

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI FIRENZE
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Dipartimento di Energetica “S. Stecco”
Scuola di Dottorato in Ingegneria Industriale e dell’Affidabilità
XXIII Ciclo
TESI DI DOTTORATO

**“ SVILUPPO DI UNA GALLERIA INNOVATIVA
PER L’ANALISI SPERIMENTALE AVANZATA DI
COMPONENTI DI TORCE INDUSTRIALI ”**

Relatori:

Prof. Ing. ENNIO A. CARNEVALE

Dott. Ing. ANTONIO ANDREINI

Responsabile della scuola di Dottorato

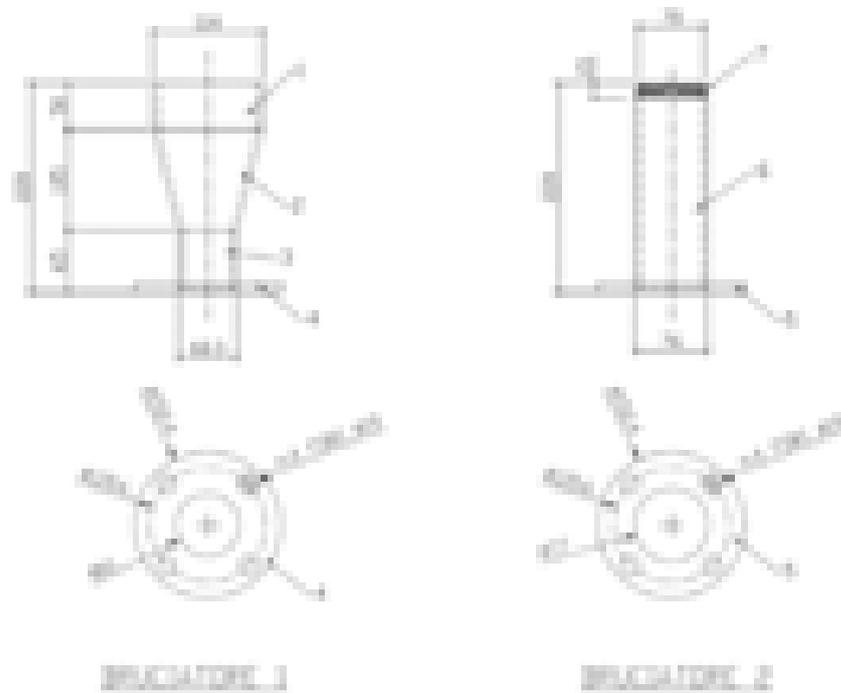
Prof. Ing. MARIO TUCCI

Candidato

Ing. FEDERICO TRIPPI

CAPITOLO 3:

PROGETTAZIONE E SPERIMENTAZIONE DI TESTE INDUSTRIALI DI NUOVA CONCEZIONE



Titolo:

“Sviluppo di una galleria innovativa per l’analisi sperimentale avanzata di componenti di torce industriali ”

3.1 PREFERAZIONE

L'attività di ricerca effettuata nelle prime parti del progetto ha avuto come oggetto l'acquisizione delle conoscenze innovative necessarie alla definizione di una nuova metodologia di progettazione integrata con i sistemi di analisi e simulazione studiata.

Come visto nel primo capitolo, avendo studiato e messo a punto una serie di procedure di progettazione basate sia su sistemi di avanprogetto con codici di calcolo zero dimensionale e correlazioni empiriche, sia su codici di simulazione tridimensionali per flussi reattivi non stazionari è stato quindi possibile disporre di tutti gli strumenti computazionali per la valutazione del fenomeno. I codici di calcolo di tipo FEM hanno invece permesso la progettazione integrata della parte strutturale dei prototipi di torce per tail gas.

3.2 PROGETTAZIONE AVANZATA DEL PILOTA INNOVATIVO PER TORCE INDUSTRIALI

Dall'esperienza riscontrata dalle prime accensioni di test della camera, validata da dati ottenuti con i sensori e con le analisi termografiche, e dalle misure di temperatura effettuate a varie altezze della camera di combustione del banco di studio a dimensioni ridotte, è stato possibile ottenere importanti indicazioni necessarie alla messa a punto e alla ricalibrazione dei software di simulazione termo fluido dinamica studiata. Al fine di sviluppare dei sistemi di torcia basati su criteri innovativi rispetto all'attuale stato dell'arte, il lavoro ha previsto la riprogettazione del tipo della torcia e dei sistemi di adduzione ad esso correlati. In prima battuta, l'attenzione si è concentrata sulla progettazione assistita con strumenti computazionali e quindi sulla realizzazione dei sistemi di generazione delle fiamme pilota. Per adempiere a tali step, la prima operazione è stata quella di ideare la geometria concettuale del pilota di nuova concezione. Al fine di raggiungere la geometria definitiva, complessivamente sono stati sviluppati 3 prototipi di pilota che hanno permesso di passare da sistemi di fiamma pienamente diffusivi, a quelli di nuova concezione che sono invece prettamente caratterizzati a un tipo di fiamma fortemente premiscelata. Per fare questo, si è preso come riferimento iniziale la struttura di un becco da laboratorio. Tramite opportune considerazioni è stato quindi possibile effettuare l'implementazione della geometria rispetto alle necessità introdotte dal tipo di tecnologie all'analisi.

3.2.1 GEOMETRIA DEL PILOTA DI NUOVA CONCEZIONE

Il corpo del dispositivo, per come è stato pensato, si compone fondamentalmente di tre moduli (vedi Figura 1) :

- Modulo 1: Condotto divergente di scarico
- Modulo 2: Sistema di aspirazione aria e condotto di premiscelazione
- Modulo 3: Ugello intercambiabile

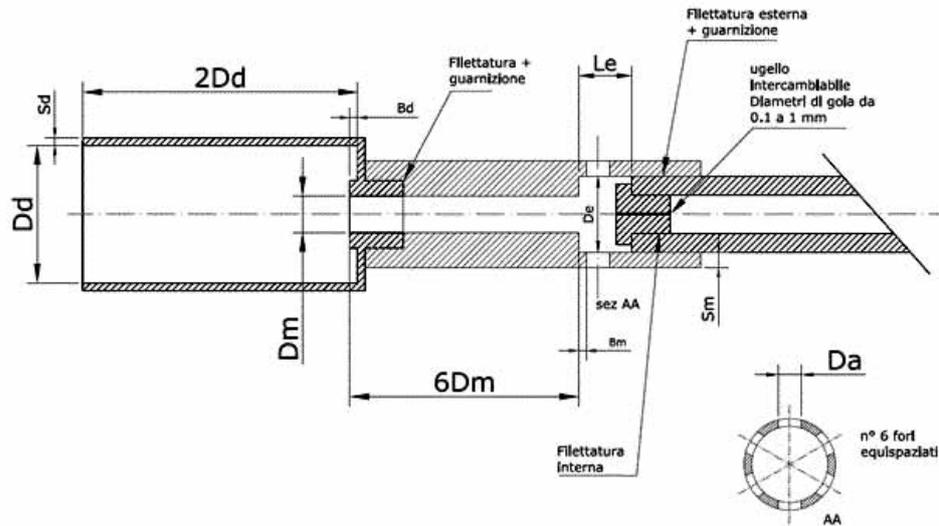


Figura 1: Rappresentazione schematica del pilota

Lo schema prevede che lo stelo dell'ugello venga congiunto al condotto principale tramite un tubo metallico zigrinato flessibile, così da facilitarne il posizionamento. Il modulo 2 (eiettore-premiscelatore) si collega tramite la filettatura al condotto principale ed al modulo 1, facendo in modo che il condotto interno risulti il più possibile continuo nel passaggio dal modulo 1 al modulo 2. Analogamente la filettatura tra il modulo 2 e il canale di adduzione è indispensabile per accedere facilmente all'ugello intercambiabile (3) ed effettuare così prove con sezioni di gola differenti. A livello costruttivo, anche se le dimensioni riportate in Tabella 1 hanno permesso tolleranze compatibili con l'impiego di semilavorati standard, è stato indispensabile, al fine di ottenere la massima funzionalità della geometria sviluppata, rispettare le proporzioni tra i vari parametri.

	Dd	Bd	Sd	Dm	Le	De	Sm	Bm	Da
Sol. A	18	1	1	5	7	10	2	1	3
Sol. B	27	1.5	1	7.5	10.5	15	2	1.5	4.5

Tabella 1: Dimensionamento dell'ugello sistema pilota

Definita la nuova geometria del pilota, prima di giungere alla realizzazione fisica del sistema, ne sono state effettuate simulazioni CFD al fine di valutarne la bontà del design. Da quanto ottenuto sia con le simulazioni CFD, che dalle successive prove sperimentali di cui verrà discusso nei paragrafi successivi, la presenza dello spallamento Bd , così come la distanza Bm tra i fori radiali e la brusca variazione di sezione (modulo 1), è risultata fondamentale per il corretto funzionamento del pilota.

L'obiettivo delle prime simulazioni è stato quello di indagare in merito al campo di moto e al fronte di fiamma del pilota in modo tale da verificarne la congruenza di comportamento con quello di un generico bruciatore premiscelato. In Figura 2 ne è riportato il modello solido adottato per la generazione della griglia di calcolo).



Figura 2: Modello solido del pilota

La geometria del pilota prevede che il combustibile venga iniettato attraverso un tubo posto in testa al bruciatore mentre l'aria sia aspirata per eiezione direttamente dall'ambiente esterno attraverso 6 fori che sono realizzati sulla superficie laterale del condotto di premiscelazione. Analogamente ad i criteri di realizzazione delle mesh di calcolo adoperate per lo studio fluidodinamico della camera di prova, anche per le simulazioni effettuate sui dispositivi pilota è stata adottata l'ipotesi di simmetria della soluzione, analizzandone quindi solo una porzione angolare di 30° del pilota (Figura 3).

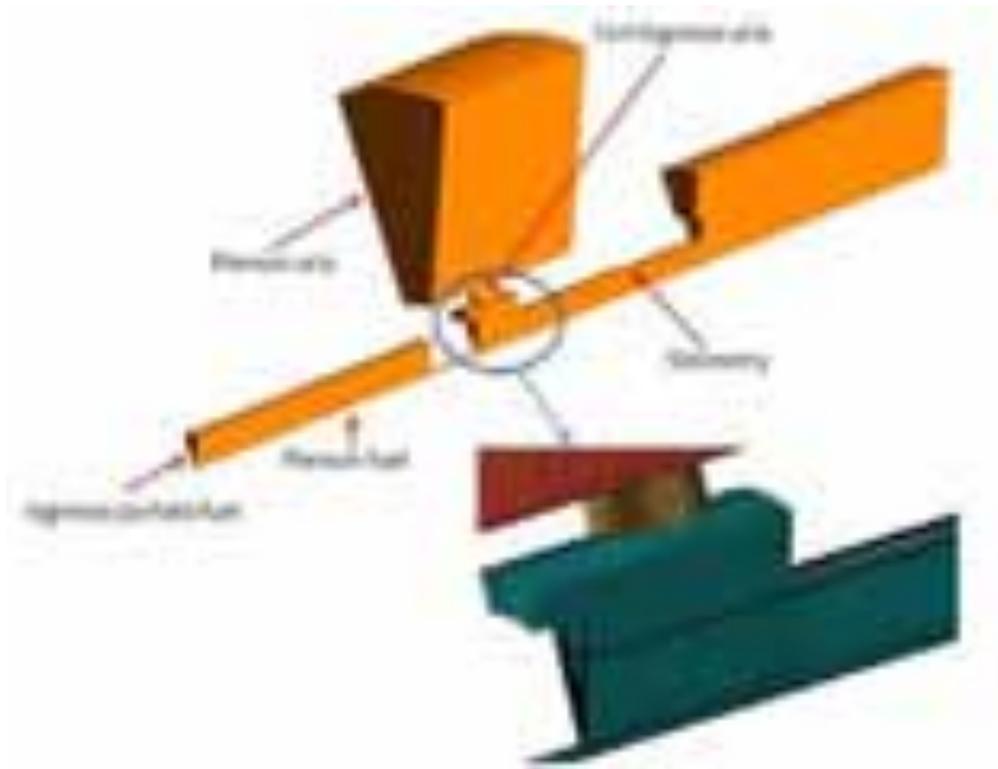


Figura 3: Porzione del modello solido adottata per le simulazioni e dettaglio della mesh.

La mesh è stata realizzata tramite il programma commerciale di calcolo CFD; per la sua generazione è stata adottata una strategia di tipo strutturato multiblocco con elementi esaedrici per un totale di circa 400000 elementi.

Per quanto riguarda le condizioni al contorno, per le superfici laterali del modello sono state adottate delle condizioni di simmetria. Sia per l'ingresso di aria che per quello di combustibile si è ritenuto necessario porre dei plenum al fine di ottenere dei corretti campi di velocità in ingresso al condotto di premiscelazione. Per l'ingresso del combustibile sono state quindi definite la portata e la temperatura, mentre per l'ingresso dell'aria è stata imposta una condizione al contorno presente all'interno del codice utilizzato, detta condizione di opening.

Tale opzione consente di valutare eventuali ricircoli del flusso sull'outlet, sfruttando la pressione totale e la temperatura dell'aria riferite ai valori ambiente. In uscita è stata imposta una opening per la quale è stata fissata la pressione statica. In Tabella 2 sono riportati i valori numerici delle condizioni al contorno utilizzate.

Portata Combustibile (CH4)	1.22811e-05 [kg/s]
Temperatura Combustibile	281 [K]
Pressione Totale Ingresso Aria	1.01325e+05 [Pa]
Temperatura Aria	300 [K]
Pressione Statica Outlet	1.01325e+05 [Pa]

Tabella 2: Condizioni al contorno utilizzate per l'analisi CFD del pilota

Il modello di turbolenza adottato è il modello Shear Stress Transport. Per quanto riguarda invece il modello di combustione, a seguito dei risultati ottenuti.

Non conoscendo a priori se il comportamento della fiamma del pilota fosse realmente quella desiderata, ovvero perfettamente premiscelata, la scelta è ricaduta quindi su un particolare modello di combustione a due equazioni. Analizzando nel dettaglio il fenomeno infatti, è risultato che fosse possibile l'insorgenza di regioni in cui la fiamma presenti un comportamento diffusivo. Il meccanismo scelto tuttavia non è stato utile per la determinazione delle emissioni di NO_x che comunque non sono state di interesse durante questa prima fase di analisi del solo pilota. Come si può osservare in Figura 4, il combustibile acquisisce un'elevata velocità all'interno del tubo situato a monte del condotto di premiscelazione e questo genera una depressione al centro del canale che tende a richiamare aria dall'ambiente. Inoltre la stabilizzazione della fiamma (come visibile in Figura 5) è ottenuta attraverso la generazione di una zona di ricircolo che si forma a seguito della brusca allargatura che la miscela vede nel passaggio dal condotto di premiscelazione alla zona di reazione.

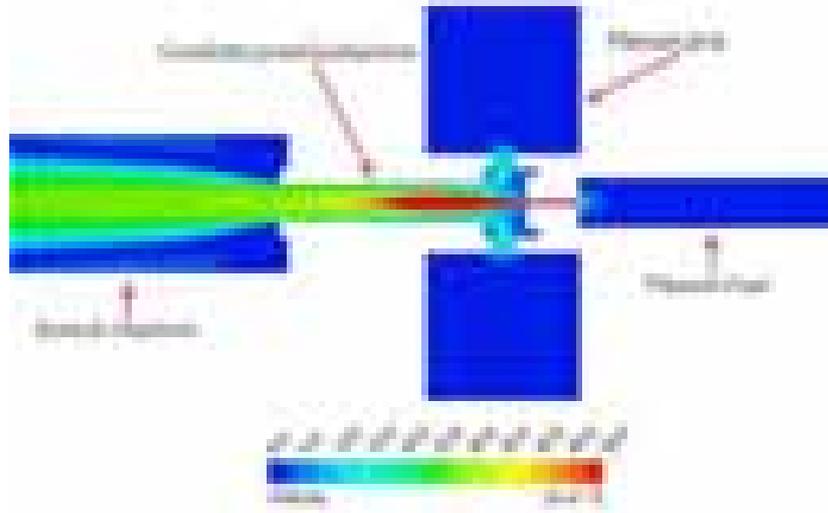


Figura 4: Campo di velocità

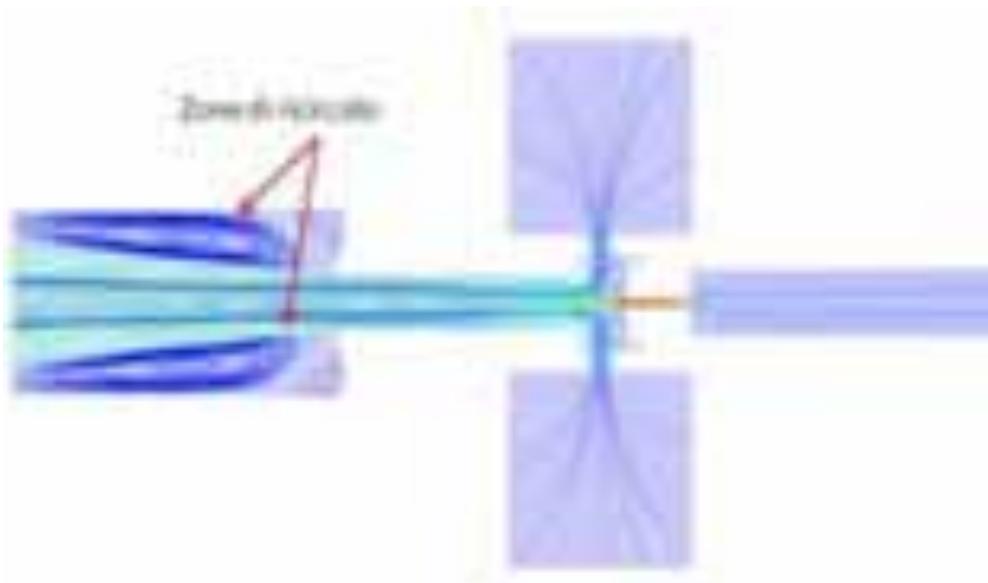


Figura 5: Linee di flusso pilota

A seguito dell'improvvisa diffusione subita, il flusso si separa e questo porta alla generazione di due zone a bassa velocità dove la fiamma può ancorarsi. (in Figura 6 è riportato il profilo di temperatura che individua il fronte di fiamma).

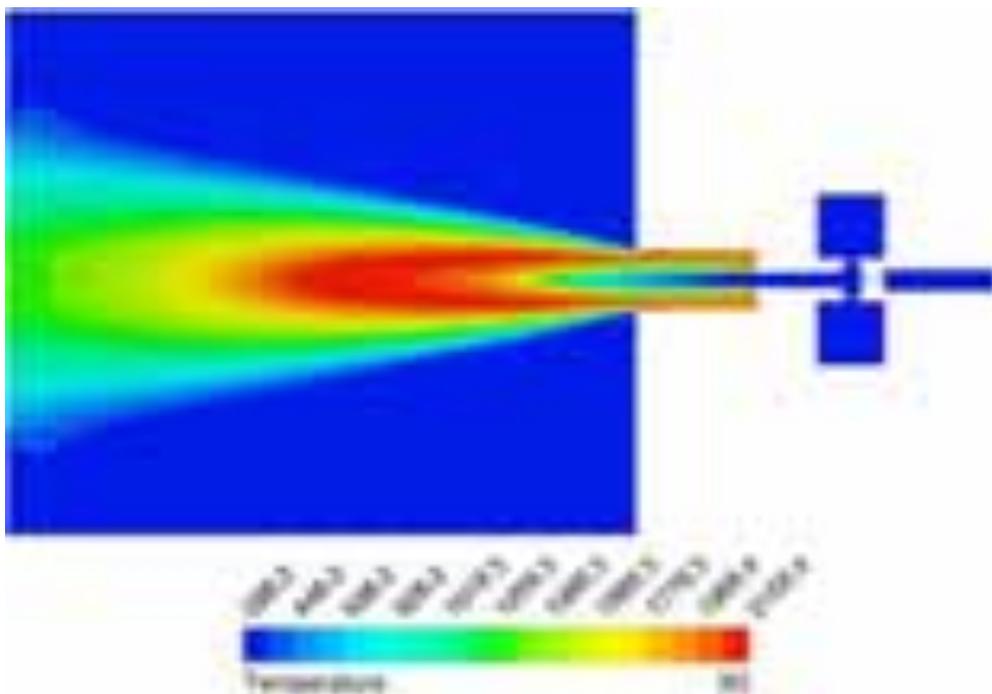


Figura 6: Profilo di temperatura ottenuto con un modello di reazione Finite Rate Chemistry

La lunghezza del condotto di premiscelazione garantisce quindi nella sezione di ingresso della zona di reazione una miscelazione praticamente completa del metano con l'aria (Figura 7).

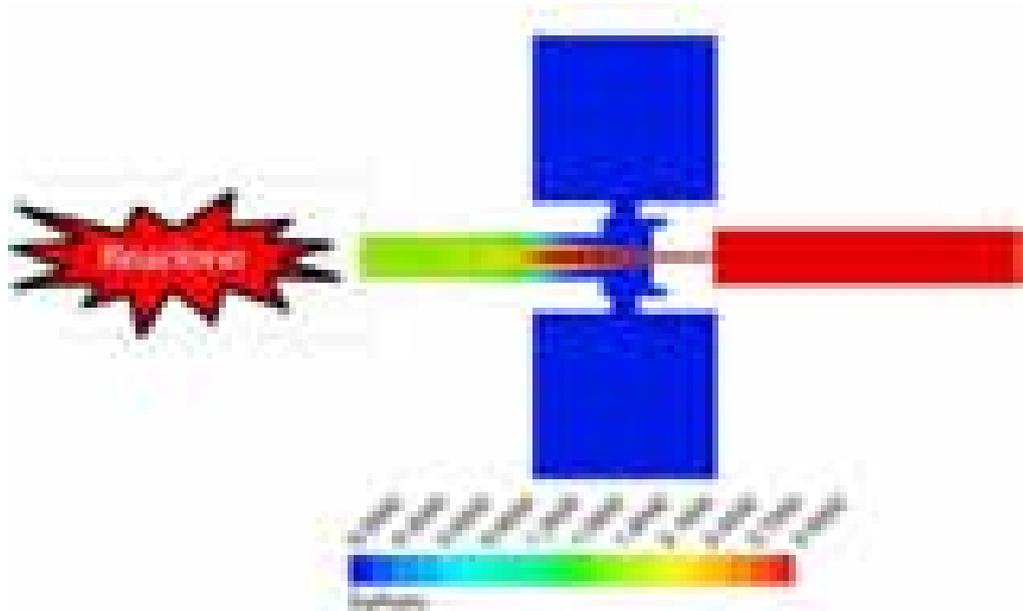


Figura 7: Rapporto di equivalenza all'interno del condotto di premiscelazione ottenuta con un diametro del foro di iniezione del combustibile pari ad 1 mm

La miscela è grassa (rapporto di equivalenza di circa 1.5) e questo comporta una non ossidazione di parte del metano, almeno fino a che non esce in atmosfera dove può completare l'ossidazione grazie all'ulteriore apporto di aria. Per tale motivo l'ossidazione del metano avviene in due fasi distinte, come appunto evidenziato in Figura 8.

