



Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie,
l'Energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Sviluppo di dispositivi per la rimozione di tar e particolato contenuti nel syngas proveniente da impianti di gassificazione

P. De Filippis, M. Scarsella, B. De Caprariis, N. Verdone



SVILUPPO DI DISPOSITIVI PER LA RIMOZIONE DI TAR E PARTICOLATO CONTENUTI NEL SYNGAS PROVENIENTE DA IMPIANTI DI GASSIFICAZIONE

P. De Filippis, M. Scarsella, B. De Caprariis, N. Verdone (Università di Roma "La Sapienza", Dipartimento di Ingegneria Chimica Materiali Ambiente)

Settembre 2011

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Area: Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente

Progetto: Studi sull'utilizzo pulito dei combustibili fossili e cattura e sequestro della CO₂

Responsabile Progetto: Antonio Calabrò, ENEA



DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CHIMICA MATERIALI AMBIENTE

ACCORDO DI PROGRAMMA

MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO - ENEA

**ATTIVITÀ DI RICERCA E SVILUPPO DI INTERESSE GENERALE
PER IL SISTEMA ELETTRICO NAZIONALE**

PIANO ANNUALE DI REALIZZAZIONE TERZA ANNUALITÀ

Progetto 2.2. “Studi sull’utilizzo pulito di combustibili fossili, cattura e sequestro della CO₂”

RAPPORTO TECNICO

*Sviluppo di dispositivi per la rimozione di tar e particolato contenuti nel syngas
proveniente da impianti di gassificazione*

Unità emittente: Dipartimento di Ingegneria Chimica Materiali Ambiente

Classificazione: a cura di ENEA

Distribuzione: USO PUBBLICO

Data: 30 Settembre 2011

Elaborato: Paolo De Filippis, Marco Scarsella, Benedetta De Caprariis, Nicola Verdone

Tema di ricerca “*Tecnologie innovative che consentono la riduzione dei costi di investimento nelle centrali a polverino di carbone*”, Progetto 2.2. “*Studi sull’utilizzo pulito di combustibili fossili, cattura e sequestro della CO₂*”

Rapporto Tecnico “*Sviluppo di dispositivi per la rimozione di tar e particolato contenuti nel syngas proveniente da impianti di gassificazione*”

INDICE

1. INTRODUZIONE.....	3
2. ATTIVITÀ SVOLTA E RISULTATI OTTENUTI	4
3. PRINCIPALI SOGGETTI COINVOLTI	39
4. MODIFICHE E VARIANTI AL PROGETTO	40
5. DIFFUSIONE DEI RISULTATI	41
6. BIBLIOGRAFIA	42

Tema di ricerca *“Tecnologie innovative che consentono la riduzione dei costi di investimento nelle centrali a polverino di carbone”*, Progetto 2.2. *“Studi sull’utilizzo pulito di combustibili fossili, cattura e sequestro della CO₂”*

Rapporto Tecnico *“Sviluppo di dispositivi per la rimozione di tar e particolato contenuti nel syngas proveniente da impianti di gassificazione”*

1. INTRODUZIONE

Oggetto della presente relazione è la prosecuzione della attività inerenti lo studio e la realizzazione su scala da laboratorio di un dispositivo di tipo rigenerativo per il trattamento del tar e del particolato contenuto nel syngas. Il dispositivo funzionante ad alta temperatura, già descritto in una precedente relazione, svolge la triplice funzione di filtro per il particolato, di gassificazione delle frazioni carboniose solide e di reforming della frazione liquida vaporizzabile. Questo sistema è stato testato su un impianto di gassificazione in scala di laboratorio di tipo updraft (capacità 500g/h), anch'esso già descritto in una precedente relazione e modificato allo scopo. La valutazione dell'efficienza del sistema nella configurazione scelta è stata eseguita variando sia le condizioni di esercizio (temperatura e portata gas), sia l'entità della frazione condensabile presente a monte del dispositivo. Non disponendo di carboni a differente contenuto di sostanze volatili, allo scopo di modulare la quantità di frazione condensabile da inviare al dispositivo, sono state utilizzate due differenti tipologie di carbone, una biomassa lignocellulosica e una serie di miscele carbone-biomassa.

Oltre questa attività di tipo sperimentale è stata anche svolta una approfondita ed esauriente analisi critica della letteratura allo scopo di valutare le potenzialità realizzative di un dispositivo di rimozione e conversione del tar basato sulla tecnologia del plasma freddo generato da un reattore corona pulsato. Tale tipologia di reattori sembra, infatti, rappresentare una valida alternativa ai sistemi più propriamente chimici normalmente proposti. In questo ambito, attraverso una analisi delle differenti sezioni di cui è costituito un generatore di plasma freddo a scarica corona (dalla produzione dell'alta tensione alla generazione dell'impulso) sono state messe in evidenza le criticità non ancora completamente risolte. Il lavoro svolto ha reso possibile l'elaborazione di uno schema di reattore corona pulsato utilizzabile per impianti in scala da laboratorio, che viene proposto.

Tema di ricerca *“Tecnologie innovative che consentono la riduzione dei costi di investimento nelle centrali a polverino di carbone”*, Progetto 2.2. *“Studi sull’utilizzo pulito di combustibili fossili, cattura e sequestro della CO₂”*

Rapporto Tecnico *“Sviluppo di dispositivi per la rimozione di tar e particolato contenuti nel syngas proveniente da impianti di gassificazione”*

2. ATTIVITÀ SVOLTA E RISULTATI OTTENUTI

2.1. Studio e realizzazione su scala da laboratorio di un dispositivo di tipo rigenerativo per il trattamento del tar e del particolato contenuto nel syngas

La produzione di syngas tipicamente dà luogo a un gas grezzo contenente impurezze sia organiche che inorganiche. Le impurezze organiche sono generalmente costituite da un ampio numero di sostanze, variabili qualitativamente e quantitativamente in funzione della carica alimentata al gassificatore e che vanno dagli idrocarburi leggeri fino a strutture ad alto peso molecolare di idrocarburi policiclici aromatici. In tale ambito si considerano come contaminanti principali e “critici” il tar e il particolato.

Il tar, costituito da composti organici condensabili presenti nei gas e prodotti durante la gassificazione, è un contaminante che deve essere rimosso dal syngas grezzo per permetterne l’utilizzazione come alimentazione per specifici processi dell’industria chimica (produzione di chemicals C₁, Fischer-Tropsch, oxo-sintesi, ecc.) o per la sua conversione in energia in turbine o in motori a combustione interna.

Il particolato può causare grossi problemi durante l’utilizzo del syngas come combustibile (erosione delle turbine, ostruzione degli iniettori, ecc). Di conseguenza, ad esempio, per un suo utilizzo in motori a combustione interna si ritiene che la quantità di particolato ammissibile nel syngas sia pari a 50 mg/m³.

É quindi necessario poter disporre di efficienti ed economici sistemi che permettano di abbattere gli ingenti quantitativi di tar e particolato presenti nel syngas prodotto da determinate alimentazioni. Tipicamente è l’alto contenuto di sostanze volatili nelle alimentazioni che determina la presenza di grosse quantità di tar e particolato nel syngas, come nel caso di carboni sub-bituminosi o delle biomasse.

In questa prima parte della relazione verranno illustrati i principali risultati dell’attività sperimentale, prosecuzione delle attività svolte lo scorso anno, e inerenti la realizzazione su scala da laboratorio di un dispositivo di tipo rigenerativo per il trattamento del tar e del particolato contenuto nel syngas.

Alla luce dei risultati ottenuti sui due dispositivi descritti e valutati in una precedente relazione (reforming e filtro antiparticolato, Tabelle 5 e 6 della relazione precedente [1]), ci si è orientati

Tema di ricerca “*Tecnologie innovative che consentono la riduzione dei costi di investimento nelle centrali a polverino di carbone*”, Progetto 2.2. “*Studi sull’utilizzo pulito di combustibili fossili, cattura e sequestro della CO₂*”

Rapporto Tecnico “*Sviluppo di dispositivi per la rimozione di tar e particolato contenuti nel syngas proveniente da impianti di gassificazione*”

verso la configurazione dell’impianto di gassificazione nella quale il secondo stadio, oltre a svolgere la funzione di reformer sulle frazioni condensabili, garantisce il completamento della gassificazione del particolato trascinato. Con tale configurazione è possibile ottenere un syngas con un ridotto contenuto di frazioni condensabili e di particolato.

Modifiche dell’impianto

Una volta scelta la tipologia del secondo stadio, alla luce delle prove sperimentali precedentemente eseguite [1] e basandosi sulle osservazioni riguardanti le perdite di carico del sistema, si è proceduto alle indispensabili modifiche del secondo stadio: dalla configurazione precedentemente adottata [1], che prevedeva un letto di circa 60 cm di altezza, costituito da uno strato di schiuma di carburo di silicio (5 cm), quindi uno di allumina (50 cm) e infine un ultimo strato ancora di schiuma di carburo di silicio (5cm), in cui il carburo di silicio svolgeva esclusivamente una funzione di supporto al letto di allumina, si è passati a una configurazione con un letto di altezza inferiore (30 cm) costituito da 15 cm iniziali di schiuma in carburo di silicio (con funzione di ulteriore riscaldamento degli effluenti provenienti dal primo stadio), 10 cm di materiale di riempimento reattivo o inerte e 5 cm di schiuma in carburo di silicio (con funzione di supporto). La nuova configurazione ha permesso di mantenere le perdite di carico entro un valore di 5 cm H₂O, accettabili per applicazioni su scala maggiore.

Ulteriori modifiche hanno riguardato i sistemi di campionamento dei gas e di raffreddamento e separazione dei prodotti all’uscita dell’impianto. Sono stati, infatti, previsti due punti di campionamento, uno a monte e uno a valle del secondo stadio, provvisti di sistemi di filtrazione del particolato, raffreddamento e condensazione del tar e dell’acqua e successivo essiccamento.

Tema di ricerca “*Tecnologie innovative che consentono la riduzione dei costi di investimento nelle centrali a polverino di carbone*”, Progetto 2.2. “*Studi sull’utilizzo pulito di combustibili fossili, cattura e sequestro della CO₂*”

Rapporto Tecnico “*Sviluppo di dispositivi per la rimozione di tar e particolato contenuti nel syngas proveniente da impianti di gassificazione*”



Fig. 1: Particolare del secondo stadio con i sistemi di prelievo campioni.

I gas spillati e così trattati sono quindi inviati agli analizzatori on-line per la determinazione di CO, CO₂ e CH₄, mentre la determinazione dell'idrogeno è stata effettuata off-line, mediante gascromatografia. I prodotti uscenti dall'impianto subiscono prima un raffreddamento ad aria, quindi la separazione dell'acqua e della frazione organica condensabile eventualmente presente. Il gas uscente dal separatore è inviato a un demister allo scopo di trattenere gli eventuali trascinalenti, quindi in un contatore volumetrico e infine in torcia.

Sull'impianto così modificato si è proceduto a una serie di prove allo scopo di valutare la funzionalità del dispositivo attraverso misure quantitative di prestazione in differenti condizioni di esercizio, di temperatura e carico di inquinante da abbattere. È stata inoltre valutata la vita utile del dispositivo.

Materiali

La sperimentazione è stata eseguita utilizzando come alimentazione, oltre alle due differenti tipologie di carbone (Sulcis ad alto tenore di volatili e carbone antracitico di origine russa), anche delle miscele costituite da carbone e biomassa. Le principali caratteristiche chimico-fisiche dei carboni e della biomassa utilizzata sono riportate in Tabella 1

Tema di ricerca “*Tecnologie innovative che consentono la riduzione dei costi di investimento nelle centrali a polverino di carbone*”, Progetto 2.2. “*Studi sull’utilizzo pulito di combustibili fossili, cattura e sequestro della CO₂*”

Rapporto Tecnico “*Sviluppo di dispositivi per la rimozione di tar e particolato contenuti nel syngas proveniente da impianti di gassificazione*”

Tabella 1: Caratteristiche chimico-fisiche delle alimentazioni utilizzate nella sperimentazione

	Sulcis	Russo	Biomassa
Potere calorifico (as received)	23.37	27.30	19.8
Analisi immediata (as received)			
Umidità	5.93	4.32	4.3
Ceneri	13.19	7.33	1.8
Sostanze volatili	42.01	9.75	74.6
Carbonio fisso	38.87	78.60	19.3
Analisi elementare (daf)			
C	74.7	86.6	51.8
H	5.5	4.1	6.1
N	1.8	0.7	1.0
S	8.3	0.4	0.0
O	9.5	8.2	41.1
Cl	0.2	0.03	0.01

Sulcis: Fonte Enea

I riempimenti utilizzati per il secondo stadio sono stati:

1. Sfere di ceramica a bassa area superficiale;
2. Cilindretti di allumina ad elevata area superficiale;
3. Cilindretti di allumina ad elevata area superficiale impregnata con il 2 % di KOH.

Le caratteristiche dei riempimenti utilizzati sono riportate nella Tabella 2.

