



Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia
e lo sviluppo economico sostenibile



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Modifiche all'Impianto MICOS per testare
bruciatori non convenzionali di tipo Trapped Vortex

Emanuele Giulietti, Caterino Stringola

Report RdS/2012/233

MODIFICHE ALL'IMPIANTO MICOS PER TESTARE BRUCIATORI NON CONVENZIONALI DI TIPO TRAPPED
VORTEX

Emanuele Giulietti, Caterino Stringola

Settembre 2012

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, la cattura ed il sequestro della CO₂

Responsabile del Progetto: Stefano Giammartini, ENEA

Indice

Sommario	4
1 Introduzione	4
2 Descrizione del bruciatore e dell'impianto	5
2.1 <i>Descrizione del prototipo TVC</i>	5
2.2 <i>Il sistema di evacuazione dei fumi</i>	9
2.3 <i>La struttura di sostegno dei componenti</i>	10
2.4 <i>Le linee di alimentazione strumentale</i>	10
2.5 <i>I preriscaldatori dell'aria</i>	11
2.6 <i>Il quadro di controllo</i>	12
3 Conclusioni	13
4 Riferimenti bibliografici	13

Sommario

L'impianto MICOS (Multipurpose Installation for Combustion Studies) è un impianto multifunzionale ideato per prove di combustione ad alta temperatura.

Il presente documento contiene la descrizione del un nuovo bruciatore non convenzionale di tipo Trapped-Vortex alimentato a syngas, e delle modifiche all'impianto sperimentale MICOS resesi necessarie per l'installazione dello stesso ([1], [2]).

1 Introduzione

L'attività di ricerca svolta è mirata allo sviluppo di un Combustore Trapped Vortex (TVC) che dovrà funzionare con syngas ricchi di idrogeno, provenienti dalla gassificazione di carbone, ma non solo, caratterizzato da alta efficienza e basse emissioni.

All'interno della cavità del bruciatore a geometria TVC si sviluppa un vortice principale la cui presenza e la cui intensità favoriscono il mescolamento tra gas ed aria, favorendo quindi una combustione efficiente, più omogenea e quindi a più basse emissioni.

Le differenze di una combustione a syngas anziché a gas naturale sono principalmente due:

- A parità di potenza, la portata di combustibile deve essere 4-8 volte maggiore rispetto al gas naturale, a causa del più basso potere calorifico.
- La combustione premiscelata di gas naturale e aria è uno dei metodi più utilizzati per il contenimento delle emissioni di NO_x, attraverso il mantenimento di temperature di fiamma sufficientemente basse. Questa tecnica non può essere utilizzata con il syngas per la presenza significativa di idrogeno ed il conseguente pericolo di ritorno di fiamma nei sistemi di iniezione. Per questo motivo è necessario ricorrere a fiamme diffusive non premiscelate, utilizzando diluenti come azoto, anidride carbonica e vapore, per contenere le temperature di fiamma e quindi gli NO_x.

Entrambi i fattori comportano un incremento delle portate e creano problemi di esercizio al compressore.

Rispetto alle problematiche esposte, la tecnologia trapped vortex presenta diversi vantaggi:

1. È possibile bruciare una grande varietà di combustibili a medio e basso potere calorifico.
2. Si può operare in regime di combustione premiscelata povera di combustibile, data la capacità di sostenere velocità di immissione molto elevate, che scongiurano il pericolo di ritorno di fiamma.
3. Le emissioni di NO_x raggiungono livelli estremamente bassi senza l'aggiunta di gas diluenti o di trattamenti di post-combustione.
4. Produce l'estensione dei limiti di spegnimento e una migliore stabilità di fiamma.

La composizione del syngas varia a seconda del tipo di carbone e dei trattamenti ai quali questo è sottoposto. Il rapporto volumetrico H₂/CO varia tra 0.33 e 40, i gas di diluizione sono compresi nel range 4% - 51% ed anche l'acqua varia tra lo 0% e il 40%.

