrique. D2 820, pp. 1 – 25.
- [12] Y. Kabouzi, M.D. Calzada, M. Moisan, K.C. Tran, C. Trassy, Radial contraction of microwave-sustained columns at atmospheric pressure, *J. Appl. Phys.* 91 (3) (2002) 1008–1019.
- [13] M. Moisan, G. Sauve, Z. Zakrzewski, J. Hubert, An atmospheric pressure waveguide-fed microwave plasma torch: the TIA design, *Plasma Sources Sci. Technol.* 3 (1994) 584– 592.
- [14] P Leprince, E Bloyet, J Marec. Plasma torches. FR 82 (156), 82. 09/16/1982. (Ajout au brevet Plasma generator. FR 80 (080), 73. 04/10/1980).
- [15] M. Jasinski, P. Szuzucki, M. Dors, J. Mizeraczyk, M. Lubanski, Z. Zakrzewski, Decomposition of fluorohydrocarbons in atmospheric pressure flowing air using coaxial-line-based microwave torch plasma, *Czechoslov. J. Phys.* 50 (3) (2000) 285– 288.
- [16] Y. Okamoto, M. Yasuda, S. Murayama, High-power microwave-induced plasma source for trace element analysis, *Jpn. J. Appl. Phys.* 29 (4) (1990) 670–672.
- [17] M. Suzuki, M. Komatsubara, M. Umebayashi, H. Akatsuka, Conversion of chloride waste into oxide by microwave heated oxygen plasma, *J. Nucl. Sci. Technol.* 34 (12) (1997) 1159– 1170.
- [18] M. Moisan, Z. Zakrzewski, J.C. Rostaing, Waveguide-based single and multiple nozzle plasma torches: the TIAGO concept, *Plasma Sources Sci. Technol.* 10 (2001) 387–394.
- [19] M. Jasinski, J. Mizeraczyk, Z. Zakrzewski, T. Ohkubo, J.-S. Chang, CFC-11 destruction by microwave torch generated atmospheric-pressure nitrogen discharge, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 35 (2002) 2274– 2280.
- [20] C.F. Pau, J.D. Yan, S.R. Wylie, The Influence of the Gas Flow Rate and Microwave Source Power on the Behaviour of a Microwave Generated Argon Plasma Jet, XIII International Conference on Gas Discharges and Their Applications, September 3 – 8 2000, Glasgow, UK2000, pp. 585–588.

- [21] S.R. Wylie, A.I. Al-Shamma'a, J. Lucas, Design and construction of a waveguide-based Microwave Plasma Jet, XIII International Conference on Gas Discharges and their Applications, September 3 – 8 2000, Glasgow, UK, 2000, pp. 593–596.
- [22] P.P. Woskov, K. Hadidi, Large electrodeless plasmas at atmospheric pressure sustained by a microwave waveguide, *IEEE Trans. Plasma Sci.* 30 (1) (2002) 156– 157.
- [23] E.A.H. Timmermans, J. Jonkers, I.A.J. Thomas, A. Rodero, M.C. Quintero, A. Sola, A. Gamero, J.A.M. Van Der Mullen, The behavior of molecules in microwave-induced plasmas studied by optical emission spectroscopy: 1. Plasmas at atmospheric pressure, *Spectrochim. Acta Part B* 53 (11) (1998) 1553–1566.
- [24] F. Liang, D. Zhang, Y. Lei, H. Zhang, Q. Jin, Determination of selected noble metals by MPT-AES using a pneumatic nebulizer, *Microchem. J.* 52 (1995) 181– 187.
- [25] IPLAS. Plasma sources: CYRANNUSR I. [on line]. Available on: <http://www.cyrannus.com/pages/welcome.html> (consulted on 09.09.03).