Tabella 2: Principali caratteristiche dei supporti utilizzati

	Ceramica	Allumina
Densità apparente (kg/m ³)	1800	595
Superficie specifica (m ² /g)	<50	350
Diametro pori (µm)	<8	<8
Volume dei pori (cm ³ /100g)	-	63.4

Tema di ricerca “*Tecnologie innovative che consentono la riduzione dei costi di investimento nelle centrali a polverino di carbone*”, Progetto 2.2. “*Studi sull’utilizzo pulito di combustibili fossili, cattura e sequestro della CO₂*”

Rapporto Tecnico “*Sviluppo di dispositivi per la rimozione di tar e particolato contenuti nel syngas proveniente da impianti di gassificazione*”

Risultati

In una serie di prove preliminari eseguite su biomassa, è stato valutato l’effetto del riempimento del secondo stadio sulla composizione del gas di sintesi uscente e sulla quantità di prodotti condensabili ottenuti durante ciascuna prova. Le prove sono state condotte nelle seguenti condizioni sperimentali:

- biomassa alimentata: c.a 6 g/min;
- portata di aria: 6 L/min;
- portata di vapore 1 g/min;
- temperatura del primo stadio: 750 °C,
- temperatura del secondo stadio: 900 °C.

I risultati sperimentali ottenuti con le diverse tipologie di riempimento utilizzate sono riassunti in Tabella 3.

Tabella 3: Risultati ottenuti con vari riempimenti

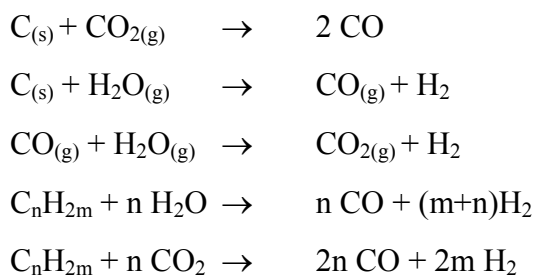
	No secondo stadio	Ceramica	Allumina cilindri	Allumina cilindri impregnata
% H ₂	5	8	15	17
% CO	25	27	27	26
% CH ₄	14	10	9	10
% CO ₂	25	26	22	21
% N ₂	31	29	27	26
Biomassa alimentata (g/h)	356	362	329	370
Nm ³ _{gas} /kg _{carica}	1.15	1.22	1.31	1.38
Char (g/kg _{carica})	39	31	30	36
Catrame prodotto (g/Nm ³ _{gas})	169	98	55	19

Dai dati di Tabella 3 si può osservare come i riempimenti a base allumina risultino più efficaci nel favorire la gassificazione e il reforming del catrame. In particolare l’allumina impregnata con

Tema di ricerca “*Tecnologie innovative che consentono la riduzione dei costi di investimento nelle centrali a polverino di carbone*”, Progetto 2.2. “*Studi sull’utilizzo pulito di combustibili fossili, cattura e sequestro della CO₂*”

Rapporto Tecnico “*Sviluppo di dispositivi per la rimozione di tar e particolato contenuti nel syngas proveniente da impianti di gassificazione*”

KOH ha fornito i migliori risultati. Questo fa supporre che l’attività del materiale di riempimento nel rimuovere il catrame e gli idrocarburi liquidi e pesanti in genere, sia correlabile oltre che alla superficie specifica, anche alla sua reattività chimica. Elevate superfici specifiche garantiscono, infatti, al catrame, agli idrocarburi pesanti in genere e agli incombusti trascinati una elevata superficie di contatto con i gas provenienti nel primo stadio permettendo il completamento delle reazioni di gassificazione e favorendo le reazioni di reforming, promosse entrambe dalle caratteristiche basiche del riempimento, in accordo con le seguenti reazioni:



Ciò sembrerebbe confermato dai risultati ottenuti: il riempimento inerte, costituito da sfere di ceramica, praticamente non porosa, ha mostrato il comportamento peggiore, il riempimento di allumina ad alta superficie specifica ha fornito buoni risultati, ulteriormente migliorati quando il medesimo riempimento è preventivamente trattato con potassa.

Nonostante i migliori risultati preliminari siano stati ottenuti utilizzando come riempimento del secondo stadio allumina trattata con KOH, vista la scarsa riproducibilità del processo di impregnazione utilizzato in laboratorio si è ritenuto di utilizzare per le prove successive un riempimento di allumina non impregnata.

Le successive prove sono state svolte con carbone sub-bituminoso (Sulcis) e con miscele carbone russo-biomassa.

Le prove sono state condotte mantenendo il gassificatore ad una temperatura di 800 °C, mentre il secondo stadio è stato gestito a temperature di 850 e 900 °C.

Poiché tipicamente nei gassificatori updraft è necessario un tempo di permanenza all’interno del reattore di almeno 30 min, la prova di gassificazione è stata considerata conclusa dopo 30 minuti dall’arresto dell’alimentazione.

Tema di ricerca “*Tecnologie innovative che consentono la riduzione dei costi di investimento nelle centrali a polverino di carbone*”, Progetto 2.2. “*Studi sull’utilizzo pulito di combustibili fossili, cattura e sequestro della CO₂*”

Rapporto Tecnico “*Sviluppo di dispositivi per la rimozione di tar e particolato contenuti nel syngas proveniente da impianti di gassificazione*”

Le condizioni operative delle prove eseguite sono riportate in Tabella 4.

Tabella 4: Condizioni operative delle prove eseguite

Prova n.	1	2	3	4
Tipo alimentazione	Sulcis	30 %Russo 70 % Biomassa	30 %Russo 70 % Biomassa	50 %Russo 50 % Biomassa
T II stadio (°C)	900	850	850	900
Portata alimentaz. (g/min)	6	6	6	6
Portata aria (L/min)	5	5	2.5	5
Portata vapore (g/min)	1.0	0.5	0.5	1.0

Tutte le prove riportate più altre non significative ai fini della presente relazione sono state condotte consecutivamente, senza alcuna operazione di sostituzione del riempimento del secondo stadio o di pulizia dello stesso. L’eventuale ostruzione dello stadio è stata monitorata misurando le perdite di carico. La Tabella 5 riporta i risultati delle prove effettuate.

Al termine di ciascuna prova il gassificatore è stato scaricato e il char pesato. Durante questa operazione, si è constatato che il carbone era presente in grosse quantità nel char: si può quindi supporre che nelle condizioni di prova adottate esso abbia subito prevalentemente una distillazione, mentre la sua gassificazione sia stata solo marginale. Ciò è risultato particolarmente evidente nelle prove effettuate in miscela con la biomassa, dove i quantitativi di char ottenuti sono molto maggiori di quelli ottenuti nelle prove preliminari di Tabella 3. Da un confronto tra prove condotte in condizioni omogenee nei due set si può notare come solo il 25 % del carbone di tipo antracitico alimentato abbia subito gassificazione.

Va comunque sottolineato che scopo delle prove non è stato di ottimizzare il funzionamento del gassificatore, ma solo quello di testare il dispositivo proposto in presenza di gas molto ricchi in tar.

Tema di ricerca “*Tecnologie innovative che consentono la riduzione dei costi di investimento nelle centrali a polverino di carbone*”, Progetto 2.2. “*Studi sull’utilizzo pulito di combustibili fossili, cattura e sequestro della CO₂*”

Rapporto Tecnico “*Sviluppo di dispositivi per la rimozione di tar e particolato contenuti nel syngas proveniente da impianti di gassificazione*”

Tabella 5: Risultati prove gassificazione

Prova n	1	2	3	4
Nm ³ _{gas} /kg _{carica}	1.5	1.4	1.1	1.2
Char (g/kg _{carica})	185	192	246	312
Tar dopo I stadio (g/Nm ³ _{gas})	111	133	220	142
Tar dopo II stadio (g/Nm ³ _{gas})	30	39	59	27
Particolato dopo I stadio (g/Nm ³ _{gas})	5	2	4	3
Particolato dopo II stadio (g/Nm ³ _{gas})	0.8	0.5	0.7	0.5
Perdite di carico II stadio (mm H ₂ O)	4	4	2	2
Composizione gas dopo I stadio				
% H ₂	9	12	9	14
% CO	19	21	24	22
% CH ₄	14	9	17	6
% CO ₂	34	31	32	26
% N ₂	24	27	18	32
Composizione gas dopo II stadio				
% H ₂	16	18	14	23
% CO	28	24	26	24
% CH ₄	7	12	19	5
% CO ₂	27	23	26	21
% N ₂	22	23	15	27

Tema di ricerca *“Tecnologie innovative che consentono la riduzione dei costi di investimento nelle centrali a polverino di carbone”*, Progetto 2.2. *“Studi sull’utilizzo pulito di combustibili fossili, cattura e sequestro della CO₂”*

Rapporto Tecnico *“Sviluppo di dispositivi per la rimozione di tar e particolato contenuti nel syngas proveniente da impianti di gassificazione”*

Al termine della sperimentazione il secondo stadio è stato smontato e il riempimento di allumina scaricato: una ispezione visiva dell’allumina non ha mostrato alcun tipo di deposito sulla sua superficie e a parte un leggero sporco dei primi strati, la restante parte è risultata perfettamente pulita e di colore simile all’allumina fresca. Ciò conferma che questo secondo stadio non opera solo come filtro ma svolge effettivamente anche una funzione di gassificazione delle frazioni che in esso si depositano.

Si nota altresì che, nonostante la forte riduzione di particolato e tar effettuata dal secondo stadio, la qualità del syngas uscente sia ancora inadeguata per una sua applicazione diretta. Ciò però è compatibile con la forte riduzione delle dimensioni del letto operata per mantenere a livelli trascurabili le perdite di carico.

Limiti e problematiche connesse alla sperimentazione eseguita

La sperimentazione, essendo stata eseguita all’interno di un laboratorio universitario, è stata per necessità limitata nel tempo (durata massima di ciascuna prova: 4 h) e nelle quantità di alimentazione. I risultati ottenuti sono incoraggianti, ma ovviamente andranno verificati su un’apparecchiatura di maggiori dimensioni e in un sistema che consenta prove di lunga durata.

Il secondo stadio è stato gestito come stadio di reforming: le reazioni che avvengono sono per lo più endotermiche e favorite da alta temperatura, e il calore necessario a tali reazioni è stato fornito integralmente dall’esterno mediante utilizzo di un forno elettrico tubolare posizionato coassialmente al reattore. Questa soluzione, oltre ad essere difficilmente scalabile su apparecchiature di maggiori dimensioni, rende particolarmente arduo effettuare un bilancio energetico del sistema. L’ulteriore upgrading del sistema dovrebbe quindi prevedere la gestione del secondo stadio in modo autotermico, mediante iniezione al suo interno di una corrente di ossigeno/aria. Ciò permetterebbe sia di raggiungere temperature più elevate, sia di avere informazioni più corrette sulla reale applicabilità del sistema.

Tema di ricerca *“Tecnologie innovative che consentono la riduzione dei costi di investimento nelle centrali a polverino di carbone”*, Progetto 2.2. *“Studi sull’utilizzo pulito di combustibili fossili, cattura e sequestro della CO₂”*

Rapporto Tecnico *“Sviluppo di dispositivi per la rimozione di tar e particolato contenuti nel syngas proveniente da impianti di gassificazione”*

2.2. Potenzialità realizzative di un dispositivo di rimozione e conversione del tar basato sulla tecnologia del plasma freddo

Introduzione

Negli ultimi decenni si è assistito a una costante crescita degli studi finalizzati alla applicazione di sistemi a plasma freddo per il controllo dell'inquinamento e per il trattamento di gas. Applicazioni comuni riguardano soprattutto l'eliminazione degli odori e la purificazione dell'aria in ambienti circoscritti, sono invece ancora in fase dimostrativa quelle relative all'abbattimento dei VOC, alla depurazione degli effluenti gassosi provenienti dal processo di reforming del metano, alla produzione di idrogeno e alla purificazione di gas combustibili [2-8].

In Tabella 6 sono riportate le principali applicazioni potenziali e il relativo stato di sviluppo.

Sebbene tali tecniche, ad eccezione di qualche caso, non siano ancora largamente applicate a livello industriale, si prevede che esse assumano una importanza fondamentale soprattutto per il trattamento di grandi volumi di gas esausti.

Il principio di base comune alle tecniche di generazione di plasma freddo è quello di produrre un plasma in cui la massima parte dell'energia elettrica è impiegata per generare elettroni altamente energetici piuttosto che per il riscaldamento del gas [9]. Attraverso la dissociazione per impatto elettronico e la ionizzazione di molecole del gas, gli elettroni energetici producono radicali liberi, ioni ed ulteriori elettroni che, a loro volta, ossidano, riducono o decompongono le molecole target. Esistono molti tipi di reattori a scarica elettrica, che si differenziano per configurazione degli elettrodi e per tipologia di alimentazione elettrica (ad impulsi, a corrente continua o alternata). Fra le tipologie di reattori a scarica elettrica, quelli più estesamente studiati e con le maggiori potenzialità di applicazione a livello industriale sono basati sull'effetto corona pulsato.

Tema di ricerca “*Tecnologie innovative che consentono la riduzione dei costi di investimento nelle centrali a polverino di carbone*”, Progetto 2.2. “*Studi sull’utilizzo pulito di combustibili fossili, cattura e sequestro della CO₂*”

Rapporto Tecnico “*Sviluppo di dispositivi per la rimozione di tar e particolato contenuti nel syngas proveniente da impianti di gassificazione*”

Tabella 6: Applicazioni potenziali di sistemi a plasma freddo.