Tutte le tecniche di gassificazione possono essere classificate in due gruppi principali a seconda del sistema di gassificazione: gassificazione vapore/aria e gassificazione vapore/ossigeno. La composizione del gas derivante da questi processi è diversa a seconda che si usi aria oppure ossigeno come fluido di gassificazione. Nel caso che venga utilizzata l'aria, il syngas presenta una elevata percentuale di azoto ed un basso potere calorifico. Se viene utilizzata la miscela vapore/ossigeno, la quantità di azoto è nettamente minore ed il potere calorifico è ovviamente maggiore.

La variabilità nella composizione del syngas influenza in modo sostanziale il processo di combustione. Diverse composizioni daranno differenti risultati per quanto riguarda l'instabilità di combustione, blowoff, flasback, la struttura della fiamma e la formazione di specie inquinanti. Questo aspetto è particolarmente importante nel caso dei turbogas, in quanto questi dispositivi sono generalmente ottimizzati per avere bassi livelli di emissione. Il problema del blowout (spegnimento) è rilevante nel caso dei combustori a bassa emissione, in quanto questi operano spesso molto vicini alla condizione di spegnimento.

Per syngas con alte percentuali di idrogeno è poi presente il rischio di propagazione della fiamma controcorrente (flashback). Per questo motivo un combustore progettato per bruciare syngas povero di idrogeno, necessiterà di una riprogettazione nel caso lo si voglia esercire con syngas ricchi di idrogeno.

Le alte temperature che si ottengono nel caso di combustione di H_2 possono creare problemi di emissione di NO_x , per limitare le quali si può diluire con corrente di vapore.

Come noto, i turbogas operanti in condizioni di premiscelazione magra, abbattano fortemente la produzione di inquinanti; tuttavia sorgono problemi legati alla sicurezza dovuti alla instabilità della combustione.

Tutto ciò rende chiaro quanto sia importante la comprensione dei meccanismi di reazione chimica, finalizzata ad ottenere modelli che coprano un ampio range di condizioni di funzionamento, nello sviluppo di tecnologie per la combustione pulita di syngas.

Il TVC progettato è rivolto alle turbine a gas che utilizzano camere di combustione anulari. Il target di potenza è stato fissato a 100 kW, date le caratteristiche dell'impianto sperimentale sul quale il prototipo verrà montato e provato, in condizioni di pressione atmosferica. L'aria di combustione sarà alimentata a 700 K, corrispondente ad un rapporto di compressione di circa 20 bar, per simulare le reali condizioni operative. La tipologia di syngas che verrà studiata alimentando l'impianto con bombole sarà:

- Composizione: 19% H_2 – 31% CO – 50% N_2
- Potere calorifico inferiore (LHV) = 6 MJ/kg
- Range della portata massica del Syngas: 0.007–0.028 kg/s
- Range della portata volumetrica del Syngas (a $T=273$ K): 26.52 - 106 Nm^3/h
- Portata volumetrica massima: 110 Nm^3/h
- La portata nominale è di 0.014 kg/s = 50.4 kg/h

2 Descrizione del bruciatore e dell'impianto

Per lo studio dei fenomeni termo-fluidodinamici all'interno del nuovo prototipo di bruciatore TVC progettato è stato necessario effettuare alcune modifiche all'impianto MICOS preesistente [3].

Il nuovo impianto MICOS può essere qui di seguito descritto secondo i componenti principali:

1. il prototipo del bruciatore TVC,
2. il sistema di evacuazione fumi,
3. la struttura di sostegno dei componenti,
4. le linee di alimentazione strumentate,
5. i preriscaldatori dell'aria,
6. il quadro di controllo.

2.1 Descrizione del prototipo TVC

Il prototipo realizzato (Figura, Figura 2, eFigura 2), per semplicità costruttiva e di misura, è costituito da un settore rettificato della camera anulare. Esso risulta a sezione quadrata di dimensioni 190x190 mm. Tale configurazione si è rivelata la più efficace rispetto agli obbiettivi sopra esposti.

La tecnica più ovvia per realizzare il vortice nel volume che rappresenta la camera di combustione è quella di immettere uno o più flussi tangenziali. Si è pensato quindi di disporre due flussi tangenziali di aria i quali promuovono la formazione del vortice, mentre altri flussi contrapposti alternati di aria e syngas ne alimentano il cuore. Nella configurazione adottata si instaura un perfetto equilibrio tra l'azione dei flussi tangenziali, che tendono a generare il vortice, e l'azione dei flussi verticali che tendono a distruggerlo. E' bene sottolineare che è soprattutto il flusso tangenziale più distante dall'uscita ad essere determinante.