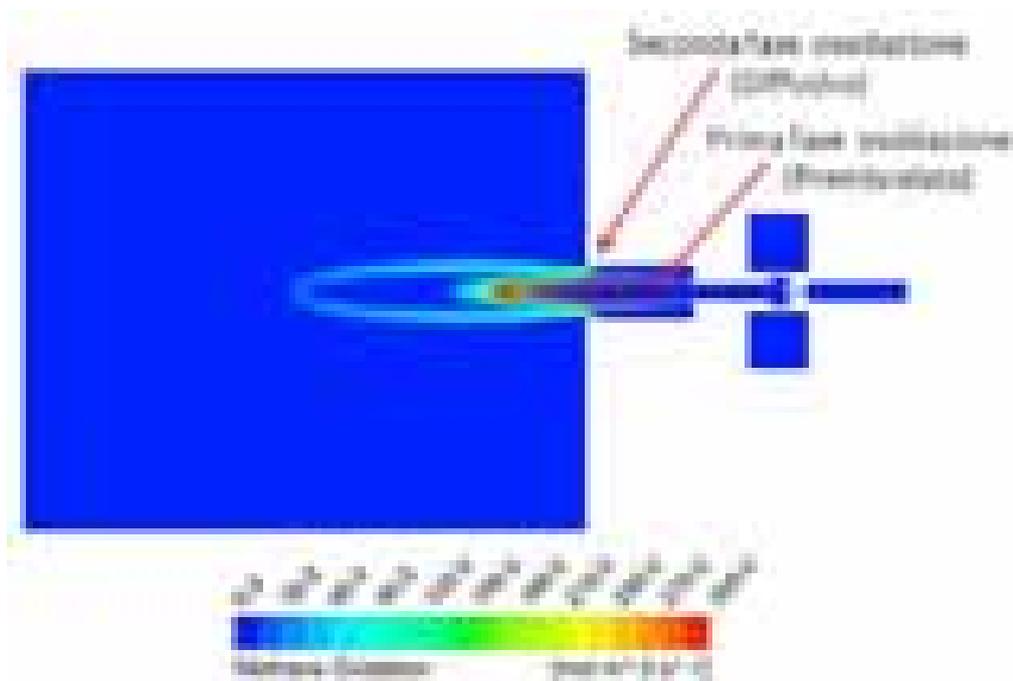


Figura 8: Ossidazione del metano

Si ha una prima fase nella quale la combustione può essere ritenuta perfettamente premiscelata in quanto l'aria che agisce da comburente è quella che si miscela col combustibile all'interno del condotto di premiscelazione. Successivamente, invece (seconda fase), la combustione avviene in modo diffusivo in quanto in questo secondo caso il comburente è aria dell'ambiente non preliminarmente miscelata col metano. Questo giustifica il profilo di temperatura visto in Figura 5. Il picco di temperatura si ha nella regione diffusiva della fiamma, dove l'ancoraggio del nuovo fronte di fiamma (quello diffusivo) si ottiene nel luogo dei punti a rapporto di equivalenza unitario, per il quale la temperatura di fiamma risulta essere massima. Questo aspetto è molto importante per quanto riguarda l'analisi delle emissioni di NO_x che aumentano con l'incremento della temperatura del fronte di fiamma. Per poter contenere il più possibile le emissioni di NO_x è risultato quindi auspicabile non avere questa seconda fase di fiamma diffusiva, ovvero un nuovo design della testa del pilota (che in questo caso si potrebbe limitare alla sola dimensione del foro di ingresso del combustibile, con una conseguente riduzione della portata di combustibile stesso) dovrebbe essere mirato ad ottenere all'ingresso della zona di reazione del pilota stesso una miscela premiscelata magra.

3.2.2 ANALISI CFD INTERAZIONE PILOTA - TORCIA

In seconda battuta l'indagine si è spostata effettuando simulazioni e analisi dell'intero dispositivo, ovvero dell'interazione tra pilota e testa della torcia. Quindi, a compendio del modello di pilota presentato nel paragrafo precedente, nella simulazione è stato inserito un bruciatore principale (main), implementato essenzialmente come un tubo che scarica combustibile in una camera di reazione dove avviene la combustione. A seguito dell'ipotesi di simmetria della soluzione è stata analizzata solo una porzione pari a 180° del main e della camera di reazione (in Figura 9 è riportato il modello solido). La mesh di questo dominio (main + camera di reazione) è stata realizzata adottando una strategia di tipo non strutturato utilizzando elementi tetraedrici per un totale di circa 2 milioni di elementi. Per accoppiare questo dominio con quello del pilota (per il quale l'ipotesi di simmetria invece ci consente di analizzarne solo una porzione pari a 30° della geometria) è stato necessario adottare un'interfaccia in modo tale da replicare su 180° la soluzione del campo di moto uscente dal pilota

stesso (in Figura 10 è riportata la porzione del sistema adottata per effettuare le simulazioni).

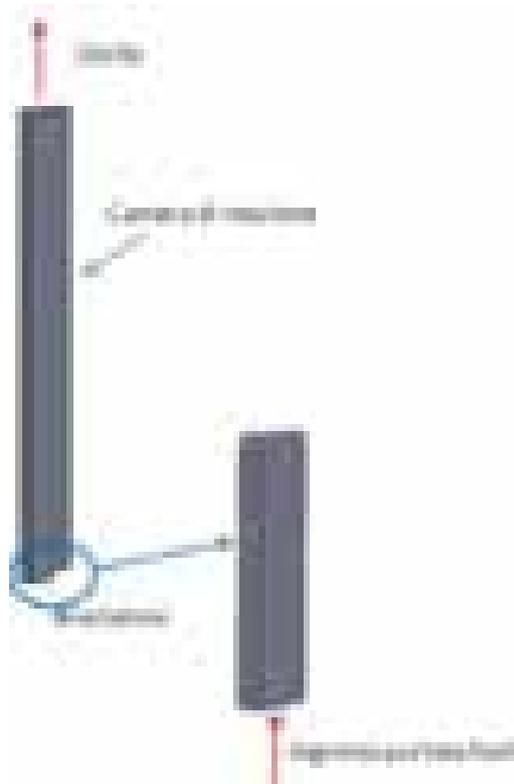


Figura 9: Modello solido del bruciatore principale (main)

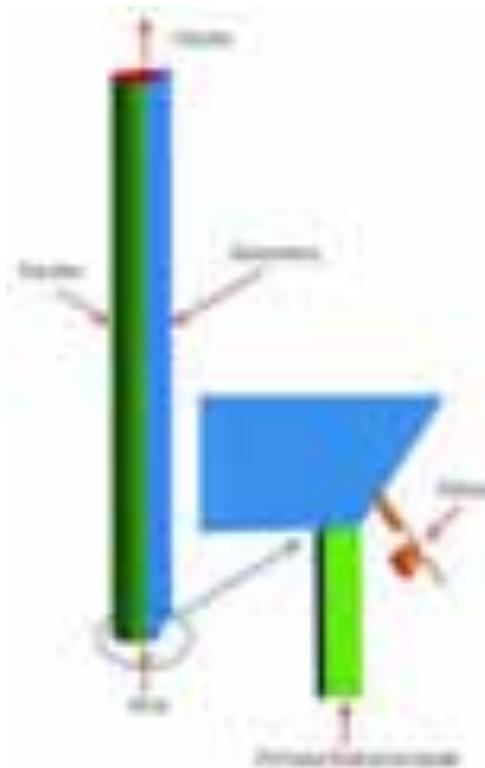


Figura 10: Modello solido del complessivo con dettaglio mesh del main

Per quanto riguarda le condizioni al contorno sono state imposte le stesse tipologie di condizioni rispetto alla simulazione precedente effettuate sul pilota, mentre per il main è stata posto in ingresso il valore della portata e della temperatura del combustibile. Inoltre è stato imposto sulla superficie inferiore della camera di reazione un flusso di aria in modo tale da riprodurre l'effetto che si ha a seguito dell'aspirazione eseguita allo scarico della camera di reazione nei test sperimentali (effettuati su un test rig analogo al dominio simulato in questo lavoro). La simulazione del complessivo è stata eseguita adottando come combustibile per il main, una miscela di metano e di propano.

In Tabella 3 sono riportati i valori numerici delle condizioni al contorno utilizzate per effettuare le simulazioni.

Portata Combustibile Main (CH₄ o C₃H₈)	8.78663e-03 [kg/s]
Temperatura Combustibile Main	278 [K]
Portata Combustibile Pilota (CH₄)	5.45553e-06 [kg/s]
Temperatura Combustibile Pilota	281 [K]
Pressione Totale Ingresso Aria	1.01325e+05 [Pa]
Temperatura Aria	300 [K]
Pressione Statica Outlet	1.01325e+05 [Pa]
Velocità ingresso aria aspirazione	1 [m/s]
Temperatura ingresso aria aspirazione	300 [K]

Tabella 3: Condizioni al contorno utilizzate per l'analisi CFD del complessivo

Nelle simulazioni in cui è stato imposto per il main il metano come combustibile, il meccanismo di combustione adottato è stato quello di Dupont, già presentato per lo studio del pilota; tuttavia per la valutazione complessiva del fenomeno questo è stato reimplementato con le equazioni necessarie al fine di valutare le emissioni inquinanti di NO_x (è stato adottato un meccanismo globale ad un passo presente in CFX). Per quanto riguarda l'utilizzo di propano è invece stato necessario inserire anche le reazioni di ossidazione del propano stesso. Per queste invece è stato utilizzato un meccanismo globale a due passi, anch'esso già presente in CFX.

Iniziando da un confronto tra la simulazione reattiva del solo pilota e della simulazione reattiva del complessivo, con combustibile metano, si osserva come

in questo secondo caso insorgono delle nuove strutture di ricircolo all'interno del condotto di premiscelazione (Figura 11).

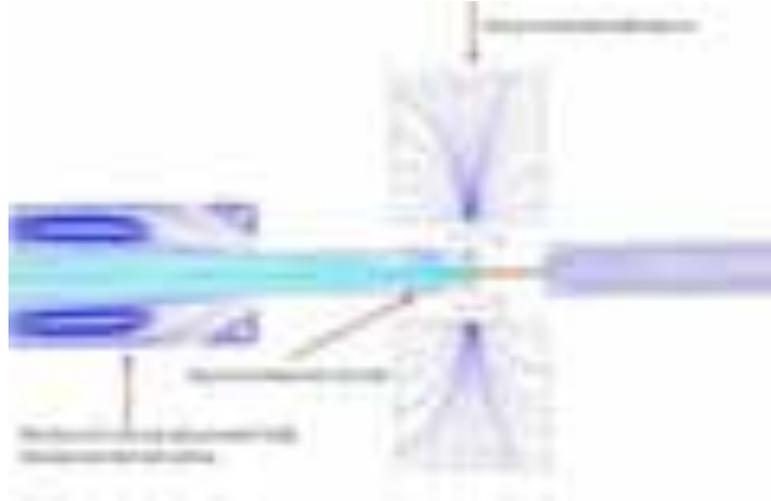


Figura 11: Linee di flusso pilota con evidenziazione di nuove strutture di ricircolo

La nascita di queste strutture di ricircolo è dovuta alla diminuzione di portata, e quindi alla diminuzione di velocità (la sezione di passaggio è fissata) che subisce l'aria aspirata dall'esterno (vedi Figura 12).

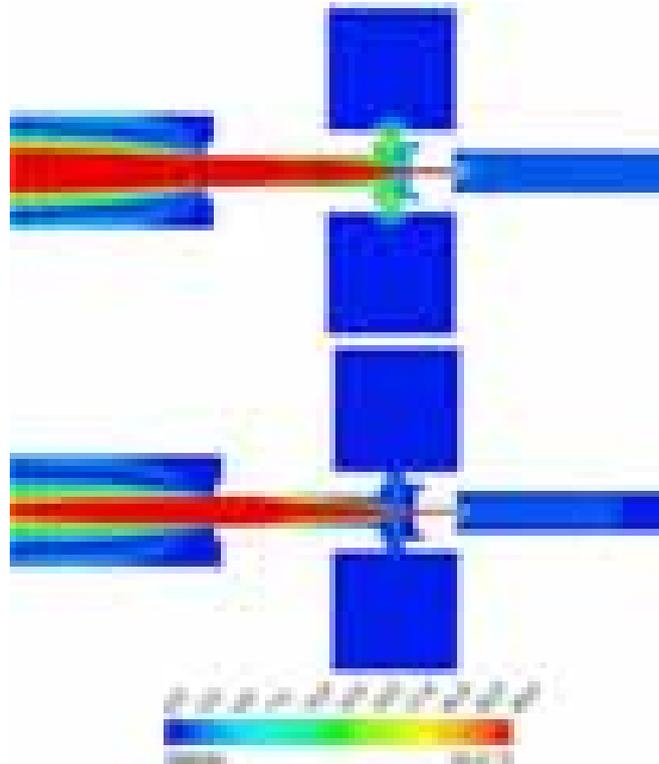


Figura 12: Campo di velocità all'interno del pilota nella simulazione del pilota singolo (in alto); campo di velocità all'interno del pilota nella simulazione del complessivo (in basso)

Più in particolare la portata totale di aria in ingresso al pilota passa da un valore di 1.176×10^{-3} [kg/s] nel caso del solo pilota ad un valore di 0.197×10^{-3} [kg/s] nel

caso del complessivo. Questa differenza di portata è legata alla differente pressione di scarico che si ha nelle due simulazioni. Infatti, se nel primo caso allo scarico del pilota è presente un ambiente esterno indisturbato, nel secondo invece è presente il getto del combustibile principale (e della relativa fiamma che si genera). La presenza del getto principale porta ad un incremento della pressione all'interno del pilota (si ha una sorta di effetto tappo) e quindi ad una diminuzione della portata di aria aspirata dall'esterno. Come conseguenza il flusso è più propenso a separare quando è soggetto a diffusione. La riduzione di portata di aria aspirata per eiezione dal pilota porta perlopiù ad avere una miscela più ricca con conseguente aumento delle emissioni inquinanti di NO_x a seguito della seconda fase di combustione diffusiva. Si può infatti osservare in Figura 13 come siano presenti dei picchi di temperatura a valle dell'ancoraggio del fronte di fiamma premiscelato individuato dalla Figura 13.

A seguito di queste nuove strutture di ricircolo cambia il punto di ancoraggio del pilota (ancoraggio della fiamma a comportamento premiscelato) che stavolta è situato più a monte, come evidenziato in Figura 14.

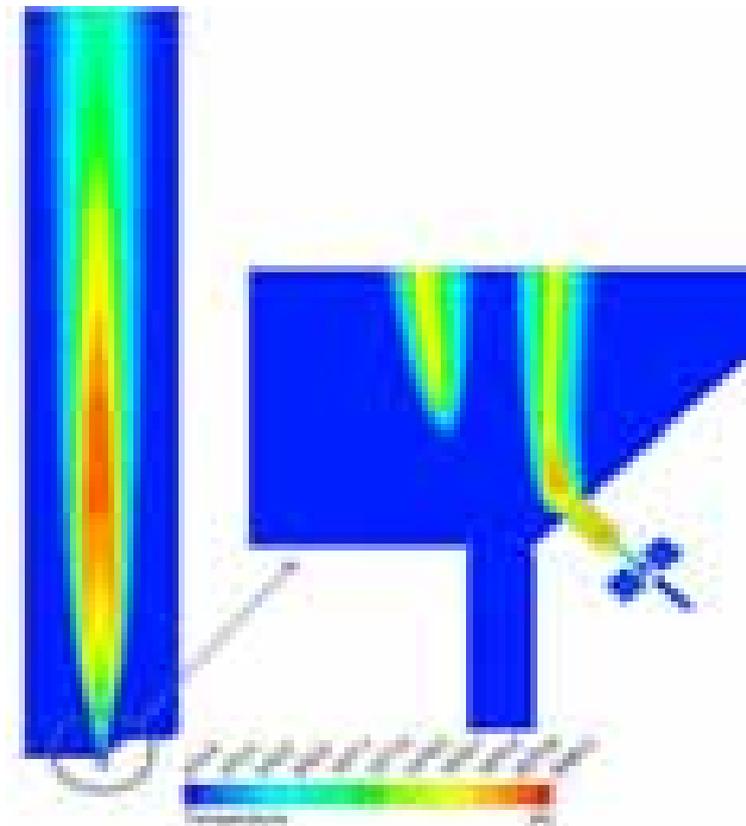


Figura 13: Temperatura del complessivo con combustibile metano con dettaglio dell'ancoraggio della fiamma dettata dal pilota

Passando all'analisi del fronte di fiamma del bruciatore principale, facendo per il momento sempre riferimento alla condizione in cui il bruciatore principale brucia metano, si osserva come sia determinante il ruolo della fiamma del pilota per l'ancoraggio della fiamma principale, che è staccata dalle superfici del bruciatore.

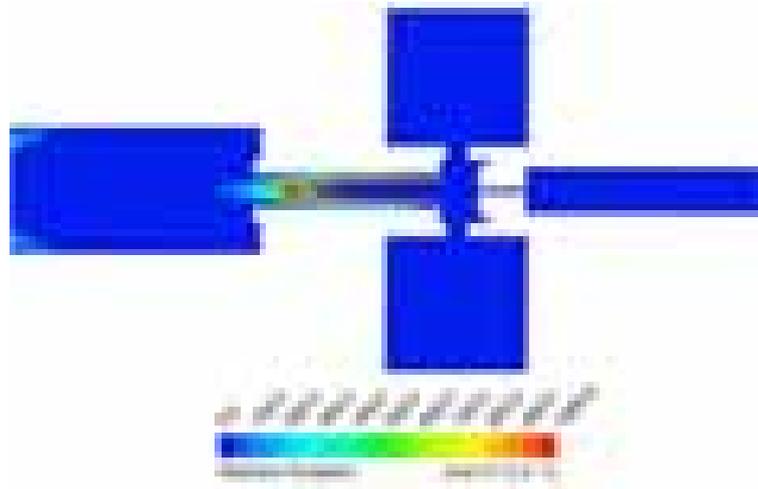


Figura 14: Ossidazione del metano

Dal punto di vista delle emissioni inquinanti, più in particolare per quanto riguarda le emissioni di NO_x e di CO , si possono effettuare delle considerazioni sia per quanto riguarda la dinamica del pilota che per quanto riguarda la dinamica del bruciatore principale. Per il contenimento delle emissioni di NO_x del pilota valgono i ragionamenti precedenti, ovvero è indispensabile una revisione della geometria del pilota con l'obiettivo di avere una miscela più magra (valori del rapporto di equivalenza per il pilota inferiori all'unità).



Figura 15: Emissioni di CO del pilota in presenza del bruciatore principale

Per quanto riguarda le emissioni di CO, invece, è necessario aumentare il tempo di residenza. Si osserva infatti come le emissioni maggiori di CO si concentrino attorno all'asse di simmetria del pilota, dove il flusso ha una maggiore velocità è quindi non ha il tempo di ossidarsi in CO₂ (vedi Figura 15). Le emissioni di CO del pilota risultano comunque essere estremamente contenute in quanto la presenza della fiamma principale a valle del processo di combustione premiscelata consente alla reazione di completarsi attraverso una ossidazione successiva del CO prodotto all'interno del pilota. Per quanto riguarda le emissioni di NO_x del main, invece, il problema è sostanzialmente legato al fatto che siamo in presenza di una fiamma diffusiva e quindi non è possibile contenere localmente la temperatura del fronte di fiamma. Le emissioni di CO invece non mostrano in questo caso (combustibile metano) particolari problemi in quanto il tempo di residenza della miscela consente una combustione praticamente completa anche del combustibile proveniente dal bruciatore principale. Come si vede in Figura 16 a valle della formazione di CO si ha formazione di CO₂ che porta ad una riduzione di CO stessa (evidenzia la presenza del fenomeno di ossidazione della CO).

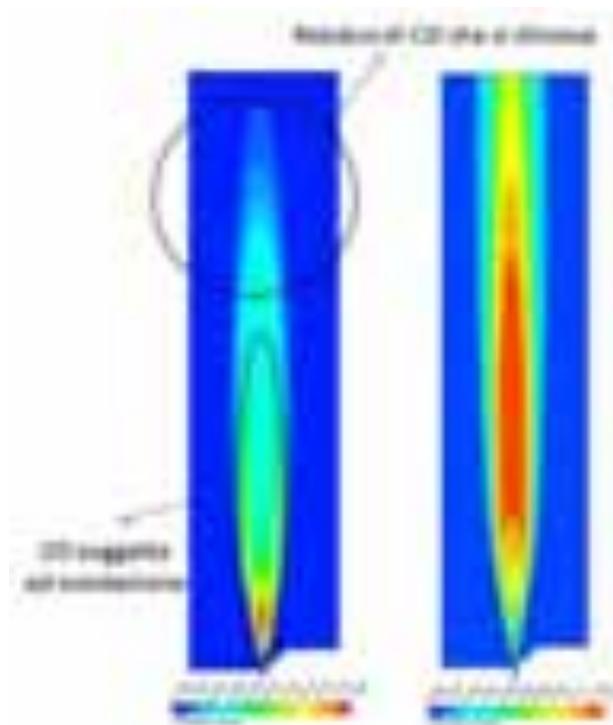


Figura 16: Emissioni di CO e CO₂ del complesso bruciatore principale-pilota

Analizzando la fiamma di propano (vedi Figura 17), si può osservare come l'ancoraggio risulti più difficoltoso, in quanto l'ossidazione di tale molecola è

più complessa rispetto a quella di metano, a causa della presenza di tre atomi di carbonio piuttosto che una (la “rottura” delle molecole degli idrocarburi pesanti richiede più energia rispetto a quella del metano).