Applicazione	Funzione principale	Stato
Indoor	Rimozione batteri, virus e odori	Commerciale
Gas esausti	Rimozione NO _x e SO ₂ come NH ₄ NO ₃ e (NH ₄) ₂ SO ₄ (mediante addizione di NH ₃)	Dimostratore industriale
	Rimozione metalli pesanti e particolato	Dimostratore industriale
	Riduzione degli NO _x da sorgenti mobili	Laboratorio
	Rimozione diossine/furani e Hg	Dimostratore industriale
Aria	Rimozione odori, VOC e microorganismi	Dimostratore industriale e prossimo alla commercializzazione
Gas di sintesi	Cracking del tar, conversione di CO a CO ₂ , rimozione metalli pesanti	Dimostratore industriale
Reforming del metano	Conversione CH ₄ a idrocarburi superiori o a metanolo	Laboratorio
Idrogeno	H ₂ da combustibili fossili	Laboratorio
Reforming	Upgrading di frazioni pesanti	Laboratorio
Suoli	Rimozione inquinanti organici e microorganismi	Laboratorio
Acque	Rimozione inquinanti organici e microorganismi	Dimostrativo

Tema di ricerca *“Tecnologie innovative che consentono la riduzione dei costi di investimento nelle centrali a polverino di carbone”*, Progetto 2.2. *“Studi sull’utilizzo pulito di combustibili fossili, cattura e sequestro della CO₂”*

Rapporto Tecnico *“Sviluppo di dispositivi per la rimozione di tar e particolato contenuti nel syngas proveniente da impianti di gassificazione”*

La scarica corona

La scarica corona è, per definizione, la scarica in un gas in cui la geometria del sistema confina il processo di ionizzazione in una regione intorno all’elettrodo attivo. La scarica corona può essere positiva, negativa, bipolare, AC, o ad alta frequenza, in base alla polarità dell’elettrodo attivo, mentre relativamente alla conduzione di corrente si può avere una scarica corona unipolare o bipolare dipendentemente dal fatto che una o entrambe le polarità degli ioni siano di interesse [9].

In generale nei reattori a effetto corona per la generazione di plasmi si ricorre all’uso della scarica unipolare positiva o negativa [10]. La differenza tra le due tipologie di scarica, anche se ben conosciuta da un punto di vista fisico (tensione di on-set minore e maggior probabilità di formazione di scintille per la scarica positiva), non è completamente chiara da un punto di vista chimico. Studi effettuati a proposito mostrano risultati contraddittori e fortemente influenzati dalle condizioni operative.

Sembrerebbe che la scarica negativa sia in grado di produrre una maggiore quantità di elettroni a bassa energia, mentre nella scarica positiva gli elettroni sono più energetici e quindi tale tipo di scarica sarebbe maggiormente indicata per reazioni chimiche.

Il reattore a scarica corona pulsata

Un reattore a scarica corona pulsata è alimentato con un generatore di alta tensione pulsato, con un aumento della tensione oltre i 500V/ns per un tempo di alcune decine di nanosecondi. L'utilizzo di impulsi di tensione è stato originariamente introdotto nei precipitatori elettrostatici allo scopo di migliorare l'efficienza di rimozione attraverso l'ottimizzazione della tensione di picco e della distribuzione di corrente.

I reattori basati sull’effetto corona pulsato sono di due tipi: con o senza una barriera dielettrica. La scarica prodotta per effetto corona pulsato è di solito di tipo streamer, con la ionizzazione che si sviluppa nell’intera zona compresa tra gli elettrodi. Questo permette di avere una distanza tra gli elettrodi elevata, fino a oltre 10 cm, molto favorevole per applicazioni su larga scala e per la riduzione delle perdite di carico. Viene solitamente adottata una polarità positiva, in quanto la propagazione degli streamer è maggiore e più rapida che con una polarità negativa. Una delle caratteristiche distintive della scarica corona pulsata è l'uso di impulsi di tensione di breve

Tema di ricerca *“Tecnologie innovative che consentono la riduzione dei costi di investimento nelle centrali a polverino di carbone”*, Progetto 2.2. *“Studi sull’utilizzo pulito di combustibili fossili, cattura e sequestro della CO₂”*

Rapporto Tecnico *“Sviluppo di dispositivi per la rimozione di tar e particolato contenuti nel syngas proveniente da impianti di gassificazione”*

durata: a causa della breve durata della tensione applicata la dissipazione di energia da parte degli ioni può essere minimizzata, con conseguente miglioramento della efficienza energetica [9-10].

Un reattore a scarica corona pulsata richiede un impulso di tensione più veloce della frequenza con cui si muovono gli ioni, quindi solo gli elettroni possono seguire il cambiamento di campo elettrico e gli ioni quasi non si muovono, come anche le molecole di gas. Poi la tensione applicata cala molto rapidamente, per evitare la propagazione di scariche a scintille.

Dal momento che lo streamer si genera solo nella scarica, questi dispositivi sono classificati ad alta densità di plasma e media temperatura elettronica. Generalmente questi reattori sono in grado di gestire medie portate di gas ($10\text{-}10^2$ Nm³/h), in quanto l’impulso rapido può essere realizzato soltanto con una bassa capacità tra gli elettrodi. Tale limite può essere superato mediante un rapido aumento dei valori di corrente, dal momento che un campo elettrico indotto può essere generato dall’aumento rapido della corrente.

Plasma freddo per effetto corona pulsato

Applicando un impulso positivo di tensione a una geometria elettrodica non uniforme, ad esempio punta-piastra, filo-cilindro o filo-piastra, possono essere generati streamer di plasma corona transitori.

Nell’aria o negli effluenti gassosi gli streamer si propagano dall’anodo al catodo in poche decine di nanosecondi. L’energia corona viene principalmente trasferita nei canali degli streamer, per la propagazione degli streamer primari e la generazione di streamer secondari. Gli streamer di plasma generati per effetto corona possono durare poche decine di nanosecondi. Le maggiori criticità nel generare tale tipo di plasma freddo derivano dagli switch ad alta tensione ed elevata corrente. Attualmente gli switch allo stato solido sono ancora troppo costosi e le tecniche di compressione magnetica non sono ancora efficienti da un punto di vista energetico quando applicate alla generazione di alta tensione pulsata e alle relative applicazioni del plasma freddo. Grazie alla più alta tensione di hold-off, alla maggiore conduzione di corrente e alla più bassa caduta di tensione gli switch di tipo spark-gap ad alta pressione con elettrodo di innesco possono risultare tra quelli più vantaggiosi da un punto di vista economico per applicazioni fino a 10 kW [11].

Tema di ricerca “*Tecnologie innovative che consentono la riduzione dei costi di investimento nelle centrali a polverino di carbone*”, Progetto 2.2. “*Studi sull’utilizzo pulito di combustibili fossili, cattura e sequestro della CO₂*”

Rapporto Tecnico “*Sviluppo di dispositivi per la rimozione di tar e particolato contenuti nel syngas proveniente da impianti di gassificazione*”

In Fig. 2 viene riportato un diagramma schematico di un sistema di generazione di plasma per effetto corona pulsato, in cui vengono utilizzati quattro reattori filo-cilindro [12]. L’intero sistema può essere suddiviso in sei sezioni (da I a VI): la sezione I corrisponde al circuito a bassa tensione, mentre le altre (II – VI) sono relative alla parte ad alta tensione.

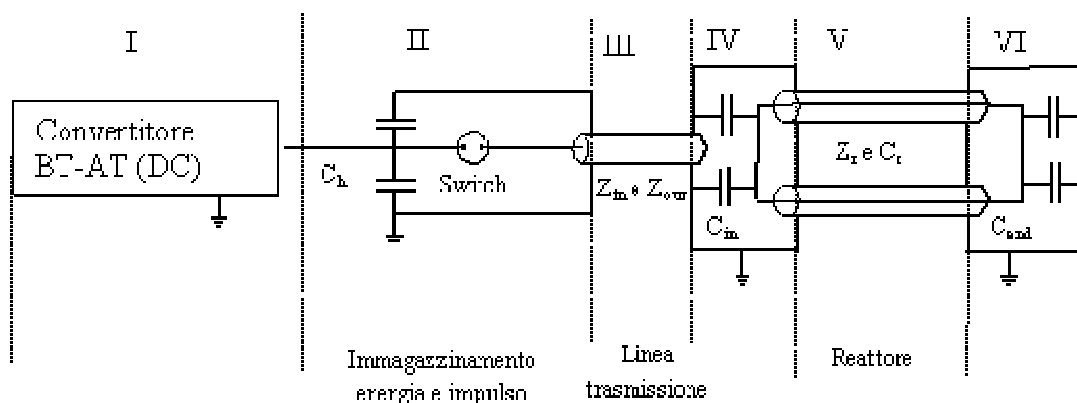


Fig. 2: Schema di un reattore a plasma pulsato

Sezione I - Conversione AC-DC-Impulsata

La prima sezione dello schema rappresenta il generatore di alta tensione. Per la realizzazione di questa apparecchiatura esistono diversi schemi ormai consolidati [13], da molto semplici come quelli che fanno uso delle linee commutate con thyristori (Figura 3) e comunemente utilizzate nei precipitatori elettrostatici, a quelle più complesse che fanno uso di sistemi ad inverter insieme a un trasformatore di impulso.

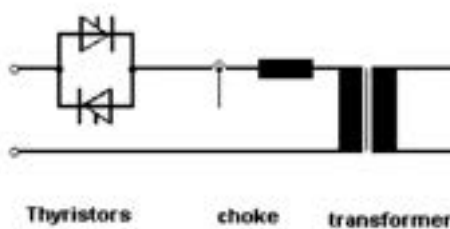


Fig. 3: Sistema ad alta tensione a linea monofase commutata

Tema di ricerca “*Tecnologie innovative che consentono la riduzione dei costi di investimento nelle centrali a polverino di carbone*”, Progetto 2.2. “*Studi sull’utilizzo pulito di combustibili fossili, cattura e sequestro della CO₂*”

Rapporto Tecnico “*Sviluppo di dispositivi per la rimozione di tar e particolato contenuti nel syngas proveniente da impianti di gassificazione*”

In generale comunque in queste applicazioni si utilizzano i più efficienti sistemi AC-DC-impulsata utilizzando un circuito a stadi di risonanza con thyristori ad alta prestazione come schematicamente riportato in Figura 4.

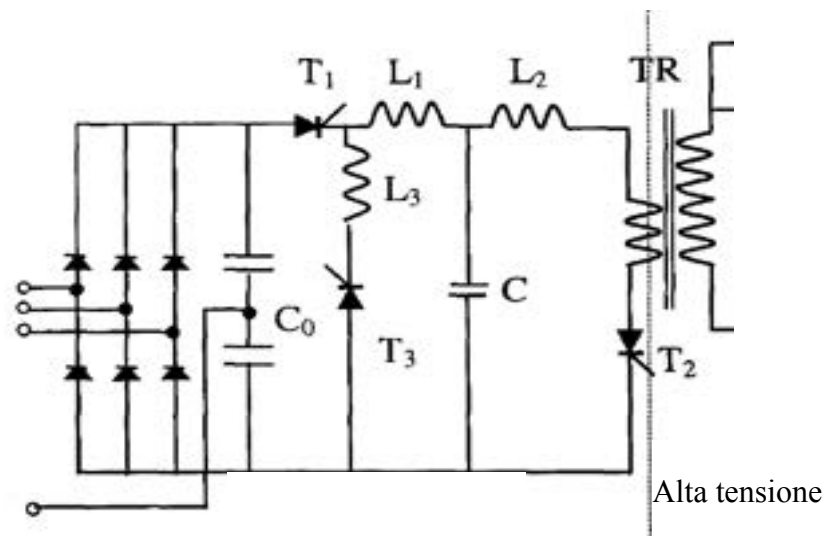


Fig. 4: Schema di un generatore AC-DC impulsata a tre stadi di risonanza

Sezione II - Il generatore di impulsi

Relativamente al metodo di accumulo dell’energia, le tecniche utilizzate per la generazione degli impulsi possono essere distinte in capacitive e induttive. Il circuito più comune è basato sulla scarica di un condensatore di immagazzinamento dell’energia ad alta tensione C_h in un circuito a bassa induttanza mediante uno switch [14]. Per generare l’impulso ad alta tensione della durata di nanosecondi, il condensatore C_h viene caricato e scaricato ripetutamente mediante il circuito AC-DC-impulsata e uno switch ad alta tensione. Il condensatore ad alta tensione viene generalmente caricato in circa 50 μ s e scaricato in circa 100 ns [15-16]. Gli aspetti tecnici più critici riguardano l’efficienza di conversione energetica, le velocità di carica e scarica, la frequenza degli impulsi, l’energia per impulso, la stabilità del rendimento e le proprietà di compatibilità elettromagnetica del sistema.