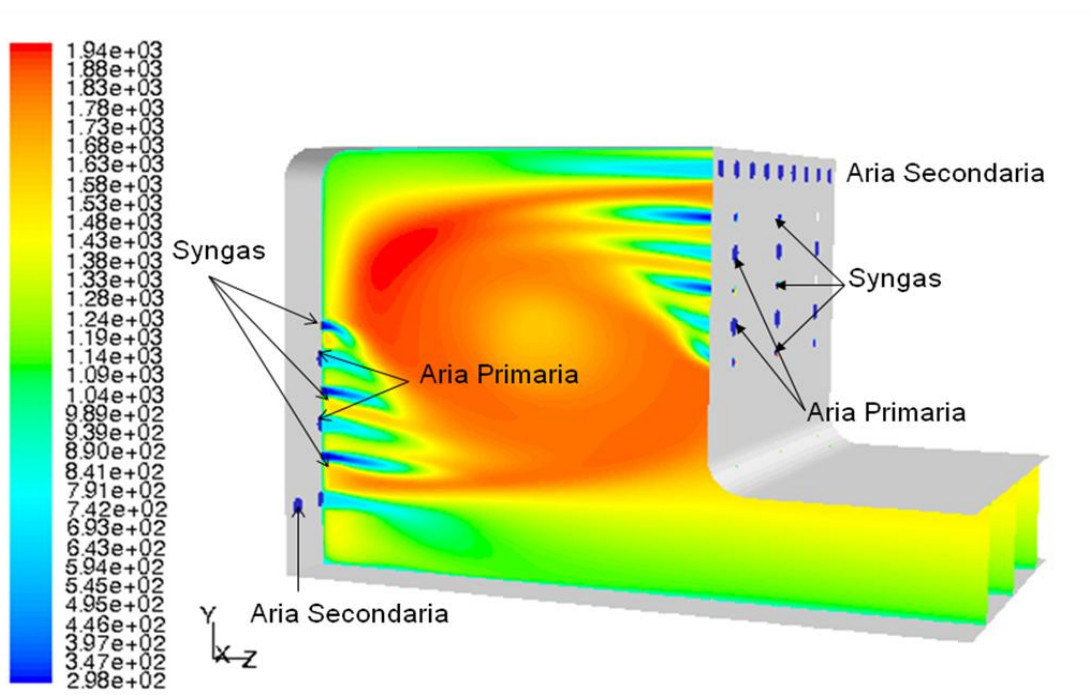


Figura 1: Prototipo TVC e campo di temperature [1].

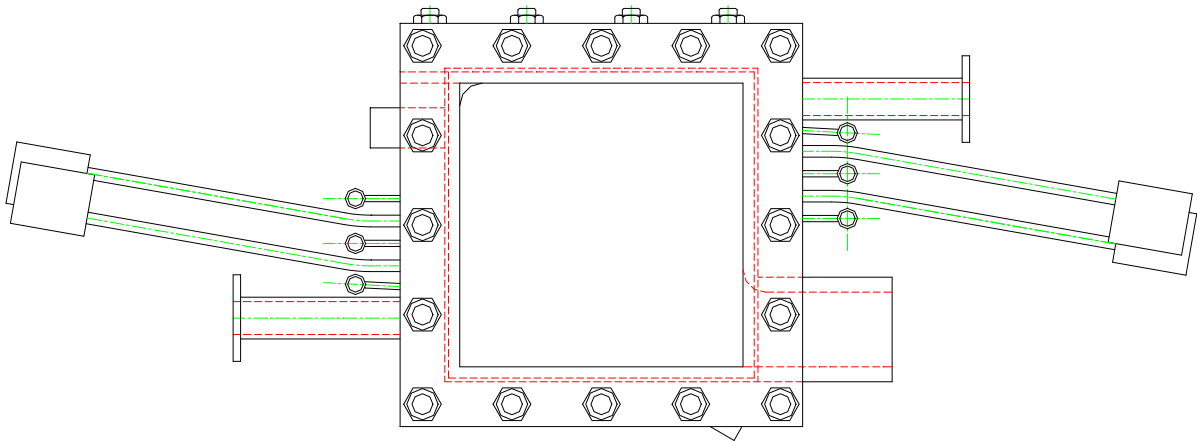


Figura 1: Disegno del prototipo TVC.