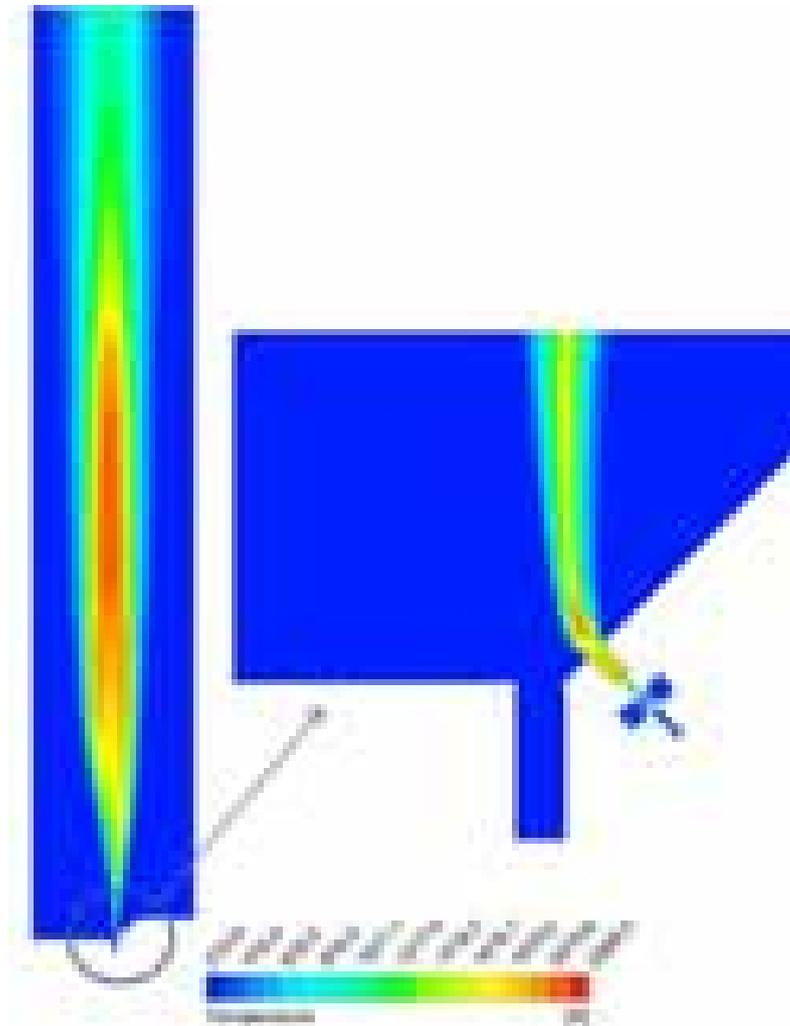


Figura 17: Temperatura del complessivo con propano con dettaglio dell’ancoraggio della fiamma:

Analizzando invece le emissioni di CO, si nota un incremento di queste rispetto al caso della fiamma di metano (vedi Figura 18); questo significa che ottenere una combustione completa risulta più difficile (la produzione di CO è nettamente più elevata, come già spiegato sopra, a causa del maggior numero di atomi di carbonio nella molecola di propano). Per quanto riguarda la formazione di NO_x, si ha un contenimento delle emissioni rispetto alla fiamma di metano in quanto la temperatura della fiamma di propano è più bassa. Questo può essere giustificato pensando che tale combustibile, rispetto al CH₄, richieda meno aria

per bruciare (il propano ha un rapporto stechiometrico inferiore) e quindi la miscela risulta più diluita (vedi Figura 18).

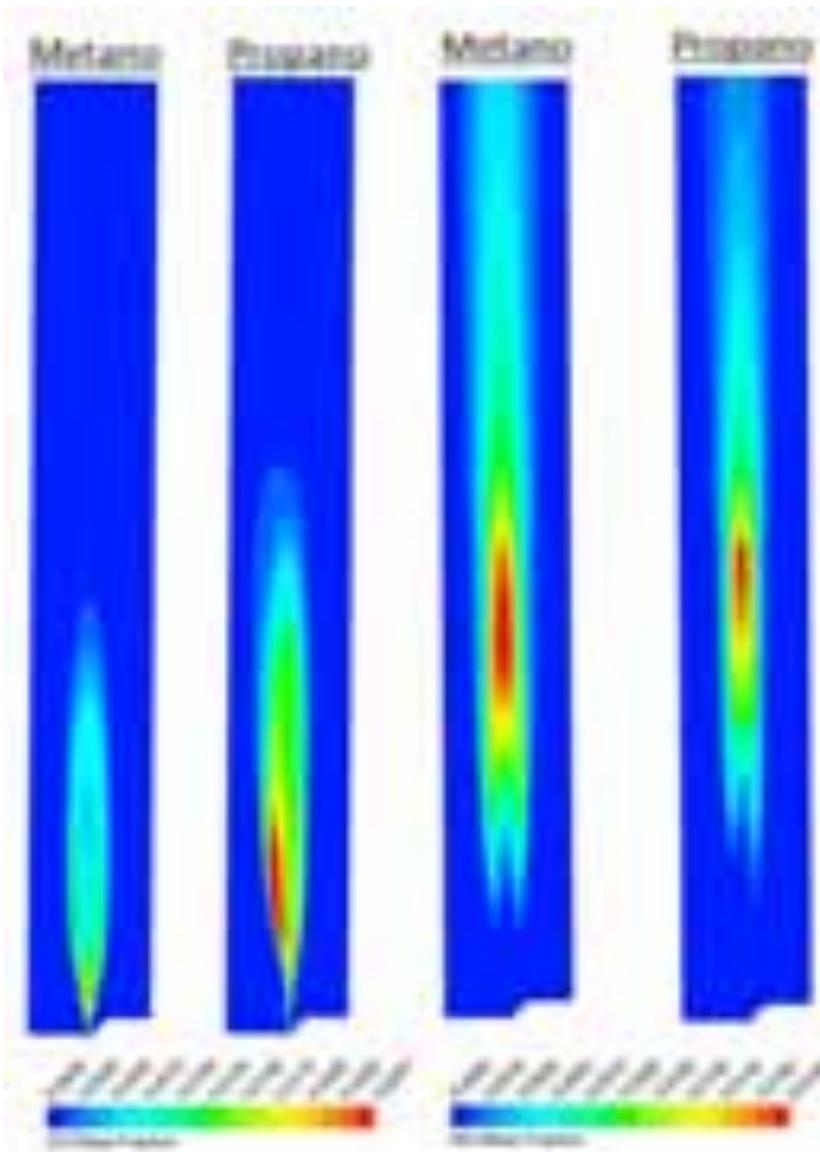


Figura 18: Confronto tra le emissioni di CO (sinistra) e NOx della fiamma di metano e di propano (destra)

Alla luce dei risultati ottenuti è stato possibile effettuare quindi uno sviluppo di metodologie di analisi numerica e simulazione avanzata per i sistemi di combustione di gas residuo nell'industria petrolchimica in oggetto. Il know-how acquisito nelle prime fasi del lavoro, a seguito dello sviluppo di procedure per la progettazione integrata con i sistemi di simulazione, ha permesso di acquisire le conoscenze innovative necessarie alla definizione di prototipi di torce innovativi sui quali successivamente è stata effettuata una campagna di sperimentazione sfruttando il banco prova realizzato e descritto nel capitolo 2.

3.3 *PROGETTAZIONE E REALIZZAZIONE DEI PROTOTIPI DI TORCIA*

Lo sviluppo numerico dei prototipi ha portato quindi alla loro realizzazione, avendo come obiettivo quello di sviluppare delle teste di torce industriali basate su geometrie innovative rispetto lo stato dell'arte. L'ultima fase del progetto ha previsto quindi che venissero condotte campagne sperimentali strettamente finalizzate a studiare il comportamento termo fluidodinamico di tali prototipi e la loro efficienza in condizioni di reale impiego.

La parte finale del lavoro è consistita quindi nella realizzazione e nella successiva sperimentazione dei prototipi innovativi di torce industriali operanti in condizioni controllate e sicure, tramite l'impiego di un test rig dedicato: come già presentato, questo si compone da una camera di misura per fiamme libere interamente strumentata e da un Derrick con dimensioni reali. La realizzazione di una zona di test di tale dimensioni, costituisce uno degli aspetti più innovativi dell'intero progetto, considerando perlopiù la scarsissima diffusione a livello mondiale di tali sistemi. A oggi infatti in Europa esiste solamente una postazione di prova non strumentata di proprietà John Zink, atta ad effettuare le prove di ancoraggio della fiamma e la sua stabilità agli agenti atmosferici. Non esistono – almeno con riferimenti espliciti in letteratura scientifica – altre installazioni che permettono di effettuare misure sugli inquinati o sulla mappatura termica in fase di funzionamento con portate considerevoli di gas combusto come quello elaborato dall'impianto realizzato presso G.A.M. Oil&Gas.

La fase operativa del progetto, ovvero l'attività di sperimentazione sui prototipi, ha seguito un approccio bilaterale basato sull'impiego combinato di entrambi i banchi di studio realizzati. E' stato infatti utilizzato quello a dimensioni ridotte per caratterizzare la distribuzione di temperatura della fiamma e la composizione dei relativi gas di scarico prodotti. Utilizzando invece i criteri di scalatura di cui discusso nel capitolo 1, sui prototipi di torce a dimensione reale basati sulle stesse geometrie dei prototipi a dimensione ridotta, ne è stata sperimentata sul relativo banco di studio la stabilità della fiamma, la sua resistenza agli agenti atmosferici nonché l'energia termica radiante emessa.

La campagna di misura svolta in questa fase del progetto ha portato all'acquisizione di una serie significativa di dati ed alla conseguente messa a punto definitiva dei sistemi di analisi fluidodinamica e progettazione studiati nelle fasi iniziali del lavoro. Il criterio con il quale è stata allestita la realizzazione dei prototipi e la rispettiva sperimentazione, è fondamentalmente scomponibile in quattro fasi principali:

- Realizzazione dei prototipi di teste e dei piloti da provare sui banchi di studio;
- Prove di accensione per ciascun tipo di testa;
- Prove d'immissione degli ausiliari e dei promotori di turbolenza;
- Sperimentazione della relativa torcia a grandezza reale con conseguente verifica dell'ancoraggio della fiamma;

In linea con tale procedura, dopo aver effettuato una prima scalatura monodimensionale dei prototipi studiati con riferimento alla sezione di uscita del flare gas della testa in scala imposta a 70 mm, si è proceduto alla realizzazione di tali torce. In particolare, per avanzare operativamente nel lavoro, sono state sviluppati i seguenti elementi:

- Un prototipo di testa convergente con diametro di uscita da 70 mm e corona forata (\emptyset 1mm) per l'ancoraggio fiamma;
- Un prototipo di testa divergente con diametro di uscita inferiore da 61 mm e diametro superiore da 114 mm;
- Un sistema pilota per la formazione di fiamme diffusive;
- Un sistema pilota costituito da una testa di adduzione per la formazione di fiamme premiscelate completa degli elettrodi necessari all'innesco della scintilla;
- Un sistemi pilota costituito da una testa di adduzione per la formazione di fiamme altamente premiscelate completa degli elettrodi necessari all'innesco della scintilla (pilota di nuova concezione).

Definite con le simulazioni numeriche le geometrie da sviluppare, si è provveduto alla produzione delle messe in tavola e alla realizzazione meccanica dei dispositivi pilota e delle teste.

In Figura 19 e in Figura 20, a scopo esemplificativo, sono riportate le tavole utilizzate per la realizzazione delle sperimentate.

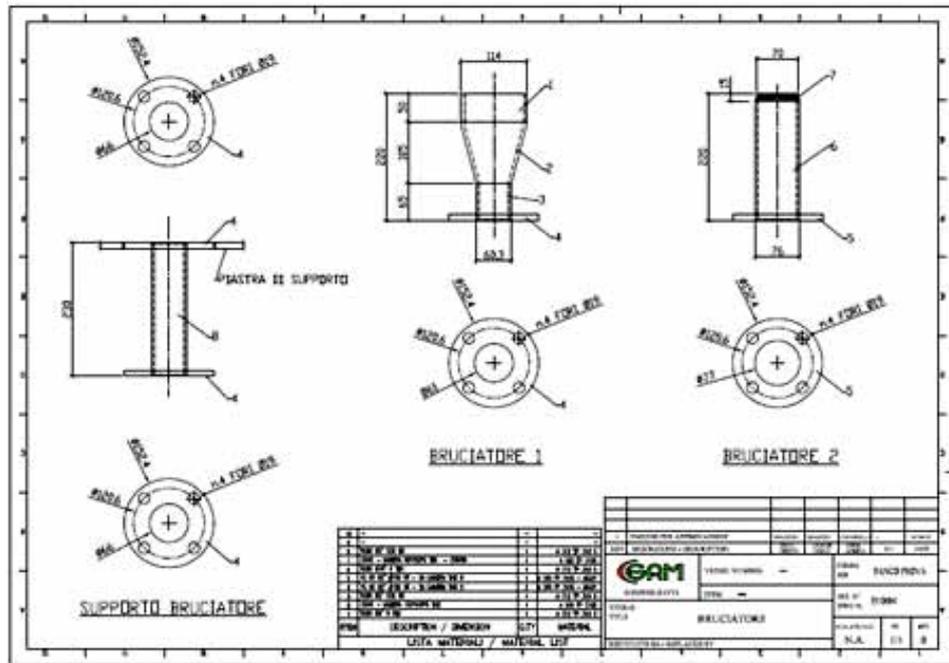


Figura 19: Messa in tavola da officina della testa divergente

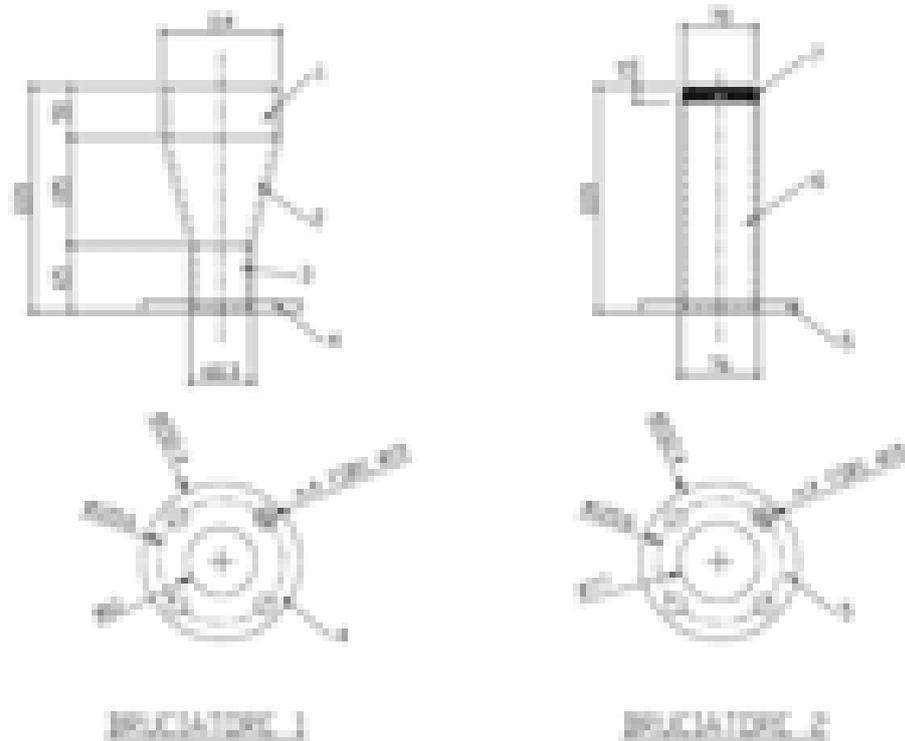


Figura 20: Messa in tavola della testa divergente (sinistra) e della testa convergente con corona di ancoraggio (destra).

La base di ciascuna delle testa è stata realizzata con una piastra circolare forata di ugual misura (\varnothing 152 mm) che ne permette un facile ancoraggio con il

supporto inferiore e con la piastra disposta all'interno della camera di combustione. In Figura 21 sono riportate due foto delle lavorazioni ottenute e installate nella camera di prova.



Figura 21: Prototipi innovativi di teste (convergenti e divergenti) per torce industriali

Le prove effettuate sono state divise fundamentalmente in quattro differenti campagne di sperimentazione:

- Prove di prima accensione e collaudo, effettuate sia per la camera a terra che per la torci in scala reale;
- Prove sperimentali sui piloti di nuova concezione
- Test case con testa convergente e pilota di nuova concezione;
- Test case con testa divergente e pilota di nuova concezione;

Per ciascuna di queste sono state variate le condizioni di prova, così da vedere la risposta del sistema nelle diverse modalità di funzionamento; quindi sono state raccolte misure e dati ottenuti sperimentalmente variando le condizioni di combustione e valutandone gli effetti prodotti.

Le prove effettuate sulle teste analizzate all'interno della camera di prova a terra hanno previsto:

- Variazione composizione percentuale della miscela di combustibile combusto;
- Analisi dei transitori termici in accensione e in spegnimento della camera;
- Analisi del fenomeno con iniezione di vapore
- Analisi del fenomeno con iniezione inerti (CO_2 e N_2)
- Analisi del fenomeno con iniezione di gasolio
- Analisi del fenomeno con aspirazione forzata

La Tabella 4 riassume sinteticamente la logica di acquisizione con la quale sono state fatte procedere le prove sperimentali sopra descritte.

<i>Configurazione</i>	<i>Tipologia di prova effettuata</i>
1 Prove di prima accensione e collaudo	Innesco
	Sostenimento e ancoraggio fiamma
	Test degli ausiliari
	Aspirazione
	Purging e pulizia linee
	Spegnimento
2 Sperimentazione dei piloti	Pilota per generazione di fiamme diffuse
	Pilota per generazione di fiamme parzialmente premiscelate
	Pilota per generazione di fiamme fortemente premiscelate
3 Test case con testa convergente e pilota di nuova concezione	Variazione composizione percentuale della miscela di combustibile;
	Analisi dei transitori termici in accensione e in spegnimento della camera;
	Analisi del fenomeno con iniezione di vapore
	Analisi del fenomeno con iniezione inerti (CO ₂ e N ₂)
	Analisi del fenomeno con iniezione di gasolio
4 Test case con testa divergente e pilota di nuova concezione	Variazione composizione percentuale della miscela di combustibile combusto;
	Analisi dei transitori termici in accensione e in spegnimento della camera;
	Analisi del fenomeno con iniezione di vapore
	Analisi del fenomeno con iniezione inerti (CO ₂ e N ₂)
	Analisi del fenomeno con iniezione di gasolio
	Analisi del fenomeno con aspirazione forzata

Tabella 4: Struttura operativa delle condizioni sperimentali testate

Il sistema di raccolta dati realizzato ha permesso di effettuare acquisizioni multiple su tutte le linee affluenti allo skid e alla camera, ricavando così la registrazione dei parametri termodinamici necessari per ottenere un'analisi esaustiva della fenomenologia del sistema.

Tramite il software di acquisizione dati sono state effettuate:

- Acquisizioni puntuali, ovvero istantanee di un momento specifico di funzionamento della camera.
- Acquisizione dei transitori termici e delle portate su tutte le linee interessate.

Avvalendosi contemporaneamente anche del sistema portatile di rilevamento degli inquinanti sono state effettuate delle misurazioni puntuali non continuative

sugli inquinati presenti nei gas prodotti dalla combustione. I risultati ottenuti dalle sperimentazioni effettuate saranno meglio affrontati nei paragrafi successivi.

3.4 COLLAUDO DEI DISPOSITIVI

A monte della sperimentazione effettuata, è stato necessario fare un collaudo sistematico del sistema per verificare che tutto quanto fosse funzionante in condizioni di sicurezza. Nello specifico, prima di mettere in pressione il sistema, sono state testate le risposte di tutte le elettrovalvole, dei sensori, l'innesco della scintilla di accensione, il funzionamento dell'aspiratore e del corretto monitoring dei parametri sul sinottico realizzato. La prima accensione è stata effettuata inizialmente con l'avvio e lo spegnimento del pilota, quindi la sua riaccensione e l'innesco della portata primaria di gas proveniente dal tip della torcia. In questa fase, come combustibile, è stato utilizzato solamente metano. Verificato il corretto funzionamento della camera, si è ripetuto l'esperienza alimentando il sistema con una miscela di metano e GPL.

Le attività di test della torcia in scala reale sono state effettuate in maniera analoga. Questa tuttavia è stata alimentata interamente a GPL. A differenza del banco prova, sulla tubazione verticale di adduzione del flare gas, così da garantire la sicurezza dei sistemi ed evitare rischi accidentali, viene effettuato il purging delle condotte (pulizia con gas inerte – CO₂) sia prima dell'accensione, per evitare inneschi interni, sia in fase di spegnimento per scongiurare effetti di ingestione della fiamma e relativa detonazione della struttura.

3.5 SPERIMENTAZIONE DEI SISTEMI

Come precedentemente riportato, durante quest'ultima fase del progetto sono state simulate analiticamente, progettate e sperimentate tre differenti configurazioni di pilota. Il gruppo "testa torcia" infatti si compone di un tip (zona di ancoraggio della fiamma) e da un pilota di innesco che deve essere attivo in continuo per garantire costantemente che l'efflusso di flare gas venga opportunamente incendiato.

A sua volta il pilota è composto da una sezione di efflusso del gas combustibile (tipicamente alimentata a metano CH_4) e da un sistema di elettrodi per la formazione della scintilla d'innescio.