Tema di ricerca “*Tecnologie innovative che consentono la riduzione dei costi di investimento nelle centrali a polverino di carbone*”, Progetto 2.2. “*Studi sull’utilizzo pulito di combustibili fossili, cattura e sequestro della CO₂*”

Rapporto Tecnico “*Sviluppo di dispositivi per la rimozione di tar e particolato contenuti nel syngas proveniente da impianti di gassificazione*”

L’energia immagazzinata nel condensatore ad alta tensione C_h è quindi scaricata attraverso una linea di trasmissione e uno switch ad alta tensione e forti correnti, tipicamente di tipo spark gap con innesco. A questo punto l’impulso ad alta tensione si propaga al reattore corona attraverso la linea di trasmissione che può anche essere una linea di trasmissione a trasformatore (TLT). La durata dell’impulso dipende dal condensatore ad alta tensione e dall’impedenza di ingresso della linea di trasmissione, mentre il tempo di risalita dell’impulso dipende dal tempo di chiusura dello switch e/o dall’induttanza dello switch stesso. Perché lo switch abbia una bassa induttanza il condensatore di immagazzinamento è spesso costruito in configurazione coassiale.

Usando uno spark-gap switch il tempo di risalita dell’impulso può raggiungere valori di circa 20 ns, mentre la durata dell’impulso può variare da 50 a 250 ns con una ripetizione degli impulsi da 1 a 900 pps e con una energia che può raggiungere i 12 J/impulso. Un fattore critico è rappresentato dalla vita media di questo tipo di switch, che dipende da numerosi fattori quali principalmente il materiale elettronico, la forma degli elettrodi e il metodo di innesco. Con l’utilizzo la distanza tra gli elettrodi tende a crescere a causa dell’erosione e questo può provocare una frequenza di scarica non costante[17].

Sezione III - La trasmissione degli impulsi

Dopo aver innescato lo spark-gap, l’impulso ad alta tensione si propaga attraverso la linea di trasmissione. La potenza di picco e/o la corrente di picco dipendono principalmente dalla tensione allo switch e dall’impedenza d’ingresso Z_{in} . Utilizzando, per connettere il reattore, una linea di trasmissione a trasformatore (TLT), come mostrato in Fig. 5, per una data potenza di picco può essere ottenuta in uscita o una maggiore tensione di picco o una maggiore corrente di picco. Per moltiplicare la tensione in uscita, i due cavi con impedenza pari a Z_o sono collegati in parallelo sul lato di ingresso, che è collegato allo switch come mostrato in Fig. 2, mentre sul lato di uscita, che è collegato al reattore, i due cavi sono collegati in serie. Il rapporto di impedenza è $Z_{out}/Z_{in} = 4$. Per moltiplicare la corrente in uscita, i lati di ingresso e di uscita del TLT sono collegati in serie e in parallelo, rispettivamente. In tal caso il rapporto di impedenza è $Z_{out}/Z_{in} = 1/4$. Inoltre, utilizzando un TLT, un impulso ad alta tensione potrebbe essere facilmente sovrapposto a una polarizzazione in corrente continua per l’eccitazione del plasma corona.

Tema di ricerca “*Tecnologie innovative che consentono la riduzione dei costi di investimento nelle centrali a polverino di carbone*”, Progetto 2.2. “*Studi sull’utilizzo pulito di combustibili fossili, cattura e sequestro della CO₂*”

Rapporto Tecnico “*Sviluppo di dispositivi per la rimozione di tar e particolato contenuti nel syngas proveniente da impianti di gassificazione*”

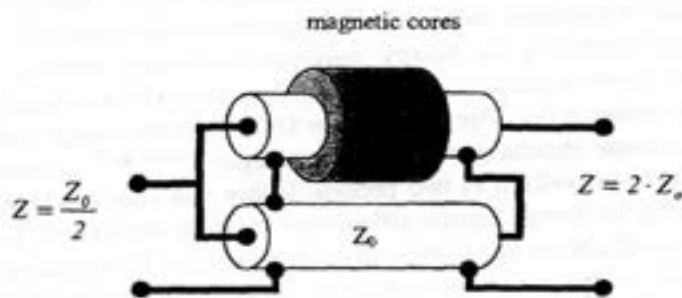


Fig. 5: Diagramma schematico di un trasformatore di linea di trasmissione a due stadi

I problemi più critici nella realizzazione di un TLT riguardano la potenza di picco e le perdite di energia a causa delle correnti secondarie. Ad esempio un TLT può essere realizzato con quattro cavi coassiali da 50 Ω (RG218). Sul lato di ingresso i quattro cavi sono collegati in parallelo ($Z_{in} = 12,5 \Omega$). Per generare una maggiore corrente di picco in uscita, sul lato di uscita i quattro cavi sono divisi in due gruppi, e in ogni gruppo i due cavi sono collegati in parallelo. Poi i due gruppi sono collegati in serie ($Z_{out} = 50 \Omega$). In alternativa, per la generazione di impulsi a più alta tensione, alla fine tutti e quattro i cavi sono collegati in serie, ottenendo una impedenza di uscita di 200 Ω . Tutte le parti elettriche, compreso il TLT, operano in aria. Il TLT e i nuclei magnetici sono appositamente progettati per limitare le perdite di energia causate dalle correnti secondarie e per minimizzare il loro effetto sul tempo di salita della tensione e sul guadagno. A seconda della durata dell'impulso ad alta tensione e del materiale del nucleo magnetico, per assicurare una massima efficienza di trasferimento di energia è necessaria una lunghezza minima del TLT. In letteratura sono disponibili numerosi ulteriori dettagli per la progettazione e l'ottimizzazione, dei TLT, in relazione al tempo di salita di tensione, alla potenza di uscita e all'eccitazione del plasma corona [18]. Ad esempio, per un TLT particolarmente compatto con impedenze di entrata e di uscita rispettivamente pari a 5 e 20 Ω con 10-30 kW di produzione media di energia, la tensione di picco in uscita, la potenza di picco e l'efficienza di conversione energetica saranno circa 80 kV, 320 MW e 98%, rispettivamente [19].

Tema di ricerca “*Tecnologie innovative che consentono la riduzione dei costi di investimento nelle centrali a polverino di carbone*”, Progetto 2.2. “*Studi sull’utilizzo pulito di combustibili fossili, cattura e sequestro della CO₂*”

Rapporto Tecnico “*Sviluppo di dispositivi per la rimozione di tar e particolato contenuti nel syngas proveniente da impianti di gassificazione*”

Sezione IV - Compatibilità del generatore di corrente pulsata con il reattore corona

La compatibilità del generatore di corrente pulsata ad alta tensione con il reattore corona è particolarmente importante per l'efficienza totale di conversione energetica, la produzione iniziale di radicali liberi e per l'affidabilità del sistema nel suo complesso. Tale importanza è tanto maggiore quando si opera lo scale-up di tali sistemi. Purtroppo a tal proposito la letteratura è molto scarsa, e poche sono le tecniche disponibili per migliorare tale connessione.

Applicando differenti impulsi ad alta tensione a un reattore corona, le scariche corona pulsate possono svilupparsi in due fasi, corrispondenti a scariche primarie e secondarie. Il trasferimento di energia durante queste due fasi dipende dalla velocità di aumento della tensione e dalla durata dell'impulso. Gli elettroni attivi sono generati prevalentemente durante la propagazione della scarica primaria, e le scariche secondarie appaiono meno efficienti rispetto a quelle primarie. L'ottimizzazione del trasferimento di energia dalla scarica aumenta l'efficienza iniziale di produzione di radicali liberi, e il miglioramento dell'efficienza di conversione energetica riduce i costi, sia di capitale sia operativi. Una tecnica riportata per migliorare la connessione è di utilizzare una corrente continua sovrapposta all'impulso ad alta tensione. Gli effetti della polarizzazione in corrente continua sull'efficienza del trasferimento di energia e sulla struttura delle scariche di plasma corona sono stati ampiamente analizzati. Generalmente l'eccitazione del plasma corona è realizzata in due periodi, prima e dopo aver raggiunto la tensione di on-set: ottimizzare l'efficienza di trasferimento energetico per questi due periodi aumenterebbe l'efficienza totale di conversione energetica. Per un reattore corona di una data dimensione, aumentando la tensione di picco l'impedenza del reattore, definita come il rapporto tra la tensione di picco e la corrente di picco, tende a uguagliare l'impedenza di uscita del generatore. In questo modo potrebbe essere ottenuto un matching automatico. Una minima tensione di picco è necessaria per ottenere il miglior matching. D'altra parte, per un dato generatore di impulsi ad alta tensione, una corrispondenza d'impedenza automatica può essere ottenuta anche modificando le dimensioni del reattore corona. Un reattore corona di grandi dimensioni ha bisogno di un generatore di impulsi ad alta tensione con una bassa impedenza, per raggiungere grandi efficienze di trasferimento dell'energia [20]. Inoltre, prima che un impulso ad alta tensione raggiunga la tensione di on-set, l'impedenza di uscita Z_{out} del generatore di impulsi ad alta tensione, il tempo per raggiungere l'on-set, τ , e la capacità C_r del reattore devono essere definiti secondo l'equazione (1), al fine di ridurre la riflessione durante il periodo di carica.

Tema di ricerca “*Tecnologie innovative che consentono la riduzione dei costi di investimento nelle centrali a polverino di carbone*”, Progetto 2.2. “*Studi sull’utilizzo pulito di combustibili fossili, cattura e sequestro della CO₂*”

Rapporto Tecnico “*Sviluppo di dispositivi per la rimozione di tar e particolato contenuti nel syngas proveniente da impianti di gassificazione*”

$$\tau = 2Z_{\text{out}}C_r \quad (1)$$

Per un sistema a plasma corona di piccole dimensioni, su scala di laboratorio, tali criteri possono essere facilmente rispettati. Per un sistema a plasma corona più grande insorgono problemi tecnici e soddisfare questi criteri risulta molto più complicato. Verranno di seguito illustrate e discusse alcune tecniche pratiche per soddisfare i suddetti criteri e per migliorare il matching.

Come mostrato in Fig.2, un reattore a plasma corona può essere schematizzato e analizzato considerando tre sezioni. Sul lato di ingresso (sezione IV), il reattore corona è collegato all'uscita della linea di trasmissione. Perché la dimensione di questa sezione potrebbe essere dell'ordine di un metro, la struttura meccanica di questa parte dovrebbe essere progettata non solo per evitare la scarica corona e/o la formazione di scintille, ma anche per avere un'impedenza di trasferimento pari alla impedenza di uscita Z_{out} della linea di trasmissione. Se non vi è questa corrispondenza la sezione IV dovrebbe essere progettata il più compatta possibile, in modo da ridurre l'induttanza parassita. Una connessione non compatibile potrebbe influire notevolmente sull'efficienza di trasferimento di energia e sulla potenza di picco. A titolo di esempio, la Fig. 6 mostra gli effetti dello schema costruttivo di questa regione sulla potenza di picco in presenza di un carico resistivo [11]. A causa del riscaldamento il valore della resistenza diminuisce gradualmente con l'aumentare della potenza media e/o del tempo di test. Un layout compatto corrisponde ad una piccola induttanza parassita. Di conseguenza il generatore mostra un più breve tempo di salita dell'alta tensione e maggiore corrente o potenza di picco. Se è anche utilizzata una polarizzazione in corrente continua, il condensatore di accoppiamento (vedi sezione III) è di solito posto in questa sezione.

Tema di ricerca “*Tecnologie innovative che consentono la riduzione dei costi di investimento nelle centrali a polverino di carbone*”, Progetto 2.2. “*Studi sull’utilizzo pulito di combustibili fossili, cattura e sequestro della CO₂*”

Rapporto Tecnico “*Sviluppo di dispositivi per la rimozione di tar e particolato contenuti nel syngas proveniente da impianti di gassificazione*”

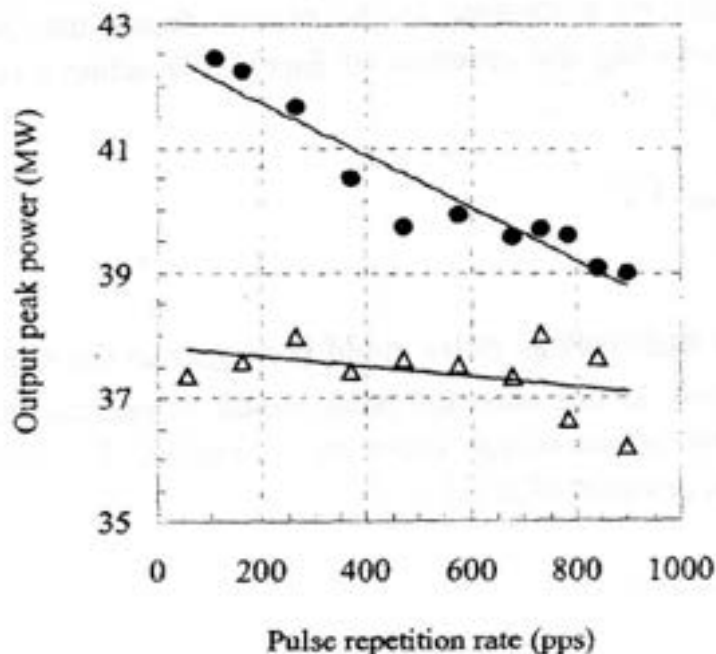


Fig. 6: Effetti del layout costruttivo sulla potenza in uscita con un carico resistivo ●: piccola taglia; Δ: grande taglia