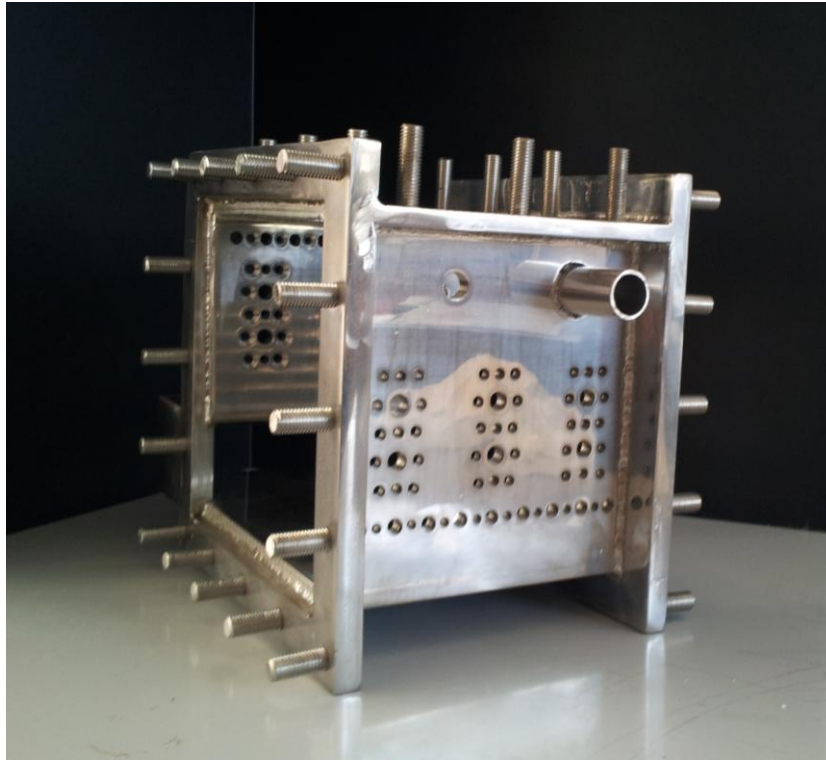


Figura 2: Prototipo TVC.

Il corpo bruciatore ha circa la forma di un parallelepipedo con una sezione nel senso dell'asse principale di forma quadrata. Le due pareti laterali sono costituite da due specole in quarzo ottico, una terza finestra sempre in quarzo è ricavata sulla faccia superiore del corpo bruciatore.

Sulle altre due facce contrapposte del bruciatore sono ricavati gli ugelli dell'aria secondaria, dell'aria primaria e del gas.

Su una delle due facce è ricavata una fessura utilizzata per lo scarico dei fumi esausti attraverso un breve condotto a sezione rettangolare.

Sulla faccia opposta vengono invece montati sia l'elettrodo di accensione che la fotocellula UV per la rilevazione di fiamma.

Sulle medesime facce sono stati realizzati gli ugelli di alimentazione dei fluidi. Come è possibile vedere dalla Figura 4, relativa alla faccia orientata verso lo scarico, sulla parete del corpo bruciatore sono ricavati i fori in cui vengono inseriti gli ugelli dei fluidi.

La fila di fori superiore è quella attraverso cui è alimentata l'aria di combustione secondaria, nella Figura 4 è indicata con la lettera (A), si tratta di 9 fori di diametro 8,4 mm.

Al di sotto di questa prima fila di fori sono ricavati altri 15 fori raggruppati in 5 differenti file, questi sono i fori che ospitano gli ugelli di aria primaria e gas

Gli ugelli dell'aria primaria di combustione sono quelli che vengono indicati in Figura 4 con la lettera (B), in totale 6 ugelli con diametro 7,8 mm su due file.