Tuttavia, alla luce dei risultati ottenuti dalla prima accensione del banco prova, è stato necessario riprogettare una nuova geometria del pilota, al fine di completare la fase di sviluppo dei prototipi di nuova concezione. Infatti la prima accensione ha evidenziato una dimensione della fiamma del pilota molto simile a quella del bruciatore principale (perdendo di fatto la funzionalità di pilota premiscelato). In particolare il post-processing dei dati sperimentali ha evidenziato le seguenti criticità:

- Alto livello di instabilità nel flusso principale
- Forte impatto del flusso pilota sul flusso principale
- Elevata altezza complessiva della fiamma

Dopo numerose considerazioni tecniche, si è giunti al fatto che l'instabilità è dovuta alla particolare conformazione del sistema di iniezione, che determina una condizione di instabilità nel miscelamento tra aria e combustibile, tipica delle fiamme *lifted* alimentate da getto assialsimmetrico di combustibile. In questo modo il pilota interagisce pesantemente con il getto centrale, creando una configurazione fluidodinamica di difficile interpretazione. Il flusso risultante quindi si rivela essere difficilmente schematizzabile a livello analitico, rendendo le previsioni di altezza della fiamma condotte, inadeguate.

La nuova geometria è stata quindi concepita e progettata in modo tale da ottenere i seguenti risultati:

- Migliorare l'ancoraggio della fiamma sulla testa e diminuire le instabilità
- Ridurre l'impatto fluidodinamico del pilota sul flusso principale, lasciando ad esso la possibilità di assolvere alla sua funzione primaria, ovvero la fornitura di una potenza termica localizzata

Il design è stato ottenuto tramite un foglio di calcolo che utilizza un approccio di tipo correlativo tenendo conto dei limiti in termini di portata di combustibile realmente bruciabile in fase sperimentale e dei vincoli sulle dimensioni imposte dai problemi legati alla fabbricazione dei componenti.

Dalla sperimentazione effettuata si è potuto riscontrare quindi che la tipologia e la geometria di pilota determinano fortemente l'ancoraggio della fiamma prodotta dalla combustione del flare gas.

In Figura 22 sono visibili le foto dei tre piloti realizzati e testati:



Figura 22: Tre tipologie di pilota realizzate – diffusivo; parzialmente premiscelato; fortemente premiscelato

I tre sistemi si presentano di natura estremamente differente; il primo infatti è stato pensato per generare delle fiamme puramente diffusive, riducendo quindi la fase di miscelamento del gas con l'aria comburente solamente alla sezione di uscita. Questo tipo di tecnologia rappresenta lo stato dell'arte dei comuni sistemi pilota montati sulle teste dei bruciatori industriali. Tuttavia per loro natura le fiamme diffusive favoriscono la formazione di NO_x e di CO, non riuscendo appunto a raggiungere su tutte le zone della fiamma le condizioni stechiometriche ottimali per una completa riduzione chimica dei reagenti. Il secondo prototipo sperimentale di pilota sviluppato è una derivazione del primo. Questo presenta una serie di forature sulla sezione bassa del canale di uscita del gas; per trascinamento viscoso l'aria comburente viene aspirata generando un parziale premiscelamento e producendo così una fiamma maggiormente vicina alle condizioni stechiometriche.

Il terzo prototipo invece è quello presentato nei precedenti paragrafi e ottenuto tramite analisi CFD, progettato e poi realizzato per avere un forte mixing del combustibile e del comburente prima della sezione di innesco così da produrre fiamme fortemente premiscelate, tipicamente caratterizzate da una colorazione

azzurra. I tre dispositivi sono stati testati nelle medesime condizioni operative e l'analisi della fiamma si è fondata principalmente sull'osservazione visiva della sua risposta alle variazioni di portata.

Nelle foto riportate in Figura 23 sono visibili il tipo di fiamma prodotta con ciascuno dei tre prototipi di pilota di cui sopra.



Figura 23: Fiamma di innesco prodotta dalle tre tipologie di pilota sviluppate

Come risulta facilmente visibile dalle prove sperimentali effettuate, la combustione cambia progressivamente la sua natura passando dal colore giallo caratteristico delle fiamme fortemente diffusive, ottenute con la prima tipologia di pilota, per arrivare ad una fenomenologia prettamente premiscelata chiaramente individuata dalla colorazione azzurra, ottenuta con il pilota di nuova concezione sviluppato nel corso delle attività. Perlopiù le fiamme prodotte con il pilota di riferimento (quello diffusivo), a parità di portata combusta, hanno presentato dei fronti con estensioni in altezza nettamente più ampi rispetto a quelli ottenuti con il pilota premiscelate; anche la stabilità, l'ancoraggio e la velocità di innesco del sistema sono risultati migliorati rispetto con l'utilizzo del pilota di nuova concezione. Analogamente i fronti di fiamma prodotti dalle teste hanno mostrato differenti comportamenti a secondo del pilota installato. Il primo tipo di pilota porta ad una dinamica di combustione determinata dalla fluidodinamica dei due getti di gas incidenti, promuovendo l'allungamento complessivo della fiamma di flare gas: il sistema ha infatti riposto con dei fronti di circa 4,5 m di altezza fortemente affetti da turbolenza. L'ancoraggio della fiamma sulla testa però è risultato stabile anche lavorando con la porta della

camera aperta (introducendo così una corrente laterale) o con il sistema di aspirazione acceso. Con la seconda tipologia di pilota messo a punto, per quanto sia stato possibile avvicinarsi alle condizioni di premiscelamento, il fronte di fiamma si è ridotto considerevolmente, raggiungendo altezze prossime ai 2 m. Tuttavia alcuni problemi legati ad un trascinarsi viscoso non sufficiente hanno portato ad abbandonare questa soluzione. Infatti i fori dai quali doveva entrare aria per il premiscelamento del metano ad uso pilota hanno presentato un gradiente di pressione non adeguato tanto da portare la fiamma ad innescarsi direttamente sugli stessi piuttosto che sulla bocca di uscita del pilota. L'innescamento del sistema è risultato leggermente più difficoltoso e la fiamma di flare gas – come visibile anche dalle foto di cui sotto – ha mostrato una forte turbolenza. Anche in prossimità dei bordi di attacco con il tip della torcia, in questa configurazione, la fiamma si è presentata di natura prettamente diffusiva. Con la terza tipologia di pilota prototipo, si sono invece superate le criticità riscontrate con i sistemi precedentemente messi a punto, ottenendo una fiamma di circa 1,5 m, di natura diffusiva sulla parte alta e con la sezione di attacco esterna al tip. Anche in questo caso la fiamma ha dimostrato una grande facilità di innescamento (sia del pilota tramite arco fotovoltaico, che del flusso primario di flare gas). Le foto riportate in Figura 24 illustrano quanto sopra esplicitato.



Figura 24: Combustione di flare gas prodotta dalle tre tipologie di pilota sviluppate

Alla luce delle considerazioni emerse dalle prove sperimentali effettuate, si è ritenuto opportuno considerare il terzo gruppo pilota realizzato (testa di adduzione e catodi di innescamento scintilla) come la configurazione ottimizzata ed innovativa rispetto all'attuale stato dell'arte (rappresentato dal primo prototipo

messo a punto) per la formazione di fiamme da innesco di flare gas altamente premiscelate. Le prove sperimentali effettuate sulle diverse geometrie prototipali di teste sono state quindi interamente effettuate utilizzando tale tipologia di sistema pilota. Nello specifico i criteri per i quali si è valutato che tale prototipo fosse significativamente performante rispetto ai precedenti si sono concentrati sull'ancoraggio e la resistenza della fiamma prodotta sia dal pilota che dal bruciatore, sulla facilità di innesco del flare gas sulla lunghezza del fronte di fiamma generato. Nella foto sottostante è riportato un istante della fase di innesco da parte del pilota della vena centrale di flare gas. Nelle foto di Figura 24 si vede chiaramente come la piuma prodotta dal pilota generi un flusso costante sull'intorno del quale la fiamma del flare gas si avviluppa formando una spirale. Tale fenomeno, come verificato sperimentalmente e sopra riportato, genera un abbassamento relativo, rispetto agli altri due prototipi testati, della fiamma prodotta dalla torcia.



Figura 25: Fase di innesco della vena di Flare gas ad opera del pilota.

3.6 PROVE SPERIMENTALI EFFETTUATE SUI PROTOTIPI DI TESTA PER TORCE INDUSTRIALI

Come previsto dall'attività del progetto, in questa fase del lavoro si è dovuto provvedere alla realizzazione fisica dei prototipi studiati. Questi sono riducibili concettualmente in due tipologie differenti: una basata sulla medesima struttura dello stato dell'arte dei sistemi e una in grado di supportare l'implementazione di componenti differenti, al fine di variarne le caratteristiche, sviluppando così soluzioni tecniche alternative.

Successivamente alla loro realizzazione, si è proceduto con una campagna di sperimentazione degli stessi sul banco di prova, allo scopo di verificare il raggiungimento degli obiettivi prefissati nel progetto nonché le potenzialità dei banchi prova messi a punto. Tale verifica è stata quindi supportata da i dati numerici ricavati dai sensori e dalle valutazioni sperimentali riscontrate dall'osservazione empirica del fenomeno generato.

Sono state complessivamente eseguite 3 differenti campagne complete di sperimentazione, atte a vedere il comportamento della fiamma sulle geometrie di testa realizzate durante le fasi di attività del progetto.

Le configurazioni utilizzate sono state le seguenti (Tabella 5):

	<i>Testa della torcia</i>	<i>Pilota</i>
Configurazione 1	Testa convergente con corona forata per ancoraggio fiamma e fori di premiscelamento sulla base	Pilota di terza generazione per fiamme altamente premiscelate
Configurazione 2	Testa convergente con corona forata per ancoraggio fiamma	Pilota di terza generazione per fiamme altamente premiscelate
Configurazione 3	Testa divergente	Pilota di terza generazione per fiamme altamente premiscelate

Tabella 5: Configurazioni sperimentali delle prove effettuate sul banco

3.6.1 CONFIGURAZIONE 1

Le condizioni di test sperimentate hanno previsto 5 istanti di misura, effettuati rispettivamente in condizioni di funzionamento differente. Questi si riferiscono rispettivamente alle fasi di:

- Accensione
- Regime a 5 min dall'accensione
- Immissione vapore
- Immissione Acqua
- Immissione Gasolio
- Spegnimento

La prova in questione è stata effettuata utilizzando esclusivamente metano sia per l'alimentazione del pilota che della linea di flare gas.

Linea	S	Grandezza	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5	Test 6	Unit
Linea__CH4 main	M 10	Portata	0,00	91,65	128,77	152,29	138,75	0,00	m3/h
Linea__Propano	M 20	Portata	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	m3/h
Linea__CH4 pilot	M 30	Portata	2,88	1,44	1,44	1,44	1,44	0,00	m3/h
Linea__CH4 main	T 10	Temperatura	12,4	5,1	6,3	7,1	3,9	7,5	°C
Linea__CH4 main	T 20	Temperatura	7,1	7,7	8,3	7,7	7,1	7,8	°C
Linea__Propano	T 30	Temperatura	10,2	10,4	7,7	10,3	9,2	10,8	°C
Linea__Flare gas	T 50	Temperatura	10,0	9,6	8,5	6,4	9,4	9,4	°C
Linea__Flare gas	T 60	Temperatura	9,2	7,5	7,7	11,4	6,6	7,8	°C
Linea__Flare gas	T 65	Temperatura	11,1	3,4	9,7	9,7	2,8	8,3	°C
Linea__Vapore	T 70	Temperatura	6,9	9,1	11,0	12,8	12,9	13,7	°C
Linea__CO2	T 80	Temperatura	7,5	8,0	9,1	8,7	9,0	8,5	°C
Linea__N2	T 90	Temperatura	10,4	6,2	8,3	9,1	7,9	9,0	°C
Linea__Aux	T 100	Temperatura	-	-	-	-	-	-	°C
Corpo__Camera	T 110	Temperatura	26,8	136,4	190,2	225,7	230,1	66,0	°C
Corpo__Camera	T 111	Temperatura	25,9	137,2	191,4	215,9	234,5	59,6	°C
Corpo__Camera	T 112	Temperatura	26,1	134,4	196,4	233,6	230,1	61,2	°C
Corpo__Camera	T 120	Temperatura	34,0	196,7	266,0	306,0	331,5	91,6	°C
Corpo__Camera	T 121	Temperatura	29,1	177,9	258,4	305,7	340,5	92,5	°C
Corpo__Camera	T 122	Temperatura	27,2	190,1	268,1	307,7	328,6	73,0	°C
Corpo__Camera	T 130	Temperatura	35,8	223,2	304,1	355,8	394,4	117,5	°C
Corpo__Camera	T 131	Temperatura	16,3	176,5	253,7	288,2	366,9	179,8	°C
Corpo__Camera	T 132	Temperatura	34,6	221,2	306,1	355,9	399,6	96,0	°C
Uscita__Camera	T 140	Temperatura	37,9	270,9	339,3	372,0	375,5	38,3	°C
Linea__CH4 main	P 10	Pressione relativa	0,33	0,00	0,05	0,06	0,02	0,37	bar
Linea__Propano	P 20	Pressione relativa	0,03	0,02	0,00	0,00	0,06	0,04	bar
Linea__CH4 pilot	P 30	Pressione relativa	0,06	0,05	0,03	-0,05	0,02	0,03	bar
Camera__mixing	P 40	Pressione relativa	0,12	0,08	0,03	0,04	0,03	0,03	bar
Uscita__riscald	P 60	Pressione relativa	0,08	0,01	0,01	0,07	0,00	0,00	bar
Usc__waterseal	P 65	Pressione relativa	0,06	0,01	0,04	0,03	0,02	0,00	bar
Linea__CO2	P 80	Pressione relativa	0,03	0,02	0,03	0,02	0,01	0,03	bar
Linea__N2	P 90	Pressione relativa	0,03	0,08	0,02	0,01	0,02	0,00	bar
Linea__Aux	P 100	Pressione relativa	-	-	-	-	-	-	bar
Linea__CO2	M 80	Portata	0,000	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	m3/h
Linea__N2	M 90	Portata	0,000	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	m3/h
Linea__Aria	M 95	Portata	0,021	0,021	0,02	0,02	0,02	0,02	m3/h

Tabella 6: Registrazione dati configurazione 1

Oltre alle misure puntuali, riportati in Tabella 6, il sistema è stato impostato per registrare i transitori dalla fase di accensione della fiamma fino allo spegnimento. Come precedentemente sottolineato, il software sviluppato permette di registrare contemporaneamente lo storico dei sensori richiesti: nella prova effettuata si è scelto di monitorizzare alcune termocoppie inserite all'interno della camera, in maniera da ottenere il profilo di temperatura generato dalla fiamma all'interno del banco prova (vedi Figura 26).

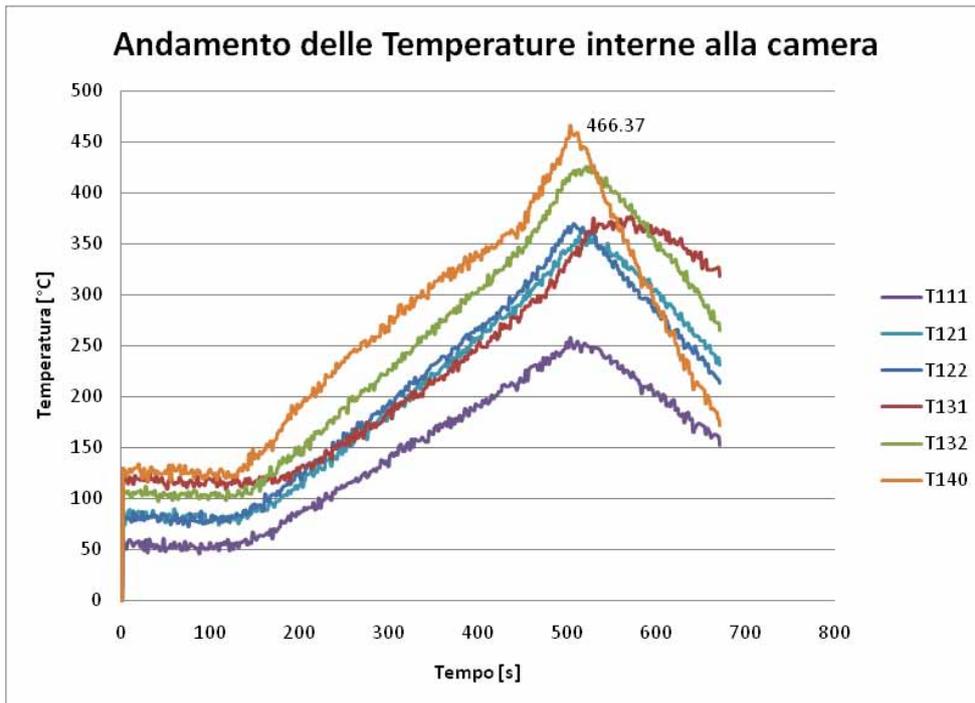


Figura 26: Registrazione andamento delle temperature interne alla camera

L'andamento mostra il progressivo incremento della temperatura interna della camera, all'aumentare della portata di metano immessa sulle linee. I sensori posizionati lungo il corpo del banco sono stati provvisti di appositi rivestimenti schermanti, in maniera da limitare l'effetto dell'irraggiamento diretto.

La temperatura massima viene percepita sulla termocoppia posta all'imbocco della sezione di estrazione dei gas (sulla sommità del banco) per effetto dell'irraggiamento prodotto dal fronte di fiamma. Essendo questa infatti posizionata sulla sommità della struttura, offre un fattore di vista nettamente superiore alle altre che sono invece disposte radialmente rispetto all'asse centrale.

Oltre a quella inerente le temperature, è stata effettuata anche la registrazione continua dell'andamento della portata di metano progressivamente immessa nel banco prova. Come si può vedere dal grafico di Figura 27, il test è stato effettuato prima operando sull'immissione del metano di alimento per la fiamma pilota e solo successivamente con la progressiva alimentazione sul canale di adduzione primario. La frequenza di campionamento adoperata per il rilevamento delle misure, trattandosi di grandezze fisiche che risentono di una considerevole inerzia, è stata impostata ad 1 secondo, mentre quella di visualizzazione a schermo presenta un refresh di 2 secondi. Inoltre, in maniera da rilevare degli andamenti che possano risultare significativamente leggibili anche in intervalli temporali ridotti, si è deciso sull'interfaccia visuale del sistema, di mediare il valore letto rispetto alle tre letture precedenti. Questo passaggio prettamente numerico-computazionale, garantisce comunque la corretta acquisizione da parte del sistema poiché le grandezze monitorizzate rappresentano fenomeni continui nel tempo. L'andamento delle portate di metano elaborate mostra come il rapporto tra il quantitativo di metano bruciato in torcia e nel pilota risulti molto elevato. Il funzionamento del sistema pilota deve infatti risultare il meno dispendioso possibile, garantendo comunque le condizioni di innesco della vena principale di flare gas. La sua ottimizzazione risulta pertanto fondamentale per l'efficienza complessiva della torcia.

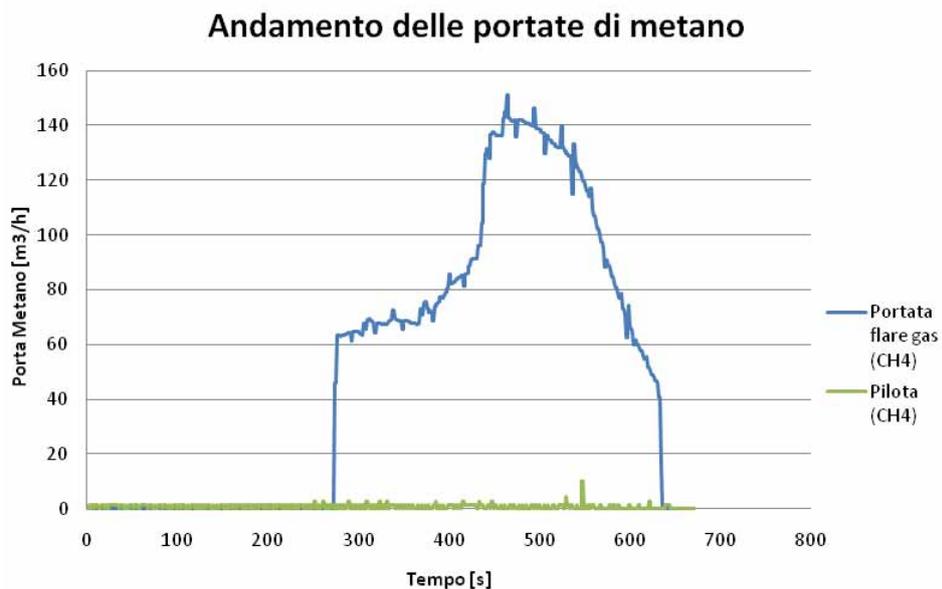


Figura 27: Andamento delle portate di metano elaborate dalla camera sulla linea primaria e sul pilota

Nelle immagini riportate in Figura 28, sono visibili le foto scattate in corrispondenza delle 6 misurazioni sopra riportate:



Test 1: Accensione



Test 2 : Regime



Test 3: Immissione
vapore



Test 4: Immissione
Acqua



Test 5: Immissione Gasolio



Test 6: Spegnimento

Figura 28: Fasi di attività della condizione di funzionamento 1

Come è facilmente visibile dall'immagine del Test n°6 sopra riportata (Figura 28), riducendo la portata di metano lungo la linea primaria, si riduce anche l'effetto di trascinato viscoso, portando le forature realizzate sulla base della torcia ad infiammarsi (eliminando così l'effetti di premiscelamento). Ovviamente tale fenomeno comporta che la formazione di inquinati tipici prodotti da fiamme diffusive risenta di un lieve aumento.

Partendo da tale configurazione si è valutato di ridisegnare la medesima geometria di testa sprovvista della corona forata posizionata alla base. Al contrario la corona di ancoraggio posta sulla sommità è stata infittita con 3 anelli di foratura da 1 mm così da garantire un migliore ancoraggio della fiamma sulla testa.