La seconda sezione (sezione V) è costituita dal reattore stesso. Le geometrie elettrodeiche più spesso utilizzate per la realizzazione di reattori corona di grandi dimensioni sono quelle filo-cilindro, filo-piastra e filo-filo. Dal punto di vista elettrico, un reattore può essere descritto in termini di impedenza di trasferimento nel vuoto Z_r e della capacità C_r . In funzione della lunghezza effettiva l del reattore corona da una estremità all'altra, si definisce la seguente equazione per valutare questi due parametri, dove Z_r , C_r e l sono espressi rispettivamente in Ω , nF, e metri.

$$Z_r C_r = 3.3l \quad (2)$$

Per generare un plasma molto uniforme, il tempo di propagazione dell'impulso ad alta tensione all'interno del reattore dovrebbe essere molto più breve del tempo di propagazione della scarica primaria, necessario per colmare la distanza tra gli elettrodi, che è dell'ordine di poche decine di nanosecondi [4]. Di conseguenza la lunghezza effettiva dell'elettrodo di scarica corona

Tema di ricerca “*Tecnologie innovative che consentono la riduzione dei costi di investimento nelle centrali a polverino di carbone*”, Progetto 2.2. “*Studi sull’utilizzo pulito di combustibili fossili, cattura e sequestro della CO₂*”

Rapporto Tecnico “*Sviluppo di dispositivi per la rimozione di tar e particolato contenuti nel syngas proveniente da impianti di gassificazione*”

dovrebbe essere di circa un metro [19]. Dopo il reattore corona (sezione VI), il reattore presenta un terminale che assicura la propagazione di impulsi ad alta tensione. Di conseguenza, l'energia verrà riflessa verso il generatore. Per risolvere questi problemi, e anche per soddisfare i criteri precedentemente esposti e necessari per conseguire un buon matching [20], due condensatori di matching C_{in} e C_{end} (Fig. 1) sono collegati alle estremità del reattore. La capacità C_r del reattore in Eq. (1) può quindi essere sostituita da $C_{in} + C_r + C_{end}$. Per il matching del reattore corona, oltre al requisito minimo di tensione di picco, si riportano le seguenti tecniche utilizzate allo scopo.

Due casi devono essere distinti: $Z_r \gg Z_{out}$ o $Z_r = Z_{out}$.

(1) Se $Z_r \gg Z_{out}$, un impulso ad alta tensione dovrebbe riflettersi in modo significativo nel generatore dal lato di ingresso del reattore (sezione IV) prima che sia stata raggiunta la tensione di on-set del corona. Una piccola quantità di energia potrebbe essere trasferita al reattore durante il periodo di carica. Il problema può essere risolto soddisfacendo il criterio di Eq. (1):

$$\tau = 2Z_{out}C_{in} \quad (3)$$

$$C_{end} = 0 \quad (4)$$

(2) Se $Z_r = Z_{out}$, un impulso ad alta tensione dovrebbe propagarsi alla fine del reattore corona (sezione VI) senza riflessione. In questo caso l'impulso sarebbe riflesso dalla estremità finale del reattore nel generatore prima che sia raggiunta la tensione di on-set del corona. In questo caso, soddisfacendo il criterio di Eq. (1) si ha:

$$\tau = 2Z_{out}C_{end} \quad (5)$$

$$C_{in} = 0 \quad (6)$$

Tema di ricerca “*Tecnologie innovative che consentono la riduzione dei costi di investimento nelle centrali a polverino di carbone*”, Progetto 2.2. “*Studi sull’utilizzo pulito di combustibili fossili, cattura e sequestro della CO₂*”

Rapporto Tecnico “*Sviluppo di dispositivi per la rimozione di tar e particolato contenuti nel syngas proveniente da impianti di gassificazione*”

Per sistemi a plasma corona industriali, a seconda della tensione di picco, possono essere sperimentalmente ottimizzate la tensione di on-set del corona, Z_r e C_r , C_{in} e C_{end} .

Un sistema a plasma corona può essere progettato soddisfacendo i criteri riportati in Eq. (7) e Eq. (8):

$$Z_r \geq Z_{out} \text{ o } Z_r = Z_{out} \quad (7)$$

$$\tau \approx 2Z_{out}(C_{in} + C_r + C_{end}) \quad (8)$$

La Tabella 7 mostra l'efficacia della tecnica proposta per migliorare il trasferimento di energia da un generatore di impulsi ad alta tensione a un reattore corona filo-piastra in aria [11]. I test sono stati condotti nelle medesime condizioni. La lunghezza effettiva del filo corona, la lunghezza totale del filo corona, il suo diametro e la distanza tra piastra e piastra sono rispettivamente pari a 1000, 5000, 1, e 116 mm. L'impedenza di uscita Z_{out} , l'impedenza del reattore Z_r e la capacitance del reattore C_r sono rispettivamente 50, 59 Ω , e 85 pF. La velocità di ripetizione dell'impulso, la tensione di picco e il tempo per raggiungere l'on-set del corona sono rispettivamente pari a circa 100 pps, 55-65 kV e 20 ns. Inserendo condensatori di matching opportunamente scelti, potrebbero essere migliorati sia la potenza del corona sia l'efficienza di trasferimento energetico.

Tab. 7: Effetti della tecnica di matching sul trasferimento di energia

Test	C_{in} (pF)	C_{end} (PF)	Corrente di picco (A)	Potenza di picco (MW)	Energia Corona (J)
1	0	0	642	41	2.7
2	160	0	898	44	2.6
3	160	60	956	46	3.0
4	160	120	984	46	3.0

Tema di ricerca “*Tecnologie innovative che consentono la riduzione dei costi di investimento nelle centrali a polverino di carbone*”, Progetto 2.2. “*Studi sull’utilizzo pulito di combustibili fossili, cattura e sequestro della CO₂*”

Rapporto Tecnico “*Sviluppo di dispositivi per la rimozione di tar e particolato contenuti nel syngas proveniente da impianti di gassificazione*”

Considerazioni sull’uso dello spark gap

Lo spark-gap è un componente molto semplice e consiste di due elettrodi separati da materiale isolante solido, liquido o gassoso [21]. Viene descritto di seguito il principio di funzionamento di un generico spark-gap.

Se si applica ai capi dello spark gap una tensione minore di quella di breakdown (nel caso di isolante gassoso) e a questa tensione si sovrappone un impulso, il gas va in breakdown. La tensione di innesco totale da applicare varia a seconda del tipo di gas, della pressione e della distanza tra gli elettrodi. Ad esempio, nel caso di elettrodi piani distanziati di 1 cm con idrogeno a 1 atmosfera la tensione di breakdown è pari a 12kV. Da notare che lo spark-gap ha le polarità invertibili. Perché questo dispositivo ritorni a fungere da interruttore aperto occorre rimuovere la tensione applicata. Lo spark-gap ha la necessità di rimanere inattivo per tempi che dipendono dalla geometria e ancora dalla natura e pressione del gas di riempimento: questo tempo di recupero può essere dell'ordine dei ms e ciò costituisce il limite maggiore di tali componenti. Molto simile, ma molto più costoso a parità di tensioni anodo-catodo applicabili, è il thyatron.

Il thyatron

Col termine thyatron si intende una camera di scarica riempita di gas inerte o vapori di mercurio nella quale è inserito un catodo, un anodo e una o più griglie (Fig. 7).

Esistono molti tipi di thyatron, ma tutti operano in modo analogo al thyristore, con la sola differenza che (con l'eccezione dei thyatron a idrogeno) la griglia deve essere polarizzata positivamente per passare dallo stato di interdizione alla conduzione, e poi negativamente per avere l'apertura.

I thyatron funzionano da interruttori controllati in tensione, cioè quando vengono innescati possono venire aperti solo togliendo la tensione alla griglia e annullando l'alimentazione al circuito principale. I thyatron a vapori di mercurio sono i più lenti e i più limitati per problemi dovuti alla condensa di vapori del gas. Vengono usati raramente perché hanno pochi vantaggi rispetto ai thyristori. Al contrario, i thyatron a idrogeno sono molto più veloci dei thyristori e alcune tipologie possono commutare in tempi inferiori ai 20ns. I componenti a idrogeno impiegano il catodo caldo [22].

Tema di ricerca “*Tecnologie innovative che consentono la riduzione dei costi di investimento nelle centrali a polverino di carbone*”, Progetto 2.2. “*Studi sull’utilizzo pulito di combustibili fossili, cattura e sequestro della CO₂*”

Rapporto Tecnico “*Sviluppo di dispositivi per la rimozione di tar e particolato contenuti nel syngas proveniente da impianti di gassificazione*”

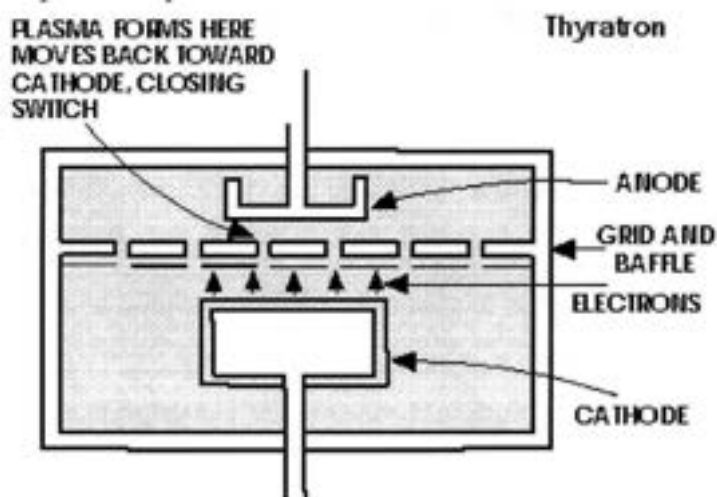


Fig. 7: Rappresentazione schematica di un thyatron.

Alcuni thyatron possono resistere fino a 50 KV e sopportare potenze di uscita fino a 40 MW. Applicazioni tipiche dei thyatron sono nei modulatori impulsivi per radar, negli acceleratori di particelle, nei laser e nelle apparecchiature mediche ad alto voltaggio.

Un tipo particolare di thyatron è quello a deuterio. I thyatron a deuterio sono simili a quelli a idrogeno ma possono raggiungere tensioni anodo-catodo fino a 70 KV. Esistono anche thyatron per applicazioni speciali, in condizioni estreme, con corpo ceramico o di metallo.

I prezzi dei thyatron possono variare da qualche dollaro alle migliaia di dollari.

L'impulso di comando dei thyatron

Nel caso di utilizzo di thyatron la sezione ad alta tensione può essere realizzata come riportato schematicamente in Figura 8 [22]:

Tema di ricerca “*Tecnologie innovative che consentono la riduzione dei costi di investimento nelle centrali a polverino di carbone*”, Progetto 2.2. “*Studi sull’utilizzo pulito di combustibili fossili, cattura e sequestro della CO₂*”

Rapporto Tecnico “*Sviluppo di dispositivi per la rimozione di tar e particolato contenuti nel syngas proveniente da impianti di gassificazione*”

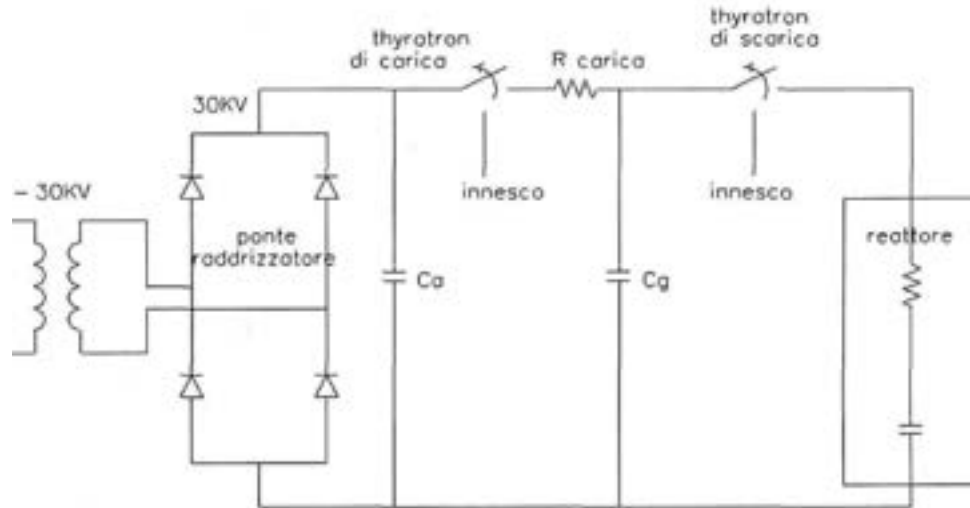


Fig. 8: Schema del circuito di scarica del reattore corona

Per tale applicazione è utilizzabile il componente a idrogeno a catodo caldo siglato HY3202 della EG&G, o un componente analogo che possa sopportare una tensione di picco di 30-32 KV [22].

Il ponte di diodi provvede a raddrizzare la tensione e C_a è la capacità zavorra. Il primo interruttore ha la funzione di isolare la parte di circuito che carica il condensatore C_g da quella che lo scarica, secondo lo schema temporale mostrato in Figura 9.