Le rimanenti tre file di fori sono quelli in cui si inseriscono gli ugelli di alimentazione del gas, in totale 9 fori su tre file, in figura indicate dalla lettera (C), con diametro 4,2 mm.

Gli ugelli ricavati sulla faccia opposta del corpo bruciatore sono identici come numero, diametro e posizione salvo che la loro disposizione è speculare a quella di questa faccia, allo scopo di ottenere un vortice all'interno della camera del bruciatore.

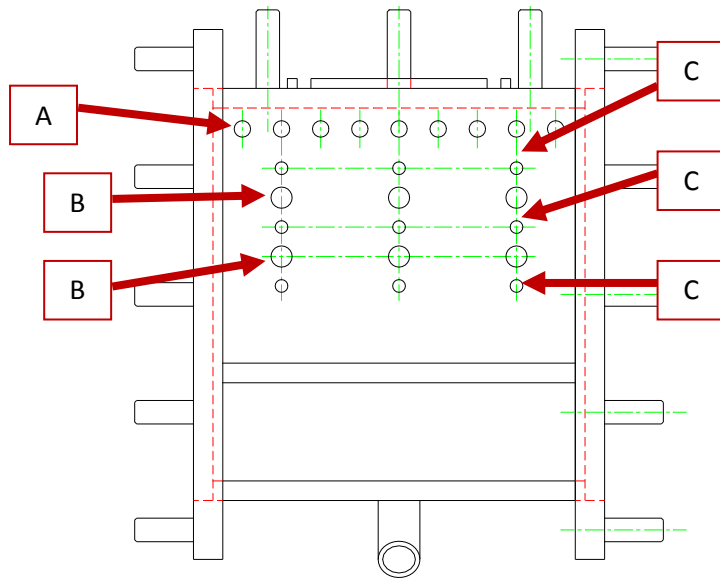


Figura 3: Disegno della faccia del prototipo TVC orientata verso lo scarico.

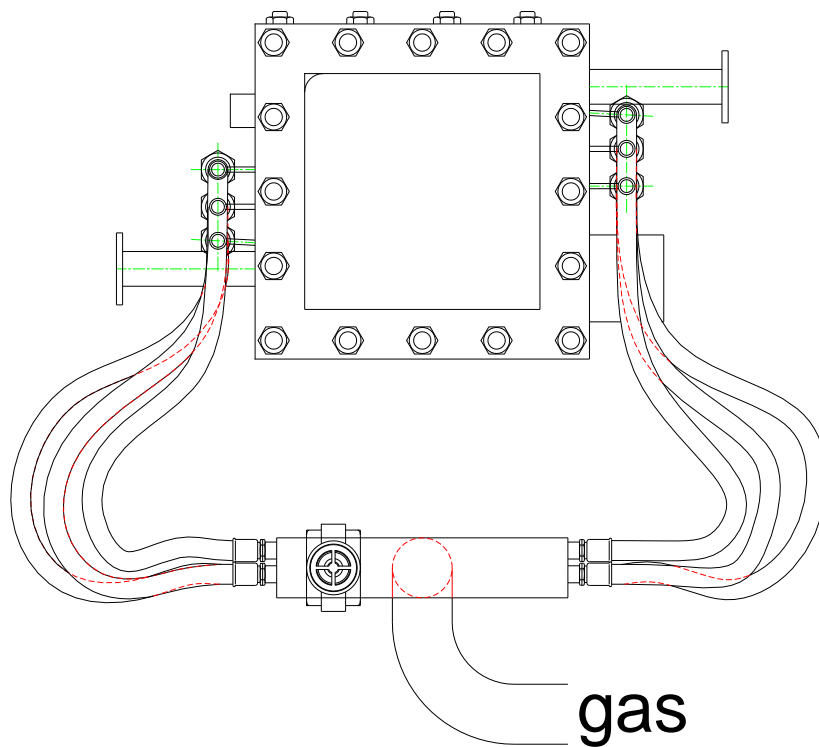


Figura 4: Distribuzione dei gas per il prototipo TVC realizzato.

Gli ugelli di alimentazione dei fluidi sono realizzati con condotti di diametro adeguato e collegati tra loro per mezzo di collettori di distribuzione.