3.6.2 CONFIGURAZIONE 2

Le condizioni di test sperimentate nella seconda configurazione hanno previsto 3 istanti di misura, effettuati in maniera analoga a quanto già illustrato sopra. Queste si riferiscono rispettivamente a:

- Accensione
- Con sistema di aspirazione attivo – stabilità e ancoraggio -
- Immissione Gasolio

La prova in questione è stata effettuata utilizzando esclusivamente propano (GPL) per l'alimentazione della linea di flare gas, mentre il pilota è stato fatto lavorare con metano (CH₄).

Anche in questa occasione sono stati monitorizzati i transitori termici della camera, ottenendo dei profili comparabili con quelli precedenti (vedi Figura 29).

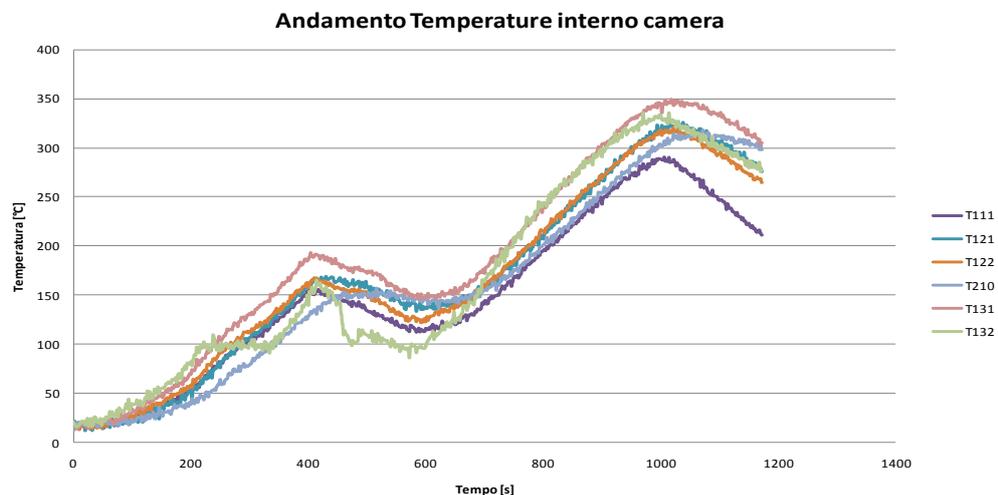


Figura 29: Andamento delle temperature interne alla camera

Utilizzando GPL, avvicinandosi così a delle condizioni di test più simili a quelle effettive di funzionamento di una torcia impegnata in attività industriali, si è optato per lavorare con portate significativamente più basse rispetto al caso precedente. Questo risulta facilmente visibile anche dal gradiente di salita riportato in Figura 29: infatti mentre prima (Figura 26) si raggiungevano circa i

450 °C in approssimativamente 600 secondi, nel caso in questione si raggiungono i 250°C in 1000 secondi. La tabella Tabella 7 riporta le misurazioni registrate con il sistema di acquisizione:

Linea	S	Grandezza	Test 1	Test 2	Test 3	Unit
Linea__CH4 main	M 10	Portata	0,00	0,00	0,00	m3/h
Linea__Propano	M 20	Portata	14,3	23,6	15,8	m3/h
Linea_CH4 pilot	M 30	Portata	2,88	2,9	2,9	m3/h
Linea__CH4 main	T 10	Temperatura	16,7	16,7	16,4	°C
Linea__CH4 main	T 20	Temperatura	17,0	17,2	16,7	°C
Linea__Propano	T 30	Temperatura	18,8	19,2	16,4	°C
Linea_Flare gas	T 50	Temperatura	18,3	19,6	19,0	°C
Linea_Flare gas	T 60	Temperatura	13,9	13,4	14,0	°C
Linea_Flare gas	T 65	Temperatura	16,1	17,0	17,5	°C
Linea__Vapore	T 70	Temperatura	17,5	18,7	19,8	°C
Linea____CO2	T 80	Temperatura	17,4	17,9	17,4	°C
Linea____N2	T 90	Temperatura	17,3	17,6	16,8	°C
Linea____Aux	T 100	Temperatura	0,0	0,0	0,0	°C
Corpo__Camera	T 110	Temperatura	131,2	127,8	149,7	°C
Corpo__Camera	T 111	Temperatura	137,	133,3	157,4	°C
Corpo__Camera	T 112	Temperatura	134,8	125,6	151,1	°C
Corpo__Camera	T 120	Temperatura	171,0	163,9	192,9	°C
Corpo__Camera	T 121	Temperatura	157,8	157,5	177,8	°C
Corpo__Camera	T 122	Temperatura	151,2	147,6	174,9	°C
Corpo__Camera	T 130	Temperatura	193,1	188,6	209,8	°C
Corpo__Camera	T 131	Temperatura	151,4	149,9	166,2	°C
Corpo__Camera	T 132	Temperatura	174,3	172,1	192,5	°C
Uscita__Camera	T 140	Temperatura	111,2	110,4	189,2	°C
Linea__CH4 main	P 10	Pressione relativa	0,16	0,16	0,19	bar
Linea__Propano	P 20	Pressione relativa	0,19	0,18	0,31	bar
Linea_CH4 pilot	P 30	Pressione relativa	0,07	0,12	0,08	bar
Camera__mixing	P 40	Pressione relativa	0,18	0,19	0,10	bar
Uscita__riscald	P 60	Pressione relativa	0,21	0,19	0,14	bar
Usc__waterseal	P 65	Pressione relativa	0,21	0,19	0,08	bar
Linea____CO2	P 80	Pressione relativa	0,04	0,02	0,03	bar
Linea____N2	P 90	Pressione relativa	0,10	0,06	0,09	bar
Linea____Aux	P 100	Pressione relativa	0,00	0,00	0,00	bar
Linea____CO2	M 80	Portata	0,00	0,00	0,00	m3/h
Linea____N2	M 90	Portata	0,00	0,00	0,00	m3/h
Linea____Aria	M 95	Portata	0,00	0,00	0,00	m3/h

Tabella 7: Registrazione dati configurazione 2

La configurazione allestita ha mostrato rispetto allo stato dell'arte dei sistemi una buona efficienza di combustione, generando sulla sezione di ancoraggio

della fiamma un buon livello di premiscelamento e garantendone così l'ancoraggio (Figura 30).



Test 1: Accensione

Test 2 : Con aspiratore
attivo

Test 3: Immissione
gasolio

Figura 30: Fasi di attività della condizione di funzionamento 2

L'attivazione del sistema di aspirazione, combinato con l'apertura della porta di accesso della camera, ha generato una forte turbolenza all'interno del banco prova. La fiamma ha ridotto considerevolmente la sua estensione verticale, generando delle escrescenze di forma sferica. Nonostante la massiccia attività legata alla turbolenza generata, la fiamma è rimasta ancorata alla testa senza mostrare problemi di spegnimento.

Con l'iniezione di gasolio, la fiamma incrementa notevolmente la sua volumetria, riducendo le miglie prodotte dall'effetto di miscelamento generato dalla geometria della testa stessa. Come visibile dalle foto di cui sopra, il fenomeno diventa puramente diffusivo, acquistando il caratteristico colore giallo e producendo perlopiù dello "smoke" sia sulla sommità della piuma che sulle frange laterali.

Nella documentazione allegata al progetto, sono riportati anche numerosi video nei quali la variazione della fenomenologia della fiamma viene ben evidenziata.

3.6.3 CONFIGURAZIONE 3

Le condizioni di test sperimentate nella terza configurazione hanno previsto 7 condizioni di misura.

Queste si riferiscono rispettivamente a:

- Accensione
- Regime a 5 min dall'accensione
- Con sistema di aspirazione attivo – stabilità e ancoraggio -
- Immissione vapore
- Immissione Acqua
- Immissione Gasolio
- Spegnimento

Come nel caso precedente, la prova in questione è stata effettuata utilizzando esclusivamente propano (GPL) per l'alimentazione della linea di flare gas, mentre il pilota è stato fatto lavorare con metano (CH₄). A differenza dei test sperimentali riportati in precedenza, il "tip" del prototipo testato presenta la configurazione divergente di cui prima discusso.

Anche in questo caso si è lavorato con una portata di combustibile ridotta, in maniera da ottenere un fronte di fiamma non eccessivamente alto.

Sfruttando l'effetto fluidodinamico prodotto dalla divergenza della testa, ottenendo così una diminuzione della velocità di uscita del flare gas e un rispettivo aumento della pressione locale, nella zona terminale della testa si vengono a formare dei vortici di turbolenza che permettono un migliore premiscelamento con l'aria comburente.

Rispetto allo stato dell'arte dei sistemi e anche alle due geometrie precedentemente sperimentate, la configurazione allestita ha presentato un'efficienza di combustione superiore, generando sulla sezione di ancoraggio della fiamma un livello di premiscelamento nettamente superiore alle altre.

Questo è risultato facilmente visibile dalla formazione persistente di fiamme colore azzurro/blu, riducendo la parte diffusiva solo alla sommità della piuma. Inoltre anche l'ancoraggio stesso della fiamma è risultato essere efficace, pur non avendo la corona di fori, presente sulle configurazioni precedenti, realizzata sulla sommità della testa.

La tabella sottostante riporta i valori acquisiti nelle differenti condizioni di test sopra indicate.

Linea	S	Grandezza	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5	Test 6	Test 7	Test 8	Unit
Linea__CH4 main	M 10	Portata	1,8	14,8	14,3	23,55	22,5	14,5	14,3	14,4	m3/h
Linea__Propano	M 20	Portata	0,0	0,0	0,0	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0	m3/h
Linea__CH4 pilot	M 30	Portata	2,81	2,92	2,97	2,88	2,93	2,76	2,43	2,54	m3/h
Linea__CH4 main	T 10	Temperatura	14,4	15,4	15,2	14,20	15,1	14,1	15,1	14,3	°C
Linea__CH4 main	T 20	Temperatura	14,7	15,4	15,2	15,27	15,4	14,3	14,8	15,1	°C
Linea__Propano	T 30	Temperatura	16,2	15,8	16,5	15,29	16,4	16,7	16,3	15,2	°C
Linea__Flare gas	T 50	Temperatura	16,2	16,8	16,8	18,00	17,3	16,0	16,7	16,4	°C
Linea__Flare gas	T 60	Temperatura	12,4	13,4	12,0	10,25	10,7	11,3	12,2	10,6	°C
Linea__Flare gas	T 65	Temperatura	17,0	13,3	16,2	14,40	18,2	16,0	17,7	14,7	°C
Linea__Vapore	T 70	Temperatura	17,8	17,5	20,4	16,69	17,4	52,8	52,0	31,5	°C
Linea__CO2	T 80	Temperatura	16,0	15,4	16,2	15,87	15,9	15,5	15,9	16,0	°C
Linea__N2	T 90	Temperatura	15,4	15,7	15,6	15,15	16,0	15,2	15,2	15,4	°C
Linea__Aux	T 100	Temperatura	0,0	0,0	0,0	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0	°C
Corpo__Camera	T 110	Temperatura	99,9	108,0	139,7	33,74	73,7	172,9	167,6	145,1	°C
Corpo__Camera	T 111	Temperatura	102,3	112,3	141,4	38,87	74,1	179,8	175,0	152,5	°C
Corpo__Camera	T 112	Temperatura	102,1	111,0	138,1	31,74	73,2	179,3	171,3	147,0	°C
Corpo__Camera	T 120	Temperatura	143,2	153,7	187,0	47,56	106,0	230,8	225,3	200,1	°C
Corpo__Camera	T 121	Temperatura	134,2	148,2	179,7	47,56	89,2	230,0	227,6	194,6	°C
Corpo__Camera	T 122	Temperatura	136,8	145,0	182,9	50,67	98,3	227,0	215,0	194,9	°C
Corpo__Camera	T 130	Temperatura	158,0	166,7	209,4	60,08	119,0	258,8	252,4	220,3	°C
Corpo__Camera	T 131	Temperatura	113,4	126,7	160,3	56,54	82,8	202,7	208,6	170,6	°C
Corpo__Camera	T 132	Temperatura	158,7	171,9	210,3	57,33	116,0	254,8	241,0	219,0	°C
Uscita__Camera	T 140	Temperatura	213,4	219,0	249,0	78,04	166,0	295,6	262,5	258,1	°C
Linea__CH4 main	P 10	Pressione rel	0,0	0,1	0,1	0,04	0,1	0,1	0,1	0,1	bar
Linea__Propano	P 20	Pressione rel	0,1	0,1	0,2	0,10	0,2	0,2	0,2	0,2	bar
Linea__CH4 pilot	P 30	Pressione rel	0,0	0,0	0,1	0,07	0,0	0,0	0,1	0,0	bar
Camera__mixing	P 40	Pressione rel	0,0	0,1	0,1	0,07	0,1	0,1	0,1	0,1	bar
Uscita__riscald	P 60	Pressione rel	0,0	0,2	0,1	0,06	0,1	0,1	0,1	0,2	bar
Usc__waterseal	P 65	Pressione rel	0,0	0,1	0,1	0,07	0,2	0,1	0,2	0,1	bar
Linea__CO2	P 80	Pressione rel	0,0	0,0	0,0	0,01	0,0	0,0	0,0	0,0	bar
Linea__N2	P 90	Pressione rel	0,0	0,0	0,0	0,01	0,0	0,0	0,0	3,9	bar
Linea__Aux	P 100	Pressione rel	0,0	0,0	0,0	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0	bar
Linea__CO2	M 80	Portata	0,0	0,0	0,0	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0	m3/h
Linea__N2	M 90	Portata	0,0	0,0	0,0	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0	m3/h
Linea__Aria	M 95	Portata	0,0	0,0	0,0	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0	m3/h

Tabella 8: Registrazione dati configurazione 3

Nelle immagini di Figura 31 sono riportate invece le foto scattate durante le rispettive fasi di test.

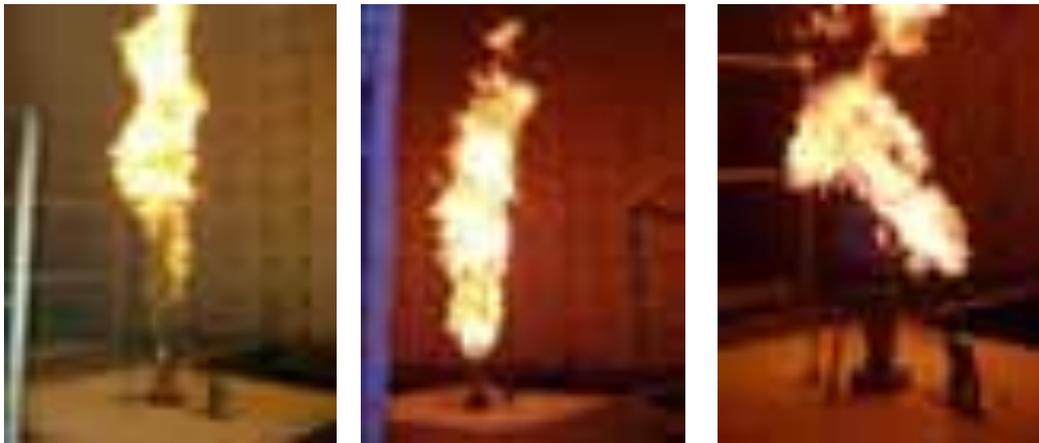


Test 1:
Accensione

Test 2:
Regime

Test 3:
Aspirato

Test 4:
Imm. vapore



Test 5:
Immissione acqua

Test 6:
Immissione. Gasolio

Test 7:
Spegnimento

Figura 31: Fasi di attività della condizione di funzionamento 3

La fiamma prodotta in tutte le diverse condizioni di funzionamento è risultata con un profilo della piuma nettamente più compatto rispetto a quello che si ottiene con i sistemi tradizionali. Anche la presenza di fenomeni forzanti, come ad esempio l'accensione dell'aspirazione, non ha perturbato considerevolmente la sua geometria, dimostrando così un funzionamento della testa di nuova concezione altamente performante sia in termini di stabilità, sicurezza e ancoraggio della fiamma. L'utilizzo di promotori di turbolenza come l'immissione del vapore e l'iniezione di acqua hanno mostrato un allungamento della zona premiscelata della fiamma (sulla sezione di uscita della testa), ma complessivamente non sono risultati caratterizzanti ai fini dell'analisi complessiva del fenomeno. L'immissione di gasolio ha prodotto un allargamento radiale del fronte di fiamma, spingendo questa verso le condizioni di diffusività. Tuttavia i livelli di premiscelamento ottenuti in condizioni di

normale attività (regime), hanno fatto sì che non nascessero creste scure (insorgenza di combustione sporca – smoke) sulla sommità della fiamma. Come effettuato nei test precedenti, anche in questa fase di sperimentazione sono stati registrati i valori numerici acquisiti nei transitori temporali sia del profilo termico interno alla camera che della portata di combustibile immesso sulle linee. I grafici riportati in Figura 32 e Figura 33 illustrano tali andamenti.

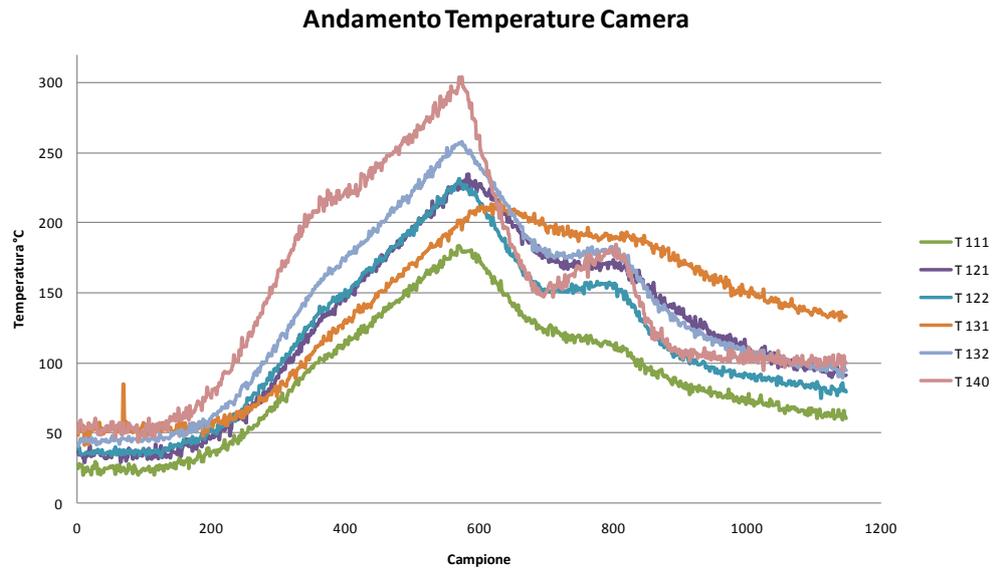


Figura 32: Andamento del gradiente termico interno alla camera

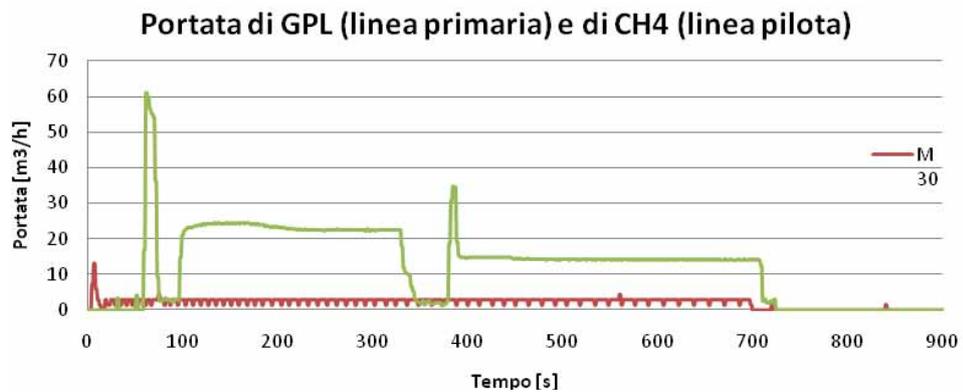


Figura 33: Andamento della portata di GPL e di CH4 di alimento

Come visibile dall'andamento della portata di GPL erogata sulla linea del flare gas, in fase di sperimentazione si è effettuata anche una prova di interruzione di efflusso del gas, così da testare la capacità di reinnesco e di corretto funzionamento del pilota in caso di erogazione discontinua di flare gas.

3.7 ANALISI DEGLI INQUINATI

Con l'impiego del sistema di acquisizione degli inquinati acquistato per le attività sperimentali di cui sopra, si sono effettuate delle misure sulle principali specie interessate. A tal proposito è importante sottolineare come tale rilevamento sulle torce, come sulla maggior parte dei dispositivi di combustione di interesse tecnico, comporti una notevole difficoltà di acquisizione (dovuta alla temperatura a cui si devono esporre i sensori) e un'incertezza sulla misura effettuata in condizioni di funzionamento. Questo ha portato quindi a dover risolvere problemi critici legati ai requisiti di controllo, delle misurazione e soprattutto della sicurezza del sistema di prova, rendendo il banco di test realizzato fortemente innovativo rispetto alle soluzioni disponibili. Questo è perlopiù confermato dalla scarsissima diffusione a livello europeo di aree prova per la sperimentazione in condizione operative di torce e dispositivi di combustione di *tail gases*. L'esperienza prodotta dalla ricerca operativa effettuata, ha così prodotto un know how fortemente qualificante per il personale coinvolto nell'attività permettendo loro di acquisire le competenze necessarie per definire la corretta messa a punto del campo di prova.

Il rilevamento delle concentrazioni degli inquinanti non è stato di facile ottenimento, soprattutto a causa della forte imprecisione commessa sulla stima della portata di aria aspirata dal sistema e passante nel canale di efflusso dei gas combusti (punto nel quale è stata applicata la sonda).

Di seguito (Figura 34) si riporta una scansione dei documenti prodotti dal sistema di acquisizione durante un test effettuato con il pilota di nuova concezione e la testa prototipale convergente con doppia corona di fori per l'ancoraggio, alimentati a metano.

Le emissioni prodotte dai sistemi tradizionali sono tipicamente calcolati per via indiretta. Dalla conoscenza delle composizioni dei combustibili, si procede con la stima delle concentrazioni degli inquinati – nota l'aria di diluizione; il loro rilevamento non viene quindi quasi mai effettuato direttamente, trattandosi appunto di sistemi industriali che tipicamente intervengono in condizioni di emergenza (spurgo del flare gas).