Tema di ricerca “*Tecnologie innovative che consentono la riduzione dei costi di investimento nelle centrali a polverino di carbone*”, Progetto 2.2. “*Studi sull’utilizzo pulito di combustibili fossili, cattura e sequestro della CO₂*”

Rapporto Tecnico “*Sviluppo di dispositivi per la rimozione di tar e particolato contenuti nel syngas proveniente da impianti di gassificazione*”

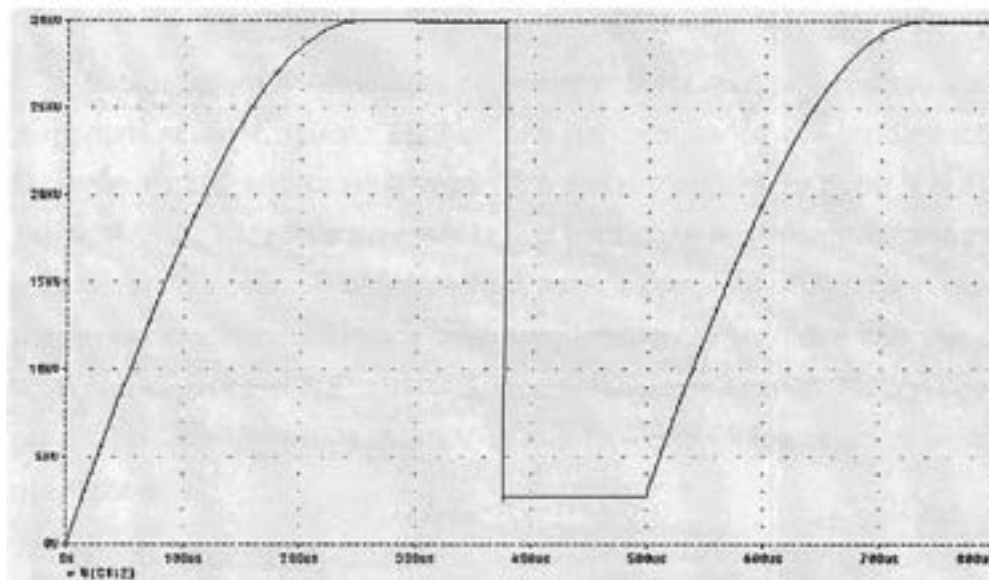


Fig. 9: Andamento qualitativo della tensione su C_g

Durante la prima carica il condensatore C_g segue la tensione fornita dal ponte di diodi e da C_a . Nei cicli di carica successivi esso si troverà già parzialmente carico.

Se si calcola il tempo come in Figura 9, a 0.25 ms si aprirà il primo thyatron. A 0.375 ms verrà fornito un impulso per l'innesco del secondo thyatron che collega C_g al reattore. C_g verrà quindi parzialmente scaricato ed il ciclo ricomincia.

L'innesco dei thyatron di carica e di scarica non deve avvenire contemporaneamente, poiché se ciò accadesse l'alimentatore sarebbe collegato al reattore alimentandolo direttamente. In questo caso sia il thyatron di carica che quello di scarica, una volta eliminato l'impulso di griglia, non si aprirebbero più con la dovuta rapidità (soprattutto quello di scarica) perché non vedrebbero scendere la tensione ai loro capi. Infatti in questa situazione non avverrebbe più la scarica del solo piccolo condensatore C_g , come nel caso di funzionamento normale, ma il ponte di alimentazione cercherà di caricare stabilmente il reattore. Si ricordi l'importanza di fornire al reattore corona impulsi che siano più brevi possibile, altrimenti si rischia di provocare al suo interno un indesiderato arco elettrico. Un esempio è riportato in Figura 10.

Tema di ricerca "Tecnologie innovative che consentono la riduzione dei costi di investimento nelle centrali a polverino di carbone", Progetto 2.2. "Studi sull'utilizzo pulito di combustibili fossili, cattura e sequestro della CO₂"

Rapporto Tecnico "Sviluppo di dispositivi per la rimozione di tar e particolato contenuti nel syngas proveniente da impianti di gassificazione"

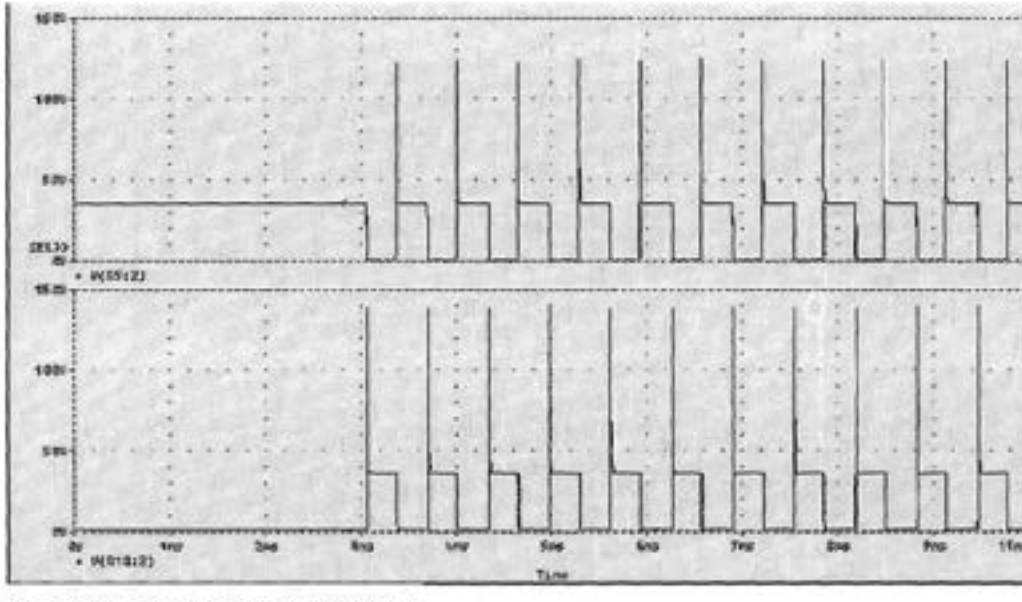


Fig. 10: Impulsi di innesco dei thyatron.

Come si vede dalla Figura 10, gli impulsi corrispondenti all'innesco di thyatron diversi sono ben distanziati.

Per la generazione degli impulsi così come illustrati in Figura 10 è possibile utilizzare un generatore astabile in grado di produrre un'onda quadra alla frequenza di 2 KHz.

Nella Figura 11 è riportato un dettaglio costruttivo del multivibratore astabile

Tema di ricerca "Tecnologie innovative che consentono la riduzione dei costi di investimento nelle centrali a polverino di carbone", Progetto 2.2. "Studi sull'utilizzo pulito di combustibili fossili, cattura e sequestro della CO₂"

Rapporto Tecnico "Sviluppo di dispositivi per la rimozione di tar e particolato contenuti nel syngas proveniente da impianti di gassificazione"

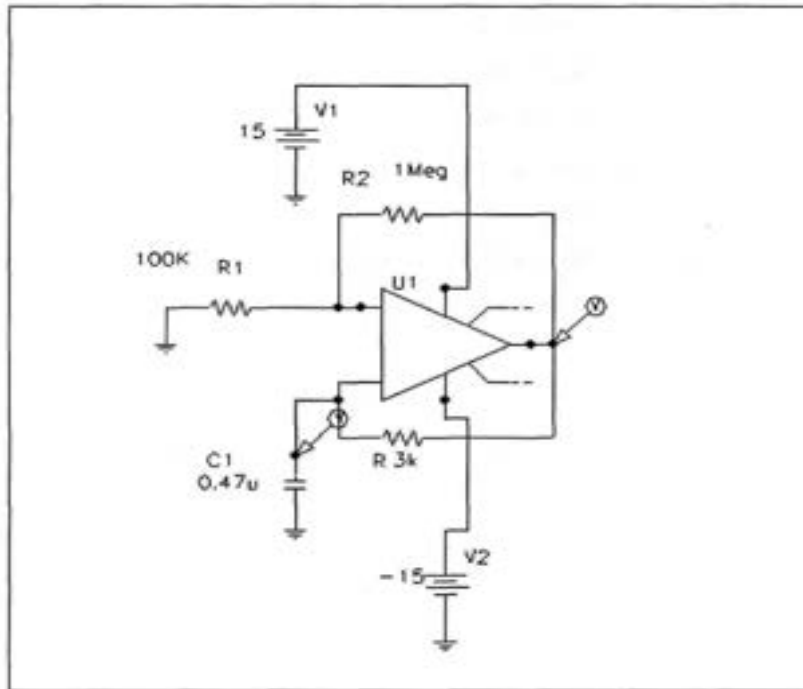


Fig. 11: Multivibratore astabile, dettaglio.

In Figura 12 è riportata una simulazione di prova dell'astabile. L'aggiunta degli stadi a valle ha comportato la crescita del transitorio visibile nel circuito completo.

Tema di ricerca “*Tecnologie innovative che consentono la riduzione dei costi di investimento nelle centrali a polverino di carbone*”, Progetto 2.2. “*Studi sull’utilizzo pulito di combustibili fossili, cattura e sequestro della CO₂*”

Rapporto Tecnico “*Sviluppo di dispositivi per la rimozione di tar e particolato contenuti nel syngas proveniente da impianti di gassificazione*”

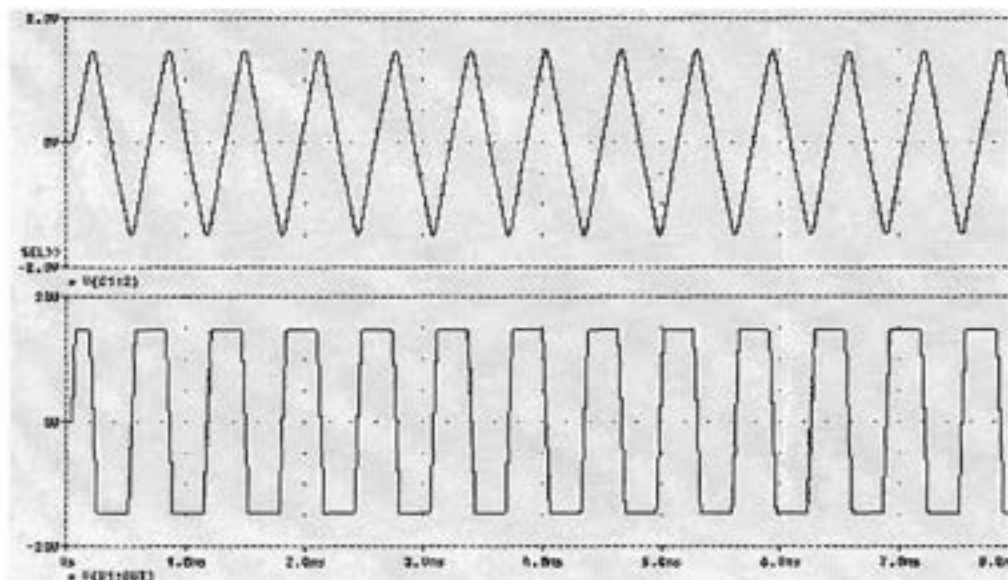


Fig. 12: Simulazione di prova del multivibratore astabile.

Lo stadio successivo deve fare in modo che i due finali non vadano in conduzione contemporaneamente. È infatti il passaggio dalla interdizione alla conduzione dei mosfet di uscita che permette di avere gli impulsi desiderati (quando il mosfet è interdetto, la corrente passa dal generatore in continua a terra attraverso le resistenze e l'induttanza in serie; quando il mosfet entra in conduzione sottrae corrente al ramo a cui è attaccato tramite il drain, provocando l'impulso di tensione sull'induttore). La soluzione proposta, riportata in Figura 13 insieme con la simulazione di prova riportata in Figura 14, è di inserire un invertitore a mosfet in modo che quando l'ingresso di un finale è alto, quello dell'altro sia basso, inoltre la presenza di uno stadio in più su un ramo introduce un piccolo ritardo che permette ai finali di non commutare contemporaneamente, garantendo così una migliore continuità degli alimentatori

Tema di ricerca “Tecnologie innovative che consentono la riduzione dei costi di investimento nelle centrali a polverino di carbone”, Progetto 2.2. “Studi sull’utilizzo pulito di combustibili fossili, cattura e sequestro della CO₂”

Rapporto Tecnico “Sviluppo di dispositivi per la rimozione di tar e particolato contenuti nel syngas proveniente da impianti di gassificazione”

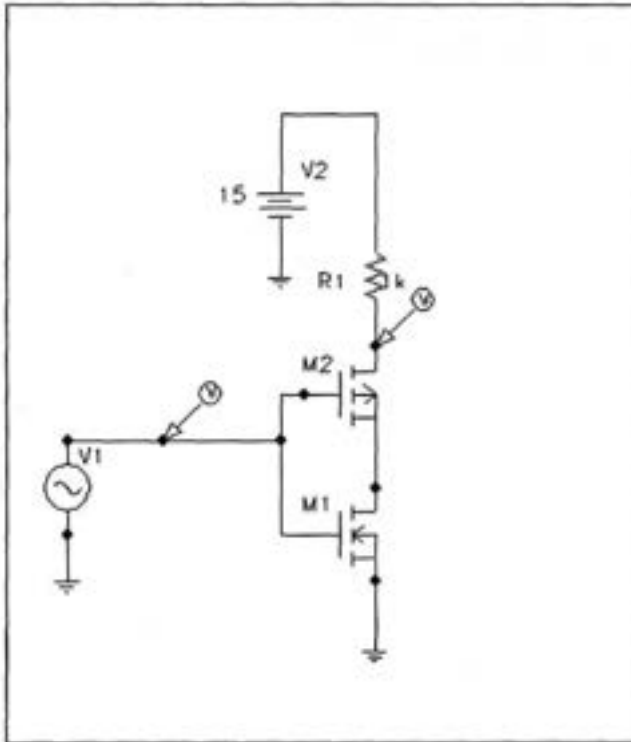


Fig. 13: Schema dell' inverter a mosfet (MTP6N60E).