Si è posta particolare attenzione ad ottenere una distribuzione agli ugelli il più uniforme possibile, si è cercato sempre di avere una perfetta simmetria nelle divisioni dei collettori in modo da bilanciare le perdite di carico.

I collettori di distribuzione agli ugelli sono stati collegati ai collettori principali per mezzo di un gran numero di flessibili.

Un esempio è visibile nella Figura 5, relativa alla distribuzione del gas. Come si vede il collettore principale si biforca esattamente al centro sotto il bruciatore e poi nuovamente sui due fianchi in rami uguali, sulle testate dei quattro rami così ottenuti si innestano tre flessibili uguali che si connettono due a due su entrambi i lati di ogni collettore di distribuzione.

2.2 Il sistema di evacuazione dei fumi

Il bruciatore TVC scarica i fumi a bocca libera questo per evitare che una eventuale contropressione ne alteri il funzionamento (Figura 5).

I fumi esausti sono raccolti direttamente da un collettore di diametro $\Phi=500$ mm, coassiale al bruciatore, che dopo un primo tratto orizzontale piega verso l'alto in modo da raggiungere un'altezza di circa 4 metri e scaricare i fumi oltre il colmo della tettoia dell'impianto.

Il materiale del collettore è AISI 304 e non presenta coibentazioni né interne né esterne, questo perché le basse temperature di processo e l'alto grado di diluizione non comportano surriscaldamenti della superficie.



Figura 5: Sistema di evacuazione dei fumi.

2.3 La struttura di sostegno dei componenti

La struttura di sostegno di tutti i componenti è realizzata in profilati metallici in due differenti parti, una per il sostegno del bruciatore TVC, del collettore di evacuazione dei fumi e della camera di combustione per il bruciatore ausiliario.

La seconda è realizzata a forma di rack per il sostegno delle linee di alimentazione e del quadro comando. Entrambe le strutture sono assicurate al suolo per mezzo di ancoraggi a pressione nella platea di appoggio collegati alle piastre di base, ciascuna saldata alla rispettiva colonna.

2.4 Le linee di alimentazione strumentale

A corredo del sistema sono state realizzate quattro linee di regolazione e misura per fluidi (Figura 6), una per l'aria ventilata, una per l'aria compressa, una per il syngas ed una per gas naturale o metano.

La linea di aria ventilata fa capo ad un ventilatore centrifugo ed è composta in serie da una valvola a farfalla manuale di parzializzazione o separazione, un pressostato di sicurezza, una flangia tarata di misura ed una valvola a globo micrometrica motorizzata per la regolazione della portata.

Le rimanenti 3 linee (syngas, aria compressa e gas naturale) sono costituite da: un flessibile antivibrations, una valvola a sfera di radice, due manometri (alta, bassa pressione), un pressostato (bassa pressione), un regolatore di pressione con valvola di protezione, una valvola elettromagnetica di blocco, uno o due misuratori di portata a galleggiante, una o due valvole elettromeccaniche di regolazione.

Le tre linee di regolazione e misura sono montate su di appositi sostegni a mensola collegati alle colonne della struttura.