Figura 34: Scansione dei documenti prodotti dal sistema di acquisizione

Tuttavia, come già sottolineato dagli strumenti di analisi computazionale messi a punto nelle prime attività del progetto e verificato numericamente con le simulazioni, l'accoppiamento del pilota di nuova concezione con la testa convergente (e a maggior ragione con quella divergente per quanto ampiamente ribadito sopra) mostra un sostanziale calo delle concentrazioni di NO_x e di CO rispetto alle configurazioni che generano fiamme prettamente diffusive (sistemi convenzionali), ottenendo così una riduzione prossima al 10% delle emissioni inquinanti rispetto all'attuale stato dell'arte.

3.8 PROVA DI ACCENSIONE DERRIK

Sfruttando i sensori allestiti sullo skid, e potendo comandare l'accensione del Derrick utilizzando le stesse linee, è stato possibile effettuare dei test di funzionamento sulla torcia in scala reale per verificarne l'accensione e l'ancoraggio della fiamma in quota e sotto l'effetto degli agenti atmosferici. La prova sotto riportata (Tabella 9) è stata effettuata utilizzando metano sia per il pilota che per la linea primaria di adduzione del flare gas.

Linea	S	Grandezza	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5	Test 6	Unit
Linea__CH4 main	M 10	Portata	0,00	148,0	161,28	160,51	154,11	153,60	m3/h
Linea__Propano	M 20	Portata	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	m3/h
Linea__CH4 pilot	M 30	Portata	2,88	2,88	2,88	4,32	2,88	2,88	m3/h
Linea__CH4 main	T 10	Temperatura	7,62	6,83	6,59	6,48	5,90	5,86	°C
Linea__CH4 main	T 20	Temperatura	7,90	7,97	8,04	8,34	8,12	8,07	°C
Linea__Propano	T 30	Temperatura	7,66	7,32	7,35	7,57	7,56	7,24	°C
Linea_Flare gas	T 50	Temperatura	7,48	7,75	8,19	7,94	7,86	7,67	°C
Linea_Flare gas	T 60	Temperatura	5,91	4,84	5,23	5,06	5,26	5,26	°C
Linea_Flare gas	T 65	Temperatura	6,37	6,72	6,67	7,08	6,85	6,36	°C
Linea__Vapore	T 70	Temperatura	7,19	7,42	7,83	7,92	9,17	9,13	°C
Linea__CO2	T 80	Temperatura	8,04	8,06	8,02	8,30	8,21	7,92	°C
Linea__N2	T 90	Temperatura	8,13	7,99	8,24	8,22	8,28	8,25	°C
Linea__CH4 main	P 10	Pressione relativa	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	bar
Linea__Propano	P 20	Pressione relativa	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01	bar
Linea__CH4 pilot	P 30	Pressione relativa	0,07	0,06	0,06	0,06	0,05	0,05	bar
Camera__mixing	P 40	Pressione relativa	0,00	0,01	0,00	0,02	0,01	0,01	bar
Uscita__riscald	P 60	Pressione relativa	0,02	0,02	0,03	0,04	0,03	0,03	bar
Usc__waterseal	P 65	Pressione relativa	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	bar

Tabella 9: Misure effettuate sulle linee per il funzionamento del Derrik

La torcia ha risposto alla prova sperimentale con un corretto innesco e con il mantenimento della fiamma per l'intera durata del test (Figura 35).

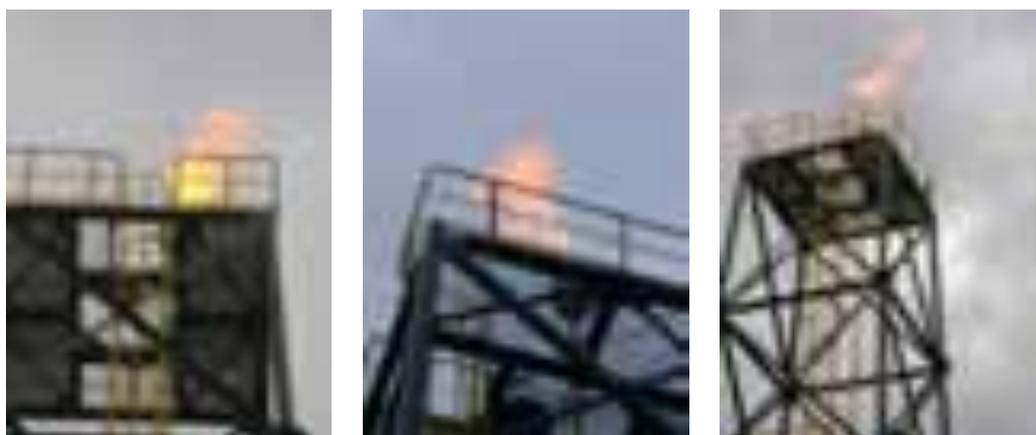


Figura 35: Fasi di accensione e funzionamento del Derrik

Questo ha previsto anche due intervalli con spegnimento, lavaggio con purge gas (CO₂) e riaccensione successiva. Tali prove sono state effettuate sia con alimentazione di metano puro, che con Gpl.

3.9 ANALISI TERMOGRAFICHE

L'impiego di tecnologie di ultima generazione per l'analisi termografica ha permesso di osservare i fenomeni studiati all'interno della camera di prova in modo continuo, rendendo fruibile una mappatura termica dell'intero sistema da affiancare a quanto rilevato dai sensori analogici, in maniera funzionale al progetto stesso. Inoltre, il monitoring di componenti non direttamente muniti di sensori per il rilevamento della temperatura (come ad esempio le bombole di stoccaggio dei gas tecnici), ha permesso di sviluppare in fase di allestimento e test del banco, alcuni accorgimenti tecnici per l'ottimizzazione del suo funzionamento. Primo tra tutti è stato il rilevamento degli effetti di congelamento delle bombole di metano dovuto alla laminazione del gas. Infatti, effettuando prove di circa 20 min, le bombole standard di metano presentavano una considerevole perdita di pressione (dovuta all'effetto della temperatura), con la corrispettiva riduzione di portata utile erogata sul banco. L'analisi effettuata con la termo camera ha permesso di visualizzare tale fenomeno (perlopiù visibile nei mesi invernali anche con la formazione di ghiaccio sulla superficie esterna dei contenitori) e di mettere a punto una doccia per garantire un continuo bagno di acqua sulle bombole stesse così da evitarne il raffreddamento.

I vari componenti del banco direttamente coinvolti nella sperimentazione sono stati analizzati con il sistema termografico, in maniera da poterne verificare le condizioni di funzionamento ed eventuali problemi di surriscaldamento lungo le linee di adduzione (che sono comunque provviste di termocoppie per la gestione dell'impianto).

Nelle foto riportate di seguito (Figura 36 e Figura 37), sono visibili alcuni dettagli del banco prova durante condizioni operative di test. Nello specifico sono visibili sia nello spettro del visibile che in quello termografico il sistema testa, pilota e ugelli di iniezione, la cupola coibentata della camera allo spegnimento della torcia ed infine la sezione convergente di scarico misurata esternamente.

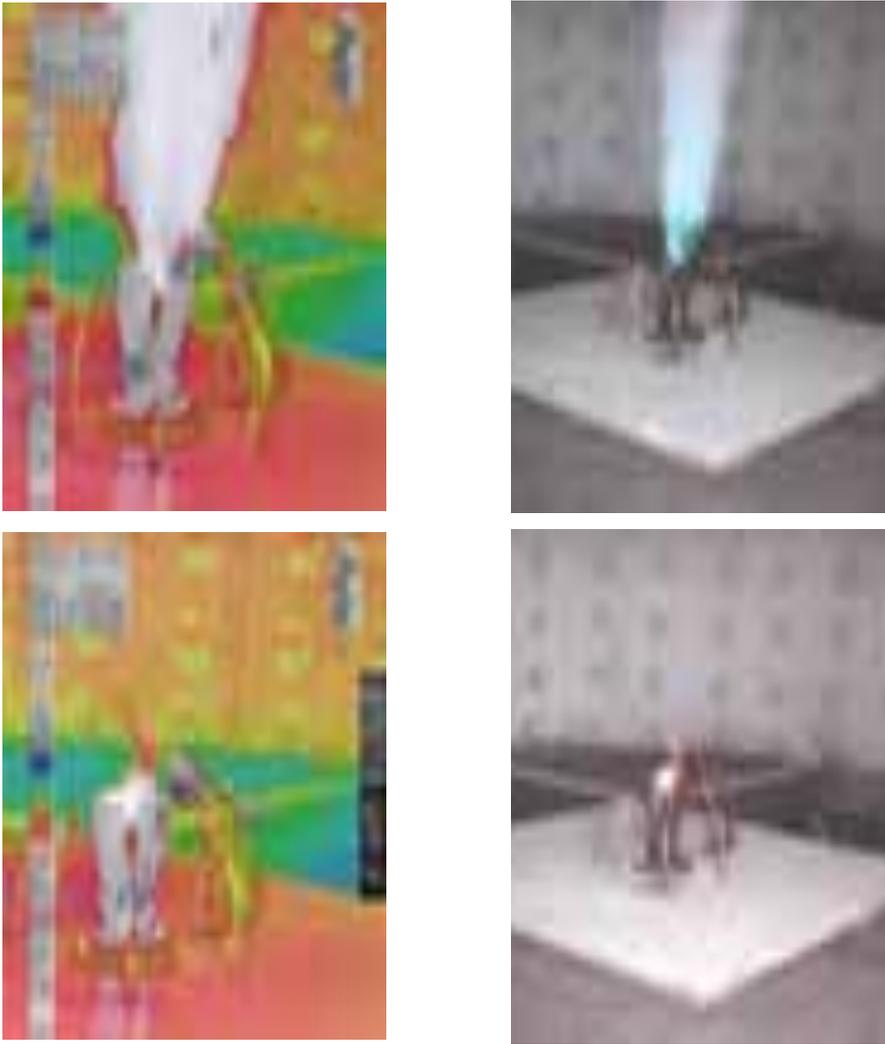


Figura 36: Analisi termografiche delle teste di torcia in fase di attività

Come risulta visibile dalle immagini registrate con la termo camera digitale (Figura 36), il metallo della testa deve sopportare delle temperature di funzionamento superiori ai 300°C (campo non direttamente registrabile dal sistema termografico per effetti di saturazione). Al contrario i canali di adduzione degli ausiliari raggiungono per irraggiamento temperature attorno ai 90°.

Al fine della sperimentazione sono state effettuate prove termografiche con entrambe le configurazioni sperimentali effettuate. Nelle foto sottostanti (Figura 37) è riportata la configurazione con testa convergente e ugello pilota di nuova concezione. Quelle precedenti (Figura 36) invece mostrano la configurazione con testa divergente sia in condizioni di attività che non.



Figura 37: Analisi termografica del gruppo "testa " a riposo

Di seguito invece si riportano le immagini rilevate sulle superfici interne ed esterne della camera.

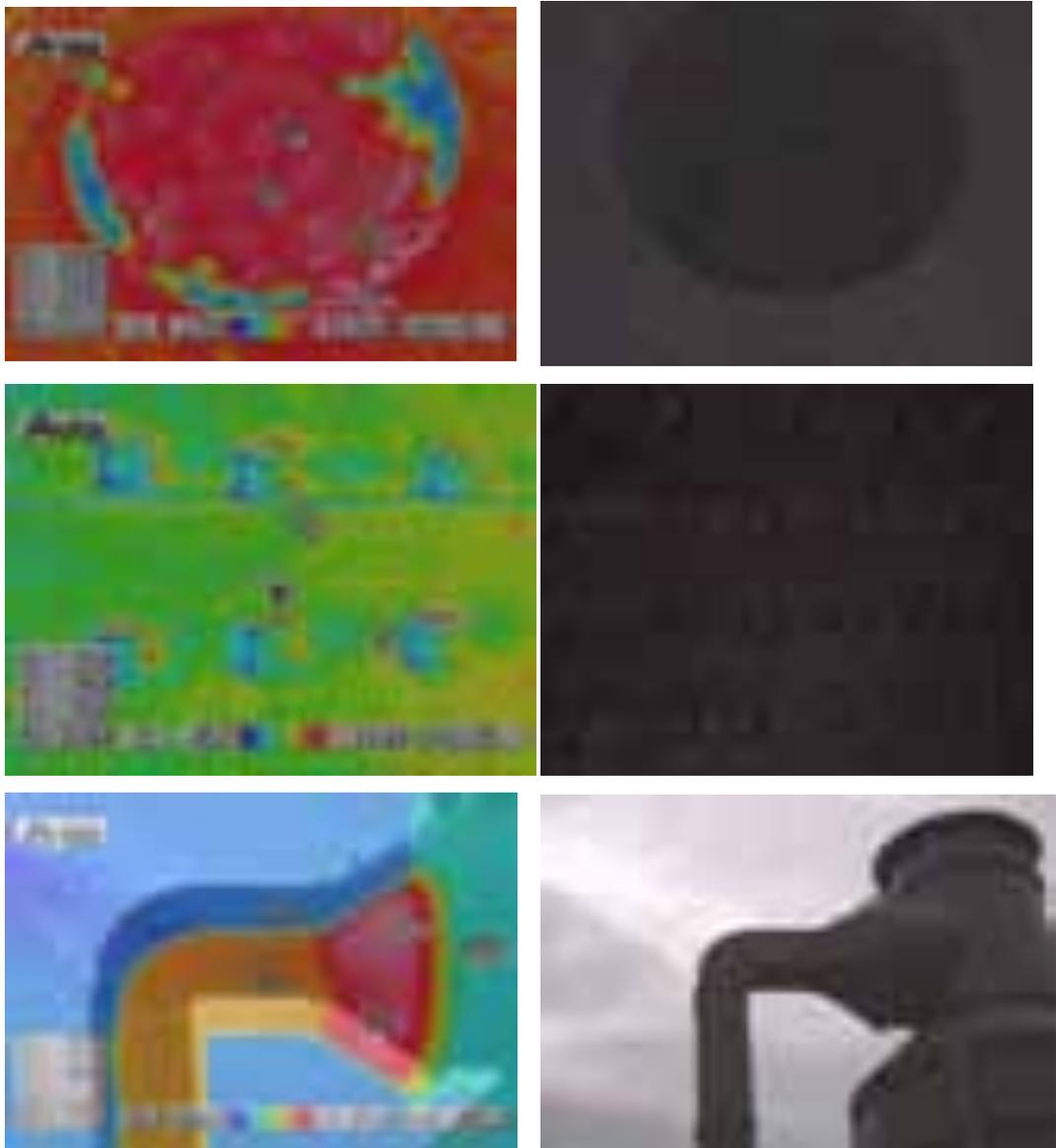


Figura 38: Analisi termografica dell'interno della camera di test

Rilevazioni significative sono state effettuate anche sul coibentante interno della camera di combustione. Le misure sono state effettuate a camera spenta, osservando quindi il raffreddamento del sistema sia in maniera diffusa (con la termo camera) che in maniera puntuale con le 9 termocoppie disposte sui tre anelli di cui già discusso nella documentazione inerente l'allestimento del sistema.

In maniera analoga anche la torcia in scala 1:1 è stata oggetto d'indagini con il sistema ad infrarossi. Tuttavia le misure effettivamente acquisite su di essa risultano meno significative rispetto a quanto registrato sulla camera di test. Infatti la distanza tra il punto di ripresa della termo camera e il punto di fuoco (circa 25 m) ha reso le letture complesse. Inoltre la termo camera funziona al massimo delle sue funzionalità in presenza di superfici opache. Provando a registrare la fiamma e non avendo nessun elemento posizionato dietro ad essa (avendo il cielo come sfondo) la trasparenza del gas rende la lettura particolarmente difficoltosa. In ogni modo è stato possibile avere una stima delle temperature raggiunte dal metallo delle strutture circostanti il punto di fuoco. Nelle figure sottostanti sono riportate due immagini (Figura 39) registrate durante un'accensione del sistema.

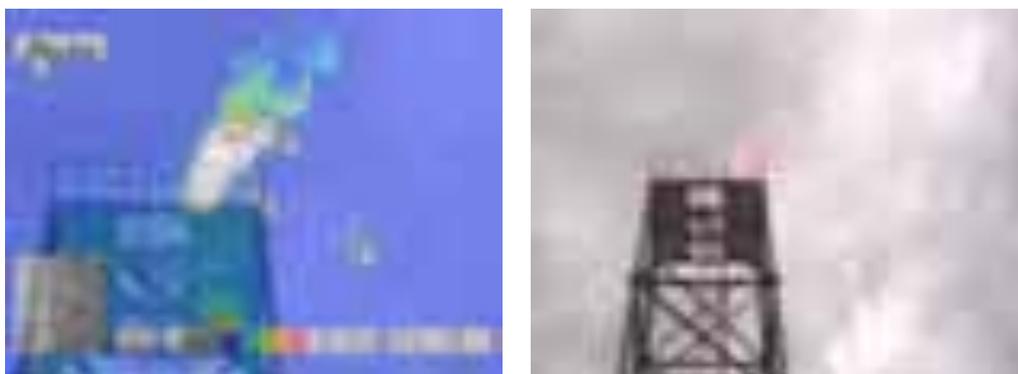


Figura 39: Analisi termografica della torcia in scala 1:1

Tutte le misure presentate, in accordo con quanto dichiarato nelle relazioni precedenti, sono state rilevate con la Termocamera nec-avio mod. Advancedthermo tvs-500ex con sensore microbolometrico vox non raffreddato di ultima generazione e Telecamera nel visibile integrata con funzioni di video mixer. Una foto di tale strumento scattata durante la sperimentazione è visibile in Figura 40.



Figura 40: Termocamera Flir AVIO con sistema di puntamento laser

3.10 VALUTAZIONI SULLA RIDUZIONE DI EMISSIONI DI CO₂

Per la stima della riduzione di CO₂ emessa, si è considerato lo studio ottenuto dai valori sperimentali ricavati dalla sperimentazione dei sistemi pilota. Per effettuare una valutazione, analogamente a quanto effettuato per le altre componenti del progetto, si è fatto riferimento alla condizione del pilota standard scalato, così da avere un termine di paragone rispetto ai prototipi di nuova concezione ottenuti.

Per valutare le riduzioni di emissioni, si è operato in condizioni normali (T_{rif} = 298 °K e P_{amb} = 101325 Pa). Per stimare il quantitativo di CO₂ coinvolta nella reazione di combustione della fiamma pilota, che si ricorda essere alimentata esclusivamente a metano (CH₄), si fa riferimento alla formulazione classica:



I calcoli che seguono permettono, nelle condizioni di riferimento di cui sopra, di quantificare le portate in gioco sotto forma di masse molari, e quindi individuare l'effettiva riduzione di CO₂ ottenibile coi sistemi di fiamma di nuova concezione.

	Peso molecolare			
CH₄	16.043		kg/mol	
CO₂	44.0098		kg/mol	
CH₄ pilota standard	4.31		Nm ³ /h	
CH₄ pilota nuova concezione	2.8		Nm ³ /h	
Rapporto molare CH₄/CO₂	"1:1"			
<hr/>				
ρ =	(P/(R x T))⁻¹		ρ	= 24.45261683 Nm ³ /kmol
P	101325		Pa	
R	8314.3			
T	298		K	
Condizioni Normali 298 °K e 101325 Pa				
CH₄ pilota standard				
3.2	Nm³/h CH₄	= 0.130	kmol/h CH₄	= 2.099473
3.2	Nm³/h CO₂	= 0.130	kmol/h CO₂	= 5.759357
			kg/h CH₄	
			kg/h CO₂	
<hr/>				
CH₄ pilota standard				
2.8	Nm³/h CH₄	= 0.114	kmol/h CH₄	= 1.837039
2.8	Nm³/h CO₂	= 0.114	kmol/h CO₂	= 5.039438
			kg/h CH₄	
			kg/h CO₂	
<hr/>				
Riduzione CO₂ emessa	12.50%			

Si può quindi concludere che i nuovi sistemi pilota ricavati dalla sperimentazione del sistema permettono una riduzione del 35% delle emissioni di CO₂ in atmosfera. Tale valutazione sarebbe stata difficilmente effettuabile direttamente sul tailgas, in quanto, a differenza del combustibile utilizzato per i piloti, questo si presenta in maniera disomogenea; pertanto un'eventuale variazione rispetto ad un sistema di riferimento non sarebbe stata significativa sull'innovazione effettuata sulle singole geometrie delle teste, quanto piuttosto sulle condizioni chimiche del gas elaborato o su quelle ambientali di prova.

3.11 VALUTAZIONI SULL'IRRAGGIAMENTO E SUL RUMORE PRODOTTO DALLE TORCE IN CONDIZIONI DI FUNZIONAMENTO

La valutazione dei carichi termici prodotti dai sistemi di fiamma messi a punto durante il progetto ha richiesto l'impiego di software dedicato per lo studio delle torce industriali. Nello specifico sono state effettuate simulazioni con "FlareSim" versione 3.0.2.210 distribuito da Softbits Consultants Ltd, sistema di calcolo che permette la valutazione tramite simulazione numerica dell'irraggiamento prodotto dalla torcia. Nello specifico sono state effettuate 4 differenti simulazioni in condizioni operative differenti: la prima è servita per la quantificazione dell'irraggiamento a parete sviluppato all'interno del banco prova, le altre tre sono riferite alle portate immesse sulla torcia in scala 1:1 simulata a terra (h=0 m), all'altezza minima per avere un valore di irraggiamento a terra conforme al limite di legge (h=5m), e all'altezza scelta per la realizzazione dell'impianto (h=22 m). Le condizioni ambientali con le quali sono state effettuate le tre simulazioni per il banco in scala reale di cui sopra, sono le seguenti: pressione atmosferica 1.013 bar, temperatura dell'aria 15.0 C, umidità 10.00 % e velocità del vento 20.000 m/s. In termini di condizioni legate alla zona di installazione del sistema, si è impostato un Background Noise pari a 60.0 dB e una radiazione solare di 0.800 kW/m². Le condizioni di immissione del fluido combustibile in atmosfera sono invece diverse a secondo del sistema simulato. Per la valutazione si è utilizzato un potere calorifico del propano di 46374.36 kJ/kg, stimato con un peso molecolare di 44.097 (valutato alla pressione atmosferica) e una temperatura di immissione del fluido di 24.9 °C. In maniera concorde a quanto poi riprovato sperimentalmente, i valori di portata di flare gas utilizzati per la simulazione della camera a terra si aggirano

sui 28 kg/h di propano, mentre per i sistemi in scala 1:1 la portata raggiunge i 260 kg/h a parità di diametro di uscita della testa di combustione (70 mm). Il software ha permesso, generando una mesh di calcolo appropriata, di stimare i valori d'irraggiamento e di rumorosità a distanze fisse rispetto al punto di combustione.

Con riferimento alla simulazione effettuata per l'interno del banco prova in scala ridotta, si è stimato che la radiazione media alla distanza di 2 m dal centro di combustione è di 1.7 kW/m^2 , producendo un rumore di fiamma medio prossimo agli 88 dB. Per quanto riguarda invece i valori della simulazione della torcia in scala 1:1 valutata come se fosse a terra, si stima numericamente che la massima radiazione – ovvero nella zona di combustione - è di 15 kW/m^2 , mentre in un raggio di 6 m lungo la direzione di disposizione della fiamma per effetto del vento, si hanno valori attorno ai 5 kW/m^2 . La simulazione della torcia in scala 1:1 valutata a 5 m di altezza da terra stima invece che la radiazione media a 6 m dal punto di fiamma è di circa 3 kW/m^2 , rispettando così i limiti di legge per lo stoccaggio di serbatoi di combustibile (*DM9 maggio 2007 – Direttive per l'attuazione dell'approccio ingegneristico alla sicurezza antincendio*). La simulazione effettuata con la torcia posta a 22 m di altezza da terra non ha fornito i valori di irraggiamento al suolo significativi. Questo dato è comunque significativo poiché consente di affermare che il banco è pienamente utilizzabile in condizioni di sicurezza anche per portate maggiori di quelle sperimentate, permettendo così un margine di operatività per sviluppi futuri del sistema.

3.12 RAGGIUNGIMENTO DEGLI OBIETTIVI DEL PROGETTO

In conclusione, alla luce dei dati sopra riportati, la realizzazione del progetto ha reso disponibile i seguenti elementi:

- Una serie di prototipi di torce innovative in grado di raggiungere i parametri di verifica finali riportati di seguito.
- Un banco prova innovativo per la sperimentazione di torce in ambiente controllato e sicuro.
- Una procedura di progettazione innovativa integrata con appositi sistemi di simulazione numerica, che permetta la progettazione e lo sviluppo di torce avanzate ed ottimizzate in funzione di obiettivi di processo definiti.
- Un background di conoscenze teorico e sperimentale che sviluppi le competenze interne aziendali, permettendo allo staff di ricerca di riconfermarsi all'avanguardia per l'intero settore.
- Una serie di risultati sperimentali sui prototipi studiati, tale da poter permettere una verifica effettiva del conseguimento dei risultati ed una valutazione affidabile dei vantaggi dell'eventuale industrializzazione di una o più delle soluzioni tecniche innovative sviluppate.

Gli elementi sopra citati sono risultati fondamentali per la politica di ricerca e sviluppo dell'azienda che ha partecipato alla realizzazione del progetto e rappresentano obiettivi di assoluto interesse nel settore scientifico della ricerca dei sistemi di combustione per uso industriale.

In Figura 41 si riportano alcune foto esemplificative delle sperimentazioni svolte



Figura 41: Sperimentazione dei prototipi innovativi

Al fine di classificare e confrontare tutte le prove sperimentali intermedie effettuate durante il progetto, si è deciso di imporre un codice di riferimento per ciascuna di queste. Le varie configurazioni e la rispettiva nomenclatura sono riportate in Tabella 10.

Indice	Test Rig	Tip	Pilota
A1	Camera	Testa convergente con doppia corona e fori premiscelamento sulla base	Pilota Diffusivo
A2	Camera	Testa convergente con doppia corona e fori premiscelamento sulla base	Pilota Semi-premiscelato
A3	Camera	Testa convergente con doppia corona e fori premiscelamento sulla base	Pilota premiscelato nuova concezione
B1	Camera	Testa convergente con doppia corona senza fori premiscelamento sulla base	Pilota Diffusivo
B2	Camera	Testa convergente con doppia corona senza fori premiscelamento sulla base	Pilota Semi-premiscelato
B3	Camera	Testa convergente con doppia corona senza fori premiscelamento sulla base	Pilota premiscelato nuova concezione
C1	Camera	Testa divergente con doppia corona e fori premiscelamento sulla base	Pilota Diffusivo
C2	Camera	Testa divergente con doppia corona e fori premiscelamento sulla base	Pilota Semi-premiscelato
C3	Camera	Testa divergente con doppia corona e fori premiscelamento sulla base	Pilota premiscelato nuova concezione
D1	Camera	Testa divergente con doppia corona senza fori premiscelamento sulla base	Pilota Diffusivo
D2	Camera	Testa divergente con doppia corona senza fori premiscelamento sulla base	Pilota Semi-premiscelato
D3	Camera	Testa divergente con doppia corona senza fori premiscelamento sulla base	Pilota premiscelato nuova concezione
E1	Derrick	Testa convergente con doppia corona con fori premiscelamento sulla base	Pilota Semi-premiscelato
E2	Derrick	Testa divergente con doppia corona con fori premiscelamento sulla base	Pilota premiscelato nuova concezione
F1	Derrick	Testa convergente con doppia corona senza fori premiscelamento sulla base	Pilota Semi-premiscelato
F2	Derrick	Testa divergente con doppia corona senza fori premiscelamento sulla base	Pilota premiscelato nuova concezione

Tabella 10:Indice delle prove sperimentali effettuate sui banchi

Una volta conclusa la fase di sperimentazione finalizzata a verificare la qualità dei sistemi messi a punto, è stata quindi condotta una valutazione sull'effettivo conseguimento dei parametri di verifica finale del progetto che sono stati inizialmente prefissati per garantire una concreta validità scientifica di quanto realizzato. Come già descritto diffusamente nei precedenti paragrafi, tale verifica ha avuto esito positivo in quanto il prototipo di torcia identificato come "D3" nella Tabella 10, ha permesso di ottenere, con la sperimentazione effettuate, valori in linea con l'obiettivi prefissati .

3.12.1 RAFFRONTO TRA OBIETTIVI RAGGIUNTI E PREVENTIVATI

Al fine di quantificare il livello di bontà degli obiettivi raggiunti e averne una stima adeguata in termini di caratteristiche, prestazioni e specifiche, sono stati fissati dei target quantificabili in maniera preventiva basandosi sullo stato dell'arte dei sistemi in analisi. Il programma oggetto del lavoro svolto è stato finalizzato alla realizzazione di un'innovativa procedura di analisi dei sistemi di combustione dei tail gases, per giungere alla definizione di una nuova metodologia di progettazione e controllo degli stessi sistemi e quindi sviluppare una serie di prototipi in grado di verificare sul campo la bontà delle soluzioni innovative studiate. Tale obiettivo è stato completamente raggiunto durante il presente programma in quanto, come descritto più approfonditamente in seguito, sono stati raggiunti tutti gli obiettivi realizzativi del progetto.

Durante la fase di attività sperimentale del progetto, conformemente a quanto inizialmente previsto, è stata condotta un'estesa fase di valutazione della camera e dei prototipi di torcia; tra i sistemi studiati, in particolare, quello identificato come "D3", con riferimento alla Tabella 11, ha risposto in maniera particolarmente significativa. In tale tabella sono sintetizzati anche i valori presi a riferimento e relativi allo stato dell'arte delle torce per flare gas basate su fiamme diffusive attualmente in commercio.

In Tabella 11 sono sintetizzati i parametri di verifica finale del progetto che erano stati definiti nella fase di definizione degli obiettivi comparati con quelli effettivamente raggiunti al termine delle attività del programma.

Parametro/Verifica	Obiettivo	Valore ottenuto	Esito verifica
Una serie di prototipi di torce innovative in grado di raggiungere i parametri di verifica finali riportati di seguito	Presente	Presente	OK
Un banco prova innovativo per la sperimentazione di torce in ambiente controllato e sicuro	Presente	Presente	OK
Una procedura di progettazione innovativa integrata con appositi sistemi di simulazione numerica, che permetta la progettazione e lo sviluppo di torce avanzate ed ottimizzate in funzione di obiettivi di processo definiti	Presente	Presente	OK
Un background di conoscenze teorico e sperimentale che sviluppi le competenze interne aziendali, permettendo allo staff di ricerca di riconfermarsi all'avanguardia per l'intero settore	Presente	Presente	OK

Una serie di risultati sperimentali sui prototipi studiati, tale da poter permettere una verifica effettiva del conseguimento dei risultati ed una valutazione affidabile dei vantaggi dell'eventuale industrializzazione di una o più delle soluzioni tecniche innovative sviluppate	Presente	Presente	OK
Riduzione di almeno il 10% del consumo di combustibile ad alto potere calorifico impiegato nelle fiamme pilota rispetto ai processi standard in linea con l'attuale stato dell'arte	-10%	-12%	OK
Riduzione di almeno il 10% delle emissioni inquinanti in particolare del particolato solido rispetto ai sistemi disponibili allo stato dell'arte	-10%	-13%	OK
Riduzione di almeno il 10% della portata relativa di gas inerte rispetto ai sistemi disponibili allo stato dell'arte	-10%	-15%	OK
Incremento di almeno il 10% del campo di funzionamento, in termini di rapporto aria combustibile e/o potere calorifico del tail gas rispetto ai sistemi disponibili allo stato dell'arte	+10%	+13%	OK

Tabella 11: raffronto tra obiettivi raggiunti e preventivati

Come risulta evidente dalla Tabella 11, tutte le verifiche previste in sede di definizione degli obiettivi prefissati sui prototipi di torce realizzati durante il progetto, sono stati rispettati e verificati sperimentalmente.

Nello specifico è stato possibile ottenere una riduzione prossima al 12% del consumo di combustibile ad alto potere calorifico impiegato nelle fiamme pilota rispetto ai processi standard in linea con l'attuale stato dell'arte, passando da portate di circa 3,2 m³/h utilizzati per il primo prototipo di testa pilota realizzato (fiamma pienamente diffusiva), a valori attorno ai 2,8 m³/h, continuando a garantire comunque il pieno funzionamento continuo e in sicurezza del dispositivo di combustione. Lo studio e la realizzazione di teste che presentano geometrie molto efficaci per la formazione di fiamme premiscelate, hanno perlopiù permesso di avere anche una conseguente riduzione della portata relativa di gas inerte rispetto ai sistemi disponibili allo stato dell'arte e un incremento di prossimo al 13% del campo di funzionamento, in termini di rapporto aria combustibile e di potere calorifico del tail gas. Non avendo avuto modo di effettuare misure dirette su sistemi industriali funzionanti, sia per la criticità dell'acquisizione stessa, sia per l'ambiente operativo, tale valutazione è

stata effettuata analiticamente in maniera indiretta, facendone una stima basata fondamentalmente sul potere calorifico e sulla portata elaborata di gas tecnico impiegato nelle prove, confrontato con quello medio presentato in tabulati operativi di dal tail gas prodotto da processi industriali realmente operanti. Tali risultati sono sintetizzati in Tabella 12.

Parametro:	Valore relativo alle torce tradizionali (stato dell'arte)	Valore rilevato con il prototipo "D3"	Variazione
Consumo di combustibile ad alto potere calorifico impiegato nelle fiamme pilota	3,2 mc/h	2,8 mc/h	-12%
Emissioni inquinanti in particolare del particolato solido	Indice di Fumosità (Scala Bacharach) 2	Indice di Fumosità (Scala Bacharach) 4	2 punti
Portata relativa di gas inerte	0.23 mc/h	0.19 mc/h	-17%
rapporto aria/combustibile (@ 25°C)	37.5 mc/h	42.8 mc/h	+13%

Tabella 12: verifica finale del progetto

3.13 CRITICITÀ RISCONTRATE E IMPLEMENTAZIONI FUTURE

Il lavoro di sviluppo di sistemi innovativi di torce e piloti industriali, ha portato alla realizzazione di un test rig ad estensione verticale, atto a effettuare misure dirette con sensoristica standard su fiamme libere in aria. Data la complessità della struttura realizzata, si può pensare di estendere le sue possibilità di acquisizione, così da ottenere risultati ancora più appropriati sul fronte della ricerca scientifica in ambito di combustione. Per quanto la fase di sperimentazione sulle torce, come presentato nei paragrafi precedenti, abbia dato esito positivo sia sulla piena funzionalità dei banchi realizzati quanto sui prototipi di nuova concezione sviluppati durante il presente lavoro, è opportuno pertanto fare alcune considerazioni sulle possibili migliorie implementabili sulle camere di test, soprattutto sul lato della sensoristica, così da espanderne l'operatività e il campo di utilizzo.

Le tecniche avanzate di misura su fiamme turbolenti richiedono tipicamente l'impiego di metodologie come quelle PIV- LIF (Particle Imaging Velocimetry - Laser Induced Florescence) basate su sistemi ottici; nello specifico tramite PIV è possibile l'acquisizione di immagini istantanee dei campi di velocità, mentre tramite LIF quelle dei campi di concentrazione OH-. Il radicale OH- è un prodotto intermedio della combustione localizzato all'interno del fronte di fiamma con decadimento rapido (da 1 μ s a 10 μ s). Mediante la rilevazione dell'andamento della concentrazione del radicale OH-, è sperimentalmente possibile caratterizzare il campo di moto del fronte di fiamma. Infatti tramite la fluorescenza, ovvero l'emissione spontanea da parte di una molecola in uno stato energetico eccitato, il radicale OH-, se illuminato con una radiazione nell'ultravioletto di $\lambda=282$ nm generata dalla testa laser, riemette radiazione UV di $\lambda=309$ nm. Quindi, inserendo nella struttura del banco di un sistema laser per l'eccitazione del radicale e di un sistema CCD per l'acquisizione della misura, sarebbe possibile aumentarne le potenzialità permettendo la valutazione di numerosi aspetti quali: l'ancoraggio della fiamma nella zona di ricircolo generata dal bluff-body, i fenomeni d'intrappolamento di zone fredde da parte del fronte di fiamma corrugato e convoluto dal campo fluidodinamico, la formazione di isole di miscela reagente ad opera delle strutture vorticose (instabilità di Kelvin-Helmoltz) o la stima dello spessore del fronte di fiamma:

ispessimento riscontrabile attraverso l'andamento delle concentrazioni degli OH⁻. In questo modo, in sintesi, sarà possibile l'analisi dell'interazione tra il campo fluidodinamico e il fronte di fiamma tramite metodologie avanzate e sistemi standard, così da ottenere una piana caratterizzazione del fenomeno, espandendo le possibilità di impiego della struttura non solo alla valutazione delle teste o dei piloti, ma in maniera più generica a dispositivi atti alla generazione di fiamme libere.

3.14 CONCLUSIONI

Al termine dell'attività sperimentali effettuate in questa ultima fase del lavoro, il presente progetto ha sviluppato e quindi validato mediante un'estesa attività sperimentale, prototipi di torce basate sulla tecnologia innovativa caratterizzati da proprietà di emissione di gas inquinanti e stabilità di funzionamento migliorative rispetto alle torce diffusive disponibili allo stato dell'arte antecedente alle attività del presente programma.

Tutte le verifiche tecniche prestabilite nelle fasi di definizione del progetto hanno avuto esito positivo e pertanto questo si è concluso con successo dimostrando sia le potenzialità del metodo messo a punto che dei banchi di test realizzati, validandone la funzionalità e la sicurezza operativa.

Conclusioni

Titolo:

*Sviluppo Di Una Galleria Innovativa Per L'analisi Sperimentale Avanzata Di
Componenti Di Torce Industriali*

Il presente lavoro ha permesso di progettare e realizzare ex-novo una metodologia di sviluppo e di test per sistemi di combustione industriale – torce di smaltimento tail gas per processi produttivi – generando un banco prova innovativo oltre che a dei prototipi di nuova concezione che superano gli standard dettati dall’attuale stato dell’arte di tali sistemi. Generando prima modelli numerici e impiantistici che hanno portato prima alla progettazione e poi alla realizzazione di un banco prova nonché di una rete di sensori per l’acquisizione e la gestione dei dati, è stato possibile procedere verso la realizzazione e la sperimentazione di teste di combustione di nuova concezione. I tre anni e mezzo di lavoro svolti in collaborazione con la ditta calabra G.A.M. Oil&Gas, hanno così prodotto un significativo apporto scientifico al mondo dei sistemi industriali di test per fiamme libere di grossa dimensione in aria.

Le competenze sviluppate durante il presente lavoro di tesi hanno richiesto numerosi sforzi interdisciplinari indispensabili per un corretto management del progetto: è stato infatti necessario attingere alle conoscenze legate alla fluidodinamica computazionale, così come a quelle elettroniche per la realizzazione della catena di acquisizione, a quelle informatiche per lo sviluppo del software, o a quelle prettamente industriali necessarie per il dimensionamento impiantistico del sistema. La complessità e gli obiettivi fissati per il pieno raggiungimento del progetto sono stati dettati quindi non solo dalle difficoltà tecniche da superare in fase di progettazione e di realizzazione, ma anche dal necessario coordinamento e dall’organizzazione pianificata di tutti quegli aspetti collaterali come l’interfacciamento con i vari fornitori, la sicurezza dell’impianto, e le tempistiche imposte per la chiusura del progetto secondo gli schemi prefissati. Il completo sviluppo del progetto ha richiesto pertanto il necessario interfacciamento con altre figure tecniche coinvolte per il suo pieno raggiungimento, portando spontaneamente ad un percorso altamente formativo di project management.

L’obiettivo del presente progetto è stato quindi quello di realizzare una procedura di sviluppo per sistemi di combustione per tail gases, orientati verso la massima efficienza, funzionalità e sicurezza operativa. Il lavoro ha così permesso il raggiungimento e la definizione di una metodologia innovativa di

progettazione e controllo degli stessi sistemi e quindi la realizzazione di una serie di prototipi in grado di verificare sul campo la bontà delle soluzioni innovative studiate. Tale innovatività sul fronte della ricerca risiede infatti proprio nel superare l'attuale livello di analisi e progettazione delle torce, basato su di un approccio principalmente empirico, per passare ad un sistema innovativo di simulazione fluidodinamica e sperimentazione in ambiente controllato, in grado di pilotare la progettazione stessa verso obiettivi di riduzione di combustibile addizionale e di ottimizzazione ambientale di processo.

Gli obiettivi prefissati in fase iniziale come traguardo per il completo raggiungimento del progetto sono riassumibili sinteticamente nei seguenti punti:

- L'ottenimento di una procedura di progettazione innovativa integrata con appositi sistemi di simulazione numerica, che permetta la progettazione e lo sviluppo di torce avanzate ed ottimizzate in funzione di obiettivi di processo definiti.
- L'ottenimento di un background di conoscenze teorico e sperimentale che sviluppi le competenze interne aziendali, permettendo allo staff di ricerca di riconfermarsi all'avanguardia per l'intero settore.
- La costruzione e la messa in opera banco prova innovativo per la sperimentazione di torce in ambiente controllato e sicuro.
- La realizzazione di una serie di prototipi di torce innovative in grado di raggiungere i parametri di verifica finali riportati di seguito.
- Una serie di risultati sperimentali sui prototipi studiati, tale da poter permettere una verifica effettiva del conseguimento dei risultati ed una valutazione affidabile dei vantaggi dell'eventuale industrializzazione di una o più delle soluzioni tecniche innovative sviluppate.

Dopo un'accurata analisi bibliografica preliminare sulle torce industriali, per il raggiungimento degli obiettivi prefissati, e quindi per la loro progettazione e sperimentazione, è risultato indispensabile avvalersi di sistemi computazionali per la realizzazione di camere di test adeguate agli scopi prefissati. Infatti, per quanto tali tecnologie sono ampiamente diffuse in tutto il mondo industriale, esistono solo pochi produttori al mondo e pertanto la reperibilità di materiale

specifico che ne permetta l'acquisizione di un *know how* adeguato è risultata estremamente difficoltosa.

I test svolti durante la fase preliminare del lavoro hanno dimostrato da un lato la stabilità del sistema di calcolo CFD messo a punto e dall'altro hanno evidenziato la sua capacità di descrivere i fenomeni fisici che sono stati poi studiati successivamente nel banco di studio a dimensioni ridotte, permettendone pertanto un dimensionamento più appropriato rispetto quanto ottenibile con modelli zero dimensionali. L'analisi CFD ha permesso quindi di correggere tramite simulazioni computazionali la geometria della camera fino raggiungere un modello progettuale in grado di soddisfare le specifiche richieste per la sperimentazione dei sistemi di torcia. Tali specifiche progettuali, ricavate dalla fase di studio e di dimensionamento del banco, hanno portato alla luce quindi la fattibilità realizzativa per una camera in grado di operare con stack di diametri fino a 70 mm e velocità di efflusso fino 5 m/s al secondo. Cautelativamente tali valutazioni, sono state effettuate con un combustibile composto in massa dal 50.51 % di metano e 49.49 % di propano per riprodurre le caratteristiche del combustibile della flare di riferimento. La scelta di tali percentuali ha garantito la piena funzionalità del banco con un tipo di gas tecnico che con buona probabilità presenta un potere calorifico sicuramente superiore rispetto a quello ottenibile da un tail gas di processo. Inoltre, avendo previsto tale possibilità d'impiego, la camera è in grado di operare i test sperimentali sulle torce, sia utilizzando il combustibile stoccato in loco (metano e propano), sia con possibili forniture ricavate direttamente dagli impianti realmente funzionanti. Ripercorrendo il processo lavorativo svolto, di seguito sono riportati in forma sintetica i risultati ottenuti prima di passare alla parte realizzativa del progetto. Nello specifico è stato possibile ricavare:

- Un'approfondita ricerca bibliografica nella letteratura specializza per individuare lo stato dell'arte relativo alla progettazione/verifica dei dispositivi in esame
- Un'analisi teorica del funzionamento della tipologia di torcia indicata dalla società GAM come prodotto di riferimento

- L'individuazione dei criteri e dei modelli per la simulazione numerica tridimensionale del processo fluidodinamico/reattivo idonei allo studio dell'apparato selezionato
- L'implementazione di alcuni modelli come user functions all'interno di un codice di calcolo commerciale e test di validazione su fiamme di laboratorio mediante il confronto con dati sperimentali

In particolare, questa prima fase ha consentito la selezione degli opportuni modelli di turbolenza e di combustione, necessari per modellare in maniera appropriata sia il comportamento del bruciatore principale che del pilota.