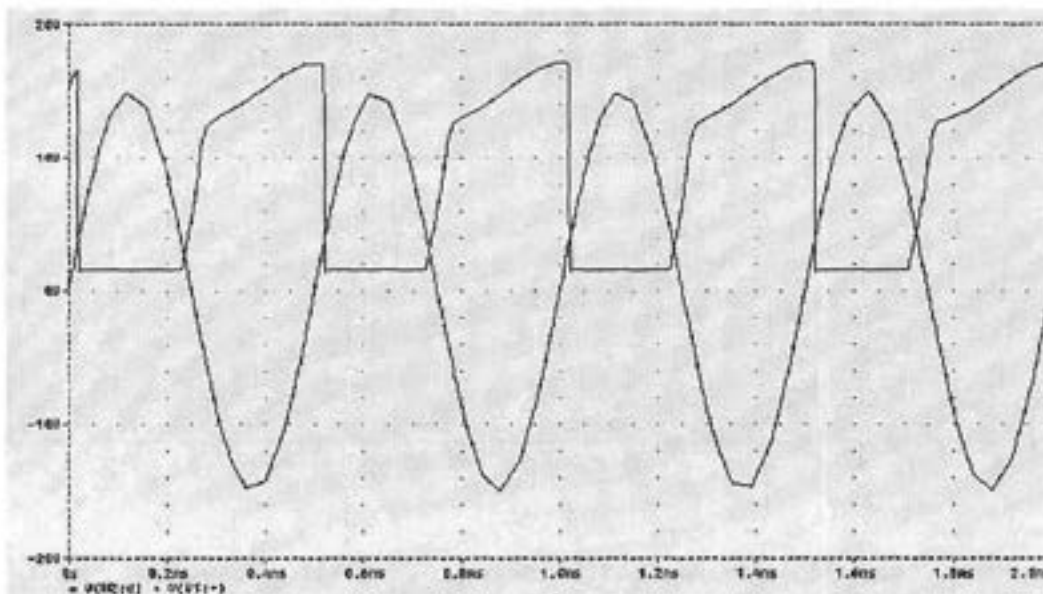


Fig. 14: Simulazione di prova dell'inverter a mosfet alimentato da un generatore di tensione che simula l'astabile.

Tema di ricerca “*Tecnologie innovative che consentono la riduzione dei costi di investimento nelle centrali a polverino di carbone*”, Progetto 2.2. “*Studi sull’utilizzo pulito di combustibili fossili, cattura e sequestro della CO₂*”

Rapporto Tecnico “*Sviluppo di dispositivi per la rimozione di tar e particolato contenuti nel syngas proveniente da impianti di gassificazione*”

Ipotesi elettrica e meccanica per un reattore a plasma freddo basato su scarica corona pulsata:

Il generatore di alta tensione

Un circuito molto semplice per la generazione dell’alta tensione è riportato in Figura 15, il funzionamento del circuito è il seguente:

I due diodi D1 e D2 e i due condensatori C1 e C2 hanno la funzione di raddoppiare la tensione. I due condensatori sono infatti caricati in parallelo alla tensione di picco della rete (c.a. 300V) e poi posti in serie nel circuito di scarica portando la tensione a c.a. 600V idonea per alimentare il primario di un trasformatore elevatore. Le due resistenze R1, R2 e il condensatore C3 hanno la funzione di fornire la tensione di 30 necessaria per l’innesco del diac dopo che i due condensatori C1 e C2 si sono caricati. In pratica il piccolo condensatore C3 viene caricato attraverso la R3 e quando la tensione raggiunge i 30V il diac va in conduzione e fornisce l’impulso di controllo al thyristore. A questo punto entrambi i condensatori C1 e C2 si scaricano attraverso il primario del trasformatore fornendo sul secondario l’alta tensione. Quando i condensatori sono scarichi e la tensione di rete passa per lo zero, il thyristore va in interdizione e il ciclo ricomincia.

La resistenza R3 ha la funzione di imitatrice di corrente.

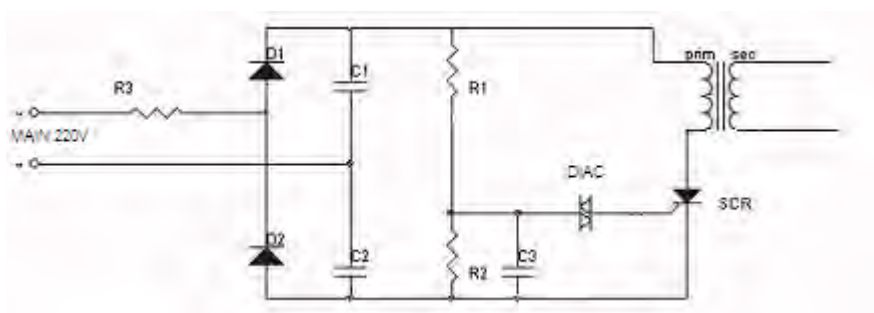


Figura 15: Circuito per la generazione dell’alta tensione

Tema di ricerca “*Tecnologie innovative che consentono la riduzione dei costi di investimento nelle centrali a polverino di carbone*”, Progetto 2.2. “*Studi sull’utilizzo pulito di combustibili fossili, cattura e sequestro della CO₂*”

Rapporto Tecnico “*Sviluppo di dispositivi per la rimozione di tar e particolato contenuti nel syngas proveniente da impianti di gassificazione*”

Il generatore di impulsi ad alta tensione

Per quanto riguarda la generazione degli impulsi ad alta tensione necessari alla generazione del plasma l’utilizzo di un semplice spark-gap, come già descritto, è sicuramente la soluzione più economica, in questo caso lo spark-gap potrà essere costituito da due elettrodi ad opportuna distanza posizionati all’interno di un piccolo recipiente a tenuta pressurizzato con idrogeno. Sarà comunque necessario disporre anche di un opportuno sistema di alimentazione e di controllo della pressione dell’idrogeno all’interno del contenitore in cui è alloggiato lo spark-gap.

Nel caso di utilizzo di un thyatron, sarà necessario predisporre un circuito di innesco, anche in questo caso si può utilizzare o un circuito elettronico per la generazione degli impulsi o di un più semplice, ma efficace circuito LCR (Induttivo-capacitivo-resistivo) come mostrato in Figura 16 [23].

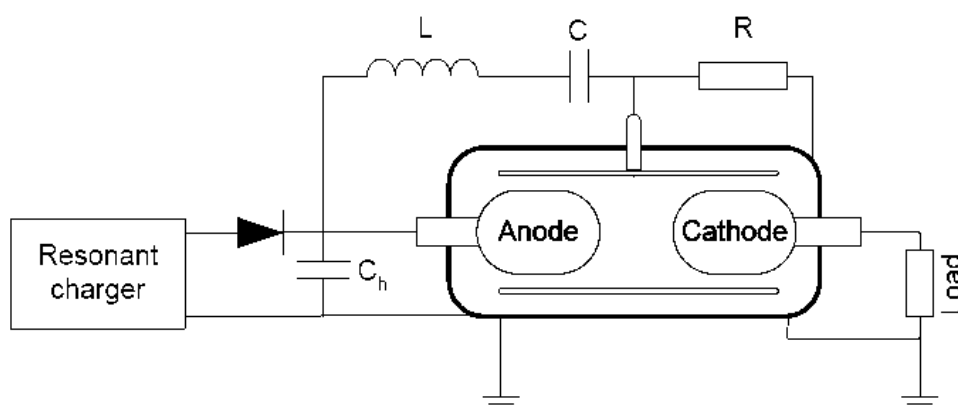


Fig. 16: esempio di connessione e controllo dello spark-gap.

Sistema di trasmissione degli impulsi di alta tensione

Un sistema semplice che preveda l’utilizzo di una tensione massima fino a 30kV può fare a meno dell’utilizzo di una linea di trasmissione a trasformatore (TLT), inoltre come precedentemente descritto, i problemi di compatibilità di accoppiamento tra generatore e reattore possono essere ridotti mantenendo la linea di trasmissione la più corta possibile, si può quindi pensare di realizzare una apparecchiatura dove i condensatori di immagazzinamento dell’alta tensione, lo spark-gap e il reattore sono tra loro integrati.

Tema di ricerca “*Tecnologie innovative che consentono la riduzione dei costi di investimento nelle centrali a polverino di carbone*”, Progetto 2.2. “*Studi sull’utilizzo pulito di combustibili fossili, cattura e sequestro della CO₂*”

Rapporto Tecnico “*Sviluppo di dispositivi per la rimozione di tar e particolato contenuti nel syngas proveniente da impianti di gassificazione*”

Il reattore

Il reattore è stato pensato cilindrico con configurazione degli elettrodi del tipo filo-tubo. Il diametro di ciascun reattore è stato mantenuto su valori contenuti (25 mm) al fine di poter generare un plasma corona sufficientemente intenso, con tensioni massime di 30kV. Per raggiungere le portate desiderate con i tempi di residenza richiesti è stato pertanto necessario disporre di più reattori corona in parallelo.

Un dimensionamento di massima del reattore può essere effettuato sulla base di alcune ipotesi come di seguito riportato.

Ipotesi di dimensionamento:

Portata gas: 250 SLM

Tempo residenza minimo nel reattore: 1s

Particolare attenzione va posta nella lavorazione e in tutti i dettagli al fine di ridurre al massimo la presenza di spigoli che possono dare origine a scariche a scintilla.

Su questa base sono stati quindi disegnati i vari componenti meccanici del reattore

Il reattore è costituito da 10 tubi diametro interno 25 mm e lunghezza 900 mm (Figura 17). Il filo dell’elettrodo è in acciaio inox di diametro 0.8 mm e fissato a due piastre porta elettrodo, sempre in acciaio inox, mediante delle viti M3 (lunghezza 5 mm) a testa stondata.

La piastra porta-elettrodi è costituita da un disco di acciaio inox di spessore 5 mm con bordi stondati. La piastra è fissata al reattore tramite un cilindro di isolamento in teflon di diametro 90 mm e altezza 70 mm, mediante 4 viti a testa svasata M5 (lunghezza 15 mm).

Tema di ricerca “Tecnologie innovative che consentono la riduzione dei costi di investimento nelle centrali a polverino di carbone”, Progetto 2.2. “Studi sull’utilizzo pulito di combustibili fossili, cattura e sequestro della CO₂”

Rapporto Tecnico “Sviluppo di dispositivi per la rimozione di tar e particolato contenuti nel syngas proveniente da impianti di gassificazione”