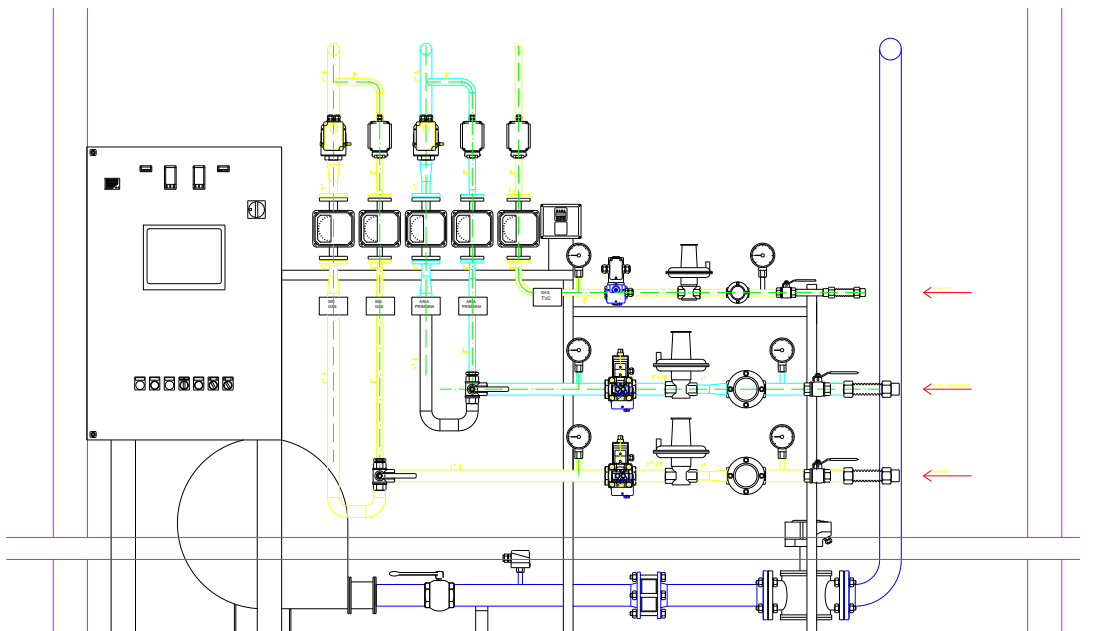


Figura 6: Schema delle linee di alimentazione dei gas.

Le caratteristiche delle linee di misura possono essere così riassunte:

PORTATA LINEE FLUIDI		
aria primaria ad alta portata	10 - 100	[Nm ³ /h]
aria primaria a bassa portata	2,4 - 24	[Nm ³ /h]
aria secondaria	10 - 300	[Nm ³ /h]
linea gas naturale (metano)	1,5 - 15	[Nm ³ /h]
linea syngas ad alta portata	11 - 110	[Nm ³ /h]
linea syngas a bassa portata	1,5 - 15	[Nm ³ /h]

2.5 I preriscaldatori dell'aria

Per esigenze di processo il bruciatore TVC dovrà essere alimentato sia con aria fredda che con aria di combustione preriscaldata. A questo scopo nel circuito di alimentazione delle due arie di combustione sono stati inseriti due preriscaldatori aria (Figura 8).

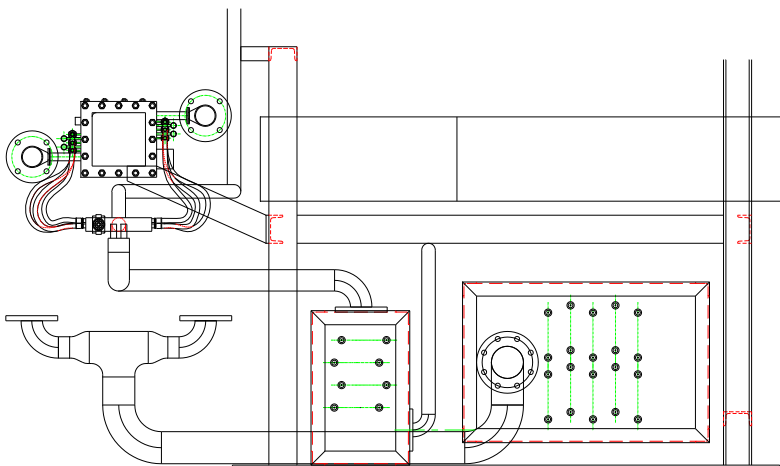


Figura 7: Schema dell'impianto con i preriscaldatori dell'aria.

Si tratta di due camere a forma di parallelepipedo di volume diverso ed opportuno in relazione alle portate delle due arie.

Internamente contengono delle resistenze elettriche ad "M" alettate di potenza considerevole, 10 nel preriscaldatore dell'aria secondaria e 4 in quello dell'aria primaria.

Per ogni preriscaldatore sono inserite due termocoppie, una nel corpo vero e proprio del preriscaldatore e l'altra nel collettore di uscita, la prima garantisce la sicurezza del preriscaldatore, la seconda invece è utilizzata per la regolazione di temperatura.

2.6 Il quadro di controllo

Nel quadro di controllo (Figura 8) sono inserite tutte le apparecchiature per il controllo delle sicurezze di funzionamento e l'alimentazione e comando delle apparecchiature in campo.