Le analisi svolte hanno permesso quindi di porre l'attenzione sulle geometrie realizzative del banco, così da evitare problemi d'integrazione fra i flussi di aria comburente e di combustibile immesso nel sistema. Allo stesso modo è stato possibile definire in maniera ottimale il sistema di aspirazione dell'aria comburente ottimizzando la geometria dei condotti nei quali è stato inserito il sistema di aspirazione, permettendo effetti vantaggiosi sulla fenomenologia della combustione studiata, sia in termini di allungamento della fiamma che per l'esclusione del rischio di formazione di ricircoli indesiderati. Note le grandezze per il dimensionamento del banco prova, è stato possibile procedere verso la fase di progettazione impiantistica e strutturale dei sistemi.

Questa seconda fase del lavoro ha previsto quindi tutte le operazioni e le competenze progettuali per lo sviluppo e la realizzazione di un'area di test sperimentale adibita allo studio di torce industriali. In particolare durante questa fase del progetto sono stati quindi progettati e realizzati due banchi di studio:

- 1) Un banco di studio a dimensioni ridotte costituito da una camera di forma sostanzialmente cilindrica nella quale vengono inseriti i prototipi di torce da sperimentare realizzati con criteri di scalatura delle dimensioni rispetto a quelle reali. Tale banco di studio consente di verificare sperimentalmente il campo di temperatura e di velocità della fiamma derivante dal funzionamento sia del bruciatore pilota, sia di quello principale. Oltre a ciò questo banco di studio permette di analizzare la composizione dei gas di scarico derivanti da tale combustione, la formazione di smoke e la risposta delle geometrie del sistema.

- 2) Un banco di studio a dimensioni reali costituito da un derrick sul quale installare i prototipi di torcia da sperimentare. Tale banco permette di verificare la stabilità della fiamma ottenuta in condizioni operative reali, la risposta a transitori di accensione e spegnimento, la resistenza ad agenti atmosferici ed infine il livello di irraggiamento a suolo.

Le operazioni di costruzione e messa a punto del sistema sono durate circa un anno e mezzo e hanno richiesto ingenti risorse sia da un punto di vista economico che di conoscenze interdisciplinari. Tuttavia la realizzazione di tali strutture ha permesso lo sviluppo di un punto di eccellenza dedicato ai sistemi di combustione per uso industriale. Si ricorda infatti che al mondo ne esistono solo pochissimi esemplari e perlopiù non direttamente accessibili per scopi di ricerca. Questo perché essendo di proprietà dei produttori di torce industriali, tali infrastrutture sono utilizzate prettamente per lo sviluppo di sistemi commerciali e quindi coperte da segreto industriale.

L'ultima fase del progetto, ampiamente discussa nel terzo capitolo, ha previsto la progettazione e la realizzazione di alcuni modelli innovativi di torce industriali. La metodologia di sviluppo di tali dispositivi si è avvalsa, come già prima fatto per la definizione del banco, di sistemi di calcolo CFD; la sperimentazione ha quindi permesso di validarne il corretto funzionamento.

Al termine dell'attività sperimentali effettuate, il presente progetto ha permesso lo sviluppo e quindi la validazione mediante un'estesa attività sperimentale, di prototipi di torce basate sulla tecnologia innovativa caratterizzati da proprietà di emissione di gas inquinanti e stabilità di funzionamento migliorative rispetto alle torce diffuse disponibili allo stato dell'arte antecedente alle attività del presente programma. Le simulazioni numeriche svolte per la progettazione dei prototipi sono state impostate sfruttando i risultati conseguiti durante la fase di ricerca preliminare per la messa a punto/validazione degli strumenti di calcolo.

Tuttavia, alla luce dei risultati ottenuti dalla prima accensione del banco prova, è stato necessario riprogettare una nuova geometria del pilota, al fine di completare la fase di sviluppo dei prototipi di nuova concezione. Infatti la prima accensione ha evidenziato una dimensione della fiamma del pilota molto simile a quella del bruciatore principale (perdendo di fatto la funzionalità di pilota

premiscelato). In particolare il post-processing dei dati sperimentali ha evidenziato le seguenti criticità:

- Alto livello di instabilità nel flusso principale
- Forte impatto del flusso pilota sul flusso principale
- Elevata altezza complessiva della fiamma

Una volta concluse tutte le operazioni di progettazione e di messa a punto sia dei sistemi pilota che delle teste di torcia, tutte le verifiche tecniche prestabilite nelle fasi di definizione del progetto hanno avuto esito positivo e pertanto il progetto si è concluso con successo dimostrando sia la validità del metodo utilizzato che dei banchi di test realizzati, dimostrandone così la funzionalità e la sicurezza operativa.

In conclusione, alla luce di quanto sopra affermato ed ampiamente descritto nel presente lavoro di tesi, la realizzazione del progetto ha reso disponibile alla ditta G.A.M Oil&Gas e più in generale alla comunità scientifica i seguenti elementi:

- 1) Un banco prova innovativo per la sperimentazione di torce in ambiente controllato e sicuro.
- 2) Una serie di prototipi di torce innovative in grado di raggiungere i parametri di verifica finali riportati di seguito.
- 3) Una procedura di progettazione innovativa integrata con appositi sistemi di simulazione numerica, che permetta la progettazione e lo sviluppo di torce avanzate ed ottimizzate in funzione di obiettivi di processo definiti.
- 4) Un background di conoscenze teorico e sperimentale che sviluppi le competenze interne aziendali, permettendo allo staff di ricerca di riconfermarsi all'avanguardia per l'intero settore.
- 5) Una serie di risultati sperimentali sui prototipi studiati, tale da poter permettere una verifica effettiva del conseguimento dei risultati ed una valutazione affidabile dei vantaggi dell'eventuale industrializzazione di una o più delle soluzioni tecniche innovative sviluppate.

I prototipi di torcia progettati, realizzati e testati nelle camere di test durante il lavoro svolto si contraddistinguono in termini di innovazione del prodotto per le seguenti caratteristiche:

- 1) Riduzione di almeno il 10% del consumo di combustibile ad alto potere calorifico impiegato nelle fiamme pilota rispetto ai processi standard in linea con l'attuale stato dell'arte
- 2) Riduzione di almeno il 10% delle emissioni inquinanti in particolare del particolato solido rispetto ai sistemi disponibili allo stato dell'arte
- 3) Riduzione di almeno il 10% della portata relativa di gas inerte rispetto ai sistemi disponibili allo stato dell'arte
- 4) Incremento di almeno il 10 % del campo di funzionamento, in termini di rapporto aria combustibile e/o potere calorifico del tail gas rispetto ai sistemi disponibili allo stato dell'arte.

Si può quindi affermare, considerata la scarsissima diffusione a livello mondiale di aree di test dedicate allo studio di torce industriali, che l'impianto realizzato presso G.A.M Oil&Gas durante lo svolgimento del lavoro di tesi, presenti quindi tutte le carte in regola per diventare un punto di eccellenza per la progettazione avanzata di sistemi di combustione ad uso industriale.

Bibliografia

Titolo:

*Sviluppo Di Una Galleria Innovativa Per L'analisi Sperimentale Avanzata Di
Componenti Di Torce Industriali*

-
- [1] **Swarz and White** - "John Zink" Flare Radiation Prediction: A critical Review
- [2] **API RP 521:1997** "Guide for Pressure-Relieving and Depressuring Systems. - 4th Edition."
- [3] **Bourguignon, R. Johnson, and I. W. Kostiuk** "The Use of a Closed-Loop Wind Tunnel for Measuring the Combustion Efficiency of Flames in a Cross Flow "
- [4] **Bjorn Lindgren & Arne V. Johansson**, "Design and Evaluation of a Low-Speed Wind-Tunnel with Expanding Corners", Department of Mechanics- October 2002 Technical Reports from Royal Institute of Technology Department of Mechanics - SE-100 44 Stockholm, Sweden University Of Alberta 'Flare Research Project Final Report November 1996 – September 2004'
- [5] **Johnson, m. R., wilson, d. J. And Kostiuk, L. W.** 'A fuel stripping mechanism for wake-stabilized jet diffusion flames in crossflow', combustion science and technology, 169:1, 155 – 174, 2001
- [6] **Poudenx p. And kostiuk l.w.** 'An investigation of the mean plume structures of a flare in a crosswind', presented at the canadian section of the combustion institute, edmonton, alberta may 16-19, 1999
- [7] **Johnson M.R. And Kostiuk I. W.** 'A parametric model for the efficiency of a flare in crosswind', proceedings of the combustion institute, volume 29, 2002 pp. 1943–1950
- [8] **Norbert Peters**, 'Turbulent Combustion', Cambridge Monographs on Mechanics – University Press 2000
- [9] **Pohl, J. H., Lee J., Payne R. and tichenor, B. A.** 'Combustion efficiency of flares', combustion science and technology, 50:4, 217 – 231, 1986
- [10] **E. Salzano, F.s. Marra1, G.russo** 'La Propagazione Di Fiamma Attraverso Miscele Stratificate Di Metano In Aria'
- [11] **Poudenx P., Howell, LO, Wilson, d. J. and Kostiuk, I. W.** 'Downstream similarity of thermal structure in plumes from jet diffusion flames in a crossflow', combustion science and technology, 176:3, 409 – 435, 2004

- [12] **Johnson M.r., Zastavniuk O., Wilson d.J. and Kostiuk L.W.** 'Efficiency measurements of flares in a cross flow' presented at combustion canada 1999, calgary alberta, may 26-28, 1999
- [13] **Majeski a.j., wilson d. J. And kostiuk l.w.** 'Size and trajectory of a flare in a cross flow' presented at combustion canada '99, calgary, alberta, may 26-28, 1999
- [14] **Bourguignon E., Johnson M. R. And Kostiuk I. W.** 'The use of a closed-loop wind tunnel for measuring the combustion efficiency of flames in a cross flow', combustion and flame 119:319–334, 1999
- [15] **Hasselbrink E. F. Jr and M. G. Mungal** 'Transverse jets and jet flames. Part 1. Scaling laws for strong transverse jets', J. Fluid Mech, vol. 443, pp. 1-25, 2001
- [16] **Castiñeira D. and Edgar T.F.** 'Cfd For Simulation Of Steam-Assisted And Air-Assisted Flare Combustion Systems'-Energy & Fuels, 20, 1044-1056, 2006

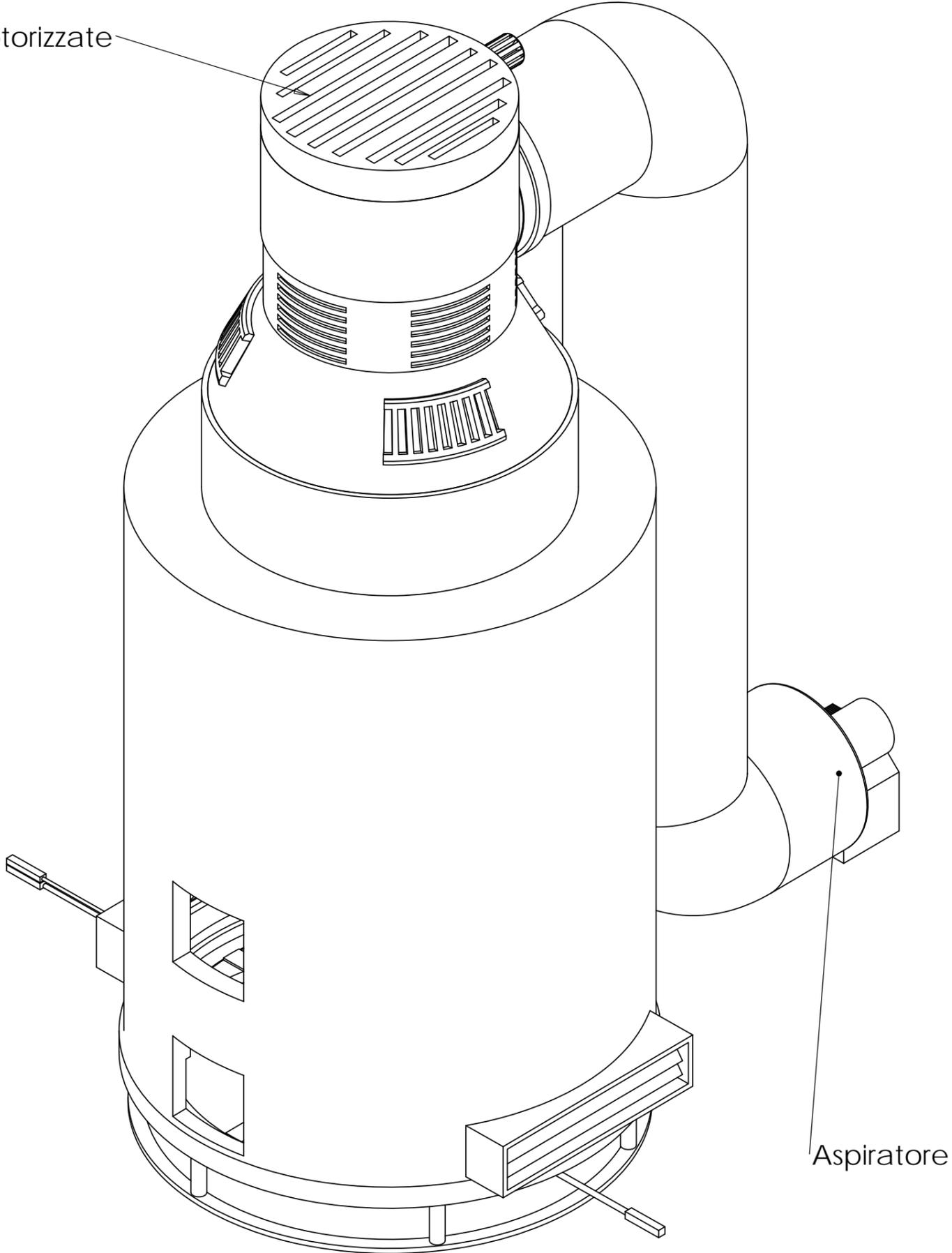
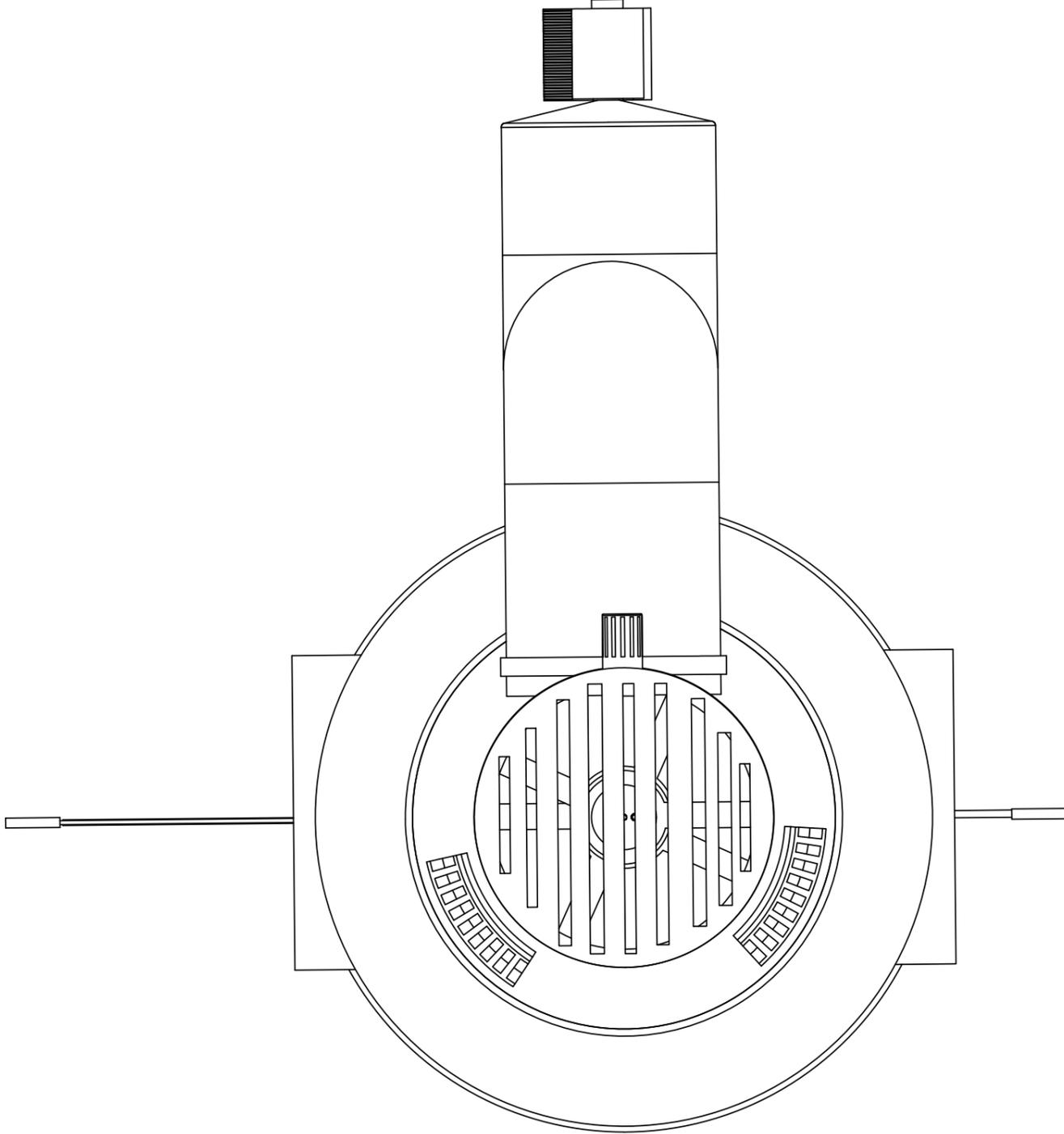
Allegati

Titolo:

*Sviluppo Di Una Galleria Innovativa Per L'analisi Sperimentale Avanzata Di
Componenti Di Torce Industriali*

Università degli Studi di Firenze	Ing.Federico Trippi Ing.Lorenzo Ferrari
	Banco prova per lo studio delle torce

Serrande Motorizzate

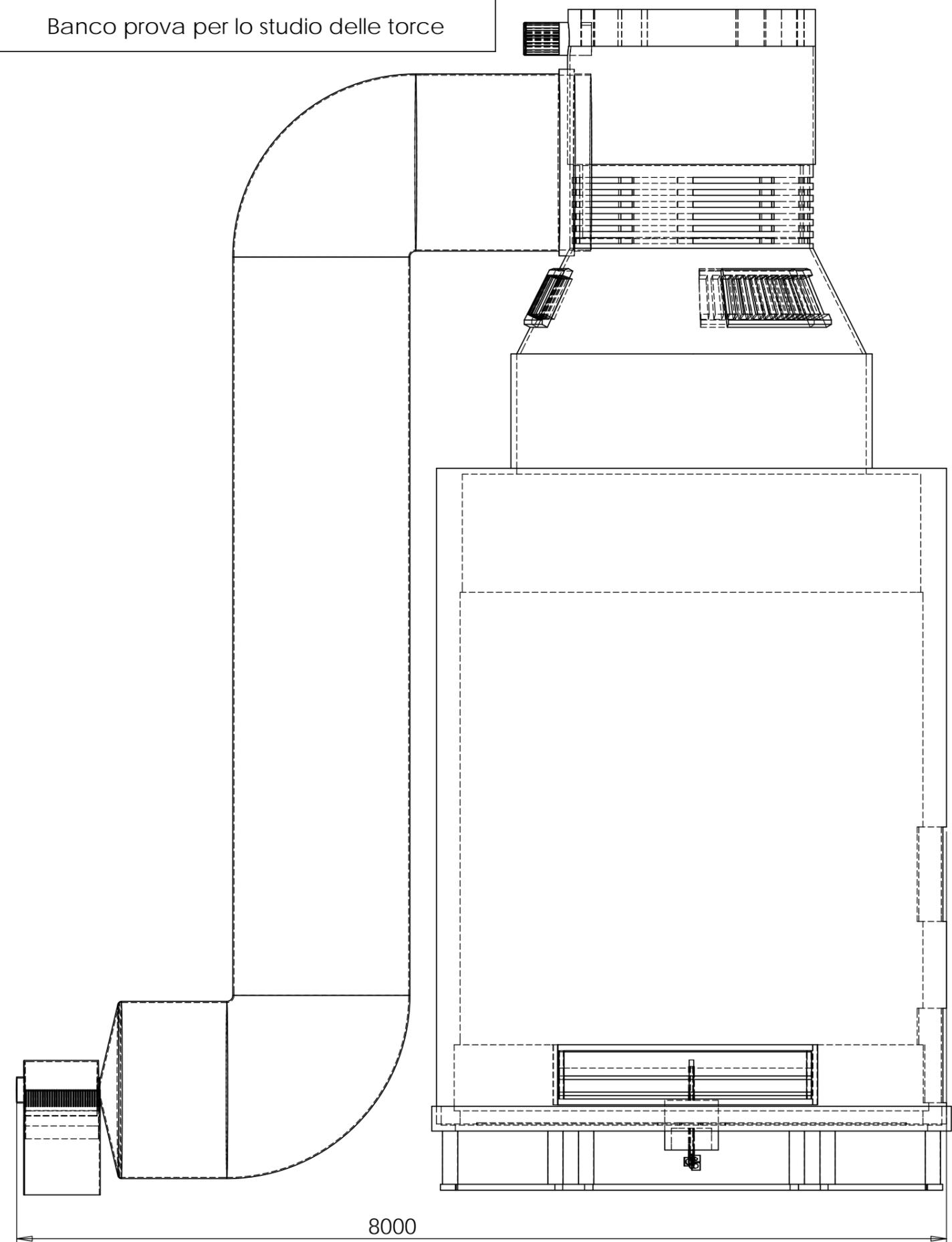