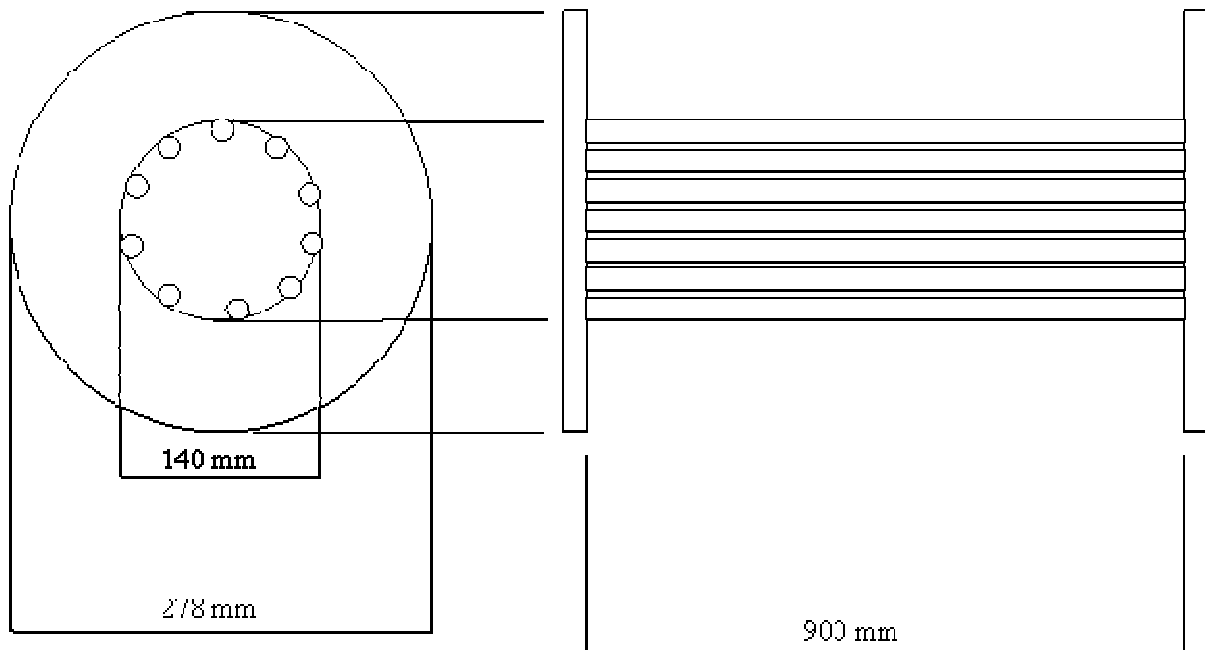


Fig. 17: Reattore corona: disposizione dei tubi-reattore

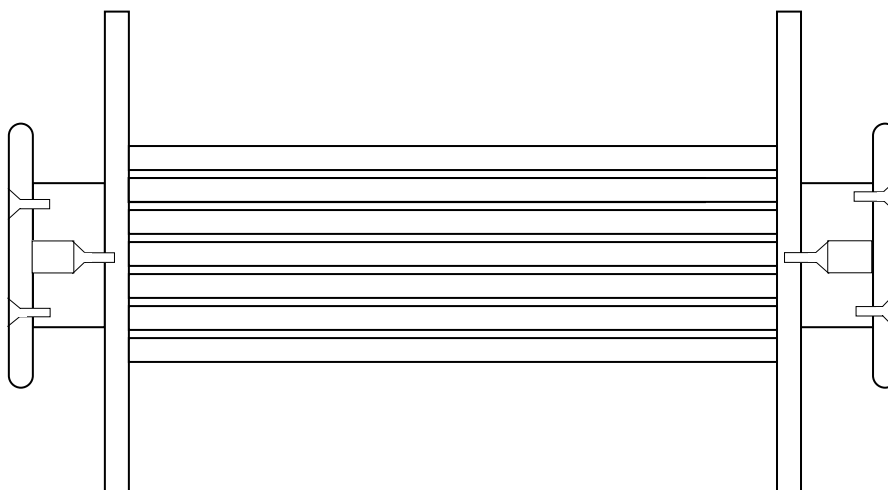


Fig 18: Reattore corona completo di piastre porta elettrodi.

Tema di ricerca “*Tecnologie innovative che consentono la riduzione dei costi di investimento nelle centrali a polverino di carbone*”, Progetto 2.2. “*Studi sull’utilizzo pulito di combustibili fossili, cattura e sequestro della CO₂*”

Rapporto Tecnico “*Sviluppo di dispositivi per la rimozione di tar e particolato contenuti nel syngas proveniente da impianti di gassificazione*”

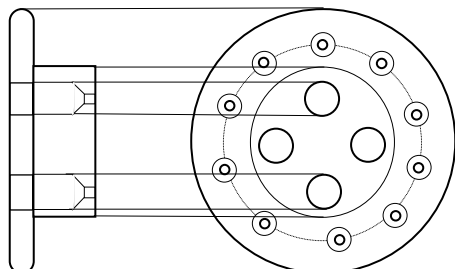


Fig. 19: Particolare delle piastre porta elettrodi e del cilindro di isolamento

Il reattore è chiuso da due coperchi, sempre in inox, dove sono presenti le connessioni del gas da trattare.

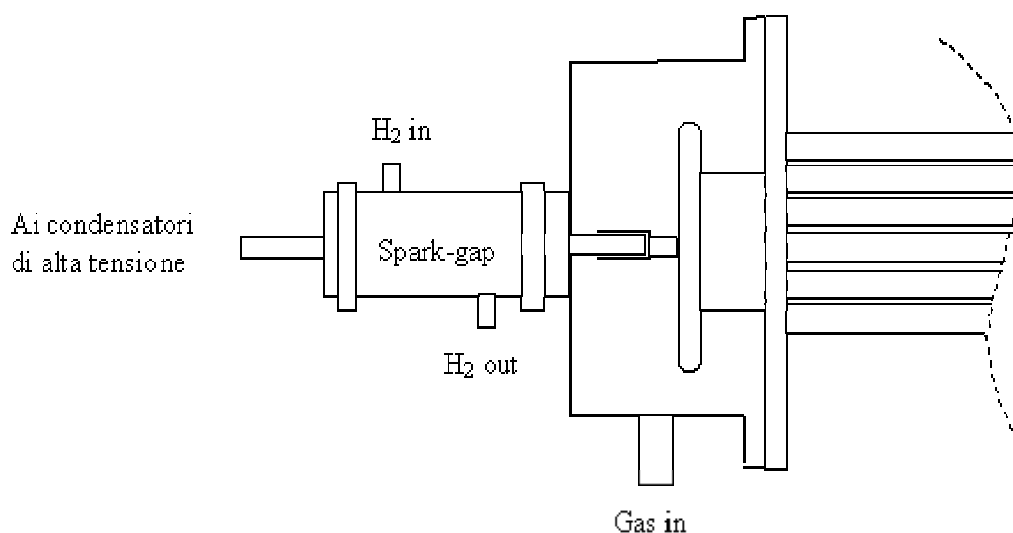


Fig. 20: Reattore corona: piastra di testa

Sulla piastra di testa è presente il jack della connessione ad alta tensione tra il generatore di impulsi e la piastra collettore degli elettrodi.

I condensatori di immagazzinamento dell’energia ad alta tensione, il generatore di impulsi e la corrispondente linea di trasmissione sono tutti posizionati solidalmente al reattore, al fine di minimizzare la lunghezza delle connessioni.

Tema di ricerca *“Tecnologie innovative che consentono la riduzione dei costi di investimento nelle centrali a polverino di carbone”*, Progetto 2.2. *“Studi sull’utilizzo pulito di combustibili fossili, cattura e sequestro della CO₂”*

Rapporto Tecnico *“Sviluppo di dispositivi per la rimozione di tar e particolato contenuti nel syngas proveniente da impianti di gassificazione”*

PRINCIPALI SOGGETTI COINVOLTI

In questa sezione si specificheranno le attività eventualmente affidate a soggetti esterni, e se ne evidenzierà (in grande sintesi) lo specifico contributo.

Nei soggetti esterni si intendono compresi sia i cobeneficiari che i subcontraenti (principali), che (eventuali) partner senza contributo.

Tema di ricerca “*Tecnologie innovative che consentono la riduzione dei costi di investimento nelle centrali a polverino di carbone*”, Progetto 2.2. “*Studi sull’utilizzo pulito di combustibili fossili, cattura e sequestro della CO₂*”

Rapporto Tecnico “*Sviluppo di dispositivi per la rimozione di tar e particolato contenuti nel syngas proveniente da impianti di gassificazione*”

3. MODIFICHE E VARIANTI AL PROGETTO

In questa sezione dovranno essere discussi e motivati gli elementi che hanno comportato (eventuali) modifiche e varianti (solo se SOSTANZIALI) rispetto alle previsioni:

- # variazioni PROGRAMMATICHE, ovvero cambiamenti nei contenuti tecnici delle attività di ricerca.
- # variazioni ECONOMICHE, ovvero cambiamenti nei costi previsti, ammessi soltanto nella distribuzione dei costi tra i diversi obiettivi del tema di ricerca e/o tra le diverse voci di costo; naturalmente, il riferimento è rispetto alla rendicontazione che viene approntata parallelamente a questo rapporto tecnico di sintesi.

Tema di ricerca *“Tecnologie innovative che consentono la riduzione dei costi di investimento nelle centrali a polverino di carbone”*, Progetto 2.2. *“Studi sull’utilizzo pulito di combustibili fossili, cattura e sequestro della CO₂”*

Rapporto Tecnico *“Sviluppo di dispositivi per la rimozione di tar e particolato contenuti nel syngas proveniente da impianti di gassificazione”*

4. DIFFUSIONE DEI RISULTATI

In questa sezione si descriverà quanto fatto per la diffusione dei risultati si riportano in questa sezione anche le pubblicazioni su rivista e le presentazioni a congressi e convegni.

Tema di ricerca “*Tecnologie innovative che consentono la riduzione dei costi di investimento nelle centrali a polverino di carbone*”, Progetto 2.2. “*Studi sull’utilizzo pulito di combustibili fossili, cattura e sequestro della CO₂*”

Rapporto Tecnico “*Sviluppo di dispositivi per la rimozione di tar e particolato contenuti nel syngas proveniente da impianti di gassificazione*”

5. BIBLIOGRAFIA

In questa sezione si riporterà l’elenco di documenti e rapporti tecnici di riferimento

V

1. P. De Filippis, et al. Tecniche di campionamento e rimozione di tar e particolato contenuti nel syngas da gassificazione del carbone. Report RdS/2010/22. (http://old.enea.it/attivita_ricerca/energia/sistema_elettrico/Gassificazione-carbone/23_DICMRO1_RT_5252_CLEANUP.pdf).
2. E.J.M. van Heesch, et al. Pulsed corona for sustainable technology. J. Tech. Phys. 41(1), 2000, 273-292.
3. A.J.M. Pemen, et al. Cracking of heavy tar components in biogas by means of pulsed corona discharges. XIII International Conference on Gas Discharge and Their Applications. Glasgow, UK, 3-8 September 2000, pp. 724-727.
4. K. Yan, et al. Evaluation of pulsed power supply for producing non-thermal plasma by using positive pulsed streamer corona, J. Adv. Oxidat. Technol. 4(3), 1999, 312-318.
5. E. M. van Veldhuizen. Electrical Discharges for Environmental Purposes: Fundamentals and Applications. Nova Science Publishers, New York (2000).
6. A.J.M. Pemen, et al. Pulsed corona discharges for tar removal from biomass derived fuel gas. Plasmas and Polymers 8(3), 2003, 209-224.
7. H. Akiyama, et al. Industrial applications of pulsed power technology. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation 14(5), 2007, 1051-1064.
8. K. Yan, et al. Elements of pulsed corona induced non-thermal plasmas for pollution control and sustainable development. Journal of Electrostatics 51-52, 2001, 218-224.
9. M. Goldman, A. Goldman, R. S. Sigmond. The corona discharge, its properties and specific uses. Pure & Appl. Chem. 57(9), 1985, 1353-1362.
10. E.M. van Veldhuizen, W.R. Rutgers. Pulsed positive corona streamer propagation and branching. J. Phys. D: Appl. Phys. 35, 2002, 2169-2179.
11. K. Yan, E.J.M. van Heesch, A.J.M. Pemen. Corona induced non-thermal plasma for pollution control and sustainable technology. 8th Int. Conf. on Electrostatic Precipitation. May 14-17, 2001.
12. K. Yan, E.J.M. van Heesch, A.J.M. Pemen. Bridging the gap of corona plasma applications: from corona characteristics, chemical kinetic to high-voltage pulsed power generator and plasma reactor. IEE Pulsed power 2001. May 1-2, 2001, London, UK.
13. N. Grass, W. Hartmann, M. Klöckner. Application of Different Types of High-Voltage Supplies on Industrial Electrostatic Precipitators. IEEE Transactions on Industry Applications 40(6), 2004, 1513-1519.
14. K. Yan, et al. A 10 kW high-voltage pulse generator for corona plasma generation. Review of Sci. Instruments 72, 2001, 2443-2447.

Tema di ricerca “*Tecnologie innovative che consentono la riduzione dei costi di investimento nelle centrali a polverino di carbone*”, Progetto 2.2. “*Studi sull’utilizzo pulito di combustibili fossili, cattura e sequestro della CO₂*”

Rapporto Tecnico “*Sviluppo di dispositivi per la rimozione di tar e particolato contenuti nel syngas proveniente da impianti di gassificazione*”

15. S.A. Nair, et al. A high-temperature pulsed corona plasma system for fuel gas cleaning. *Journal of Electrostatics* 61(2), 2004, 117-127.
16. S.A. Nair, Corona plasma for tar removal. Ph.D. Thesis, Eindhoven University of Technology, 2004.
17. A.L. Donaldson, T.G. Engel, N. Kristiansen. State-of-the-art insulator and electrode materials for use in high current high energy switching. *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 25(1), 1989, 138-141.
18. K. Yan, et al. A 2.0 kV pulsed corona system for inducing chemical reactions. 35th IEEE Industry Application Society annual meeting, Rome, Italy, October 8-12, 2000, 592-599.
19. K. Yan, et al. Development of a 10 30 kV corona plasma system. The 3rd Int. Symp. On Non-Thermal Plasma Technology for Pollution Control, April 23-27, 2001, Korea.
20. K. Yan, et al. From chemical kinetics to streamer corona reactor and voltage pulse generator. *Plasma Chemistry and Plasma Processing* 21, 2001, 107-137.
21. J.C. Martin, M. Kristiansen, A. Guenther. Solid, Liquid, and Gaseous Switches-AF Pulsed Power Lecture Series 30. Lubbock, TX: Texas Tech. Univ., 1981.
22. F. Falasca. Progetto di un generatore a scarica corona per l’abbattimento di inquinanti gassosi nei prodotti di combustione. Tesi di laurea. Università Roma 3, AA 1999-2000.
23. G.J.J. Winands, et al. Repetitive, triggered, long life-time spark-gap switch for pulsed power applications. XXVIIth ICPIG, Eindhoven, the Netherlands, July 18-22, 2005. Topic number 18.