Nel quadro è altresì installato il PLC che controlla tutte le logiche di funzionamento necessarie alla regolazione ed alla gestione in sicurezza degli apparati del test rig. Il PLC è interfacciato all'utenza per mezzo di un pannello operatore touch-screen e la sua logica è articolata su di una serie di loop autonomi:

- **Loop 1** relativo al funzionamento con **gas naturale** di alimento al TVC. È costituito da una routine PID con display a quadro per la lettura della portata di gas istantanea, comandato manualmente con l'impostazione di un set fisso.
- **Loop 2** relativo al funzionamento con **syngas** di alimento al TVC. È costituito da una routine PID con display a quadro per la lettura della portata di gas istantanea, comandato manualmente con l'impostazione di un set fisso.
- **Loop 3** relativo al funzionamento dell'**aria primaria** di alimento al TVC. È costituito da una routine PID con display a quadro per la lettura della portata di aria istantanea, comandato manualmente con l'impostazione di un set fisso.
- **Loop 4** relativo al funzionamento dell'**aria secondaria** di alimento al TVC. È costituito da una routine PID con display a quadro per la lettura della portata di aria istantanea, comandato manualmente con l'impostazione di un set fisso.
- **Loop 5** relativo alla regolazione della **temperatura dell'aria primaria** al TVC. È costituito da una routine PID con display a quadro per la lettura della temperatura aria istantanea, comandato manualmente con l'impostazione di un set fisso.
- **Loop 6** relativo alla regolazione della **temperatura dell'aria secondaria** al TVC. È costituito da una routine PID con display a quadro per la lettura della temperatura aria istantanea, comandato manualmente con l'impostazione di un set fisso.
- **Sicurezze** comando di accensione del bruciatore TVC a quadro con spia di avvenuta accensione:
 - Gestione **accensione e rilevazione fiamma** per il bruciatore con centralina dedicata e blocco da quadro per mancanza aria o gas da pressostati.
 - Gestione delle tre rampe gas ed aria primaria con **controllo dei pressostati di minima e massima pressione**.
 - Gestione aria secondaria con **blocco di tutte le rampe gas** per mancanza aria segnalata dal pressostato.
 - Gestione **allarmi** con pagina grafica dedicata, storico allarmi e segnalazione acustica.

Tutte le funzioni descritte possono essere gestite per mezzo del pannello operatore direttamente sul fronte del quadro o in alternativa in remoto da un PC collegato al PLC per mezzo di un BUS (profibus) di trasferimento dati.



Figura 8: Il quadro elettrico di controllo.

3 Conclusioni

L'impianto MICOS è stato fortemente modificato per poter ospitare il prototipo di nuovo bruciatore a tecnologia TVC, e consentirà, nella prossima sperimentazione, di caratterizzare non solo i fenomeni di risonanza dei modi propri acustici all'interno della cavità del combustore Trapped Vortex, ma anche poter trarre alcune fondamentali conclusioni circa il comportamento dinamico del flusso all'interno della stessa cavità.

Le finestre ottiche al quarzo montate sulle facce del bruciatore consentiranno di poter utilizzare tecniche ottiche importanti quali ODC (Optical Diagnostics of Combustion), telecamere veloci, PIV ed LDA.

4 Riferimenti bibliografici

- [1] A. Di Nardo, G. Calchetti e C. Mongiello, "Progetto di una camera di combustione per turbogas alimentata a syngas di tipo trapped-vortex", Rapporto tecnico ENEA, COMSO/2011/006/EL, 2011.
- [2] A. Di Nardo, G. Calchetti, E. Giulietti e C. Mongiello, "Specifiche tecniche relative alla realizzazione del bruciatore trapped-vortex ed alle modifiche dell'impianto MICOS", Rapporto tecnico ENEA, COMSO/2012/006/EL, 2012.
- [3] E. Giulietti, S. Giammartini, G. Guidarelli, B. Sardella, V. Lombardi, A. Grasso, "Sviluppo di un bruciatore a Vortice Intrappolato per applicazione in Turbine a Gas: Realizzazione di una facility sperimentale di prova", Rapporto tecnico ENEA, Classificazione ENE-IMP EHI10004, 2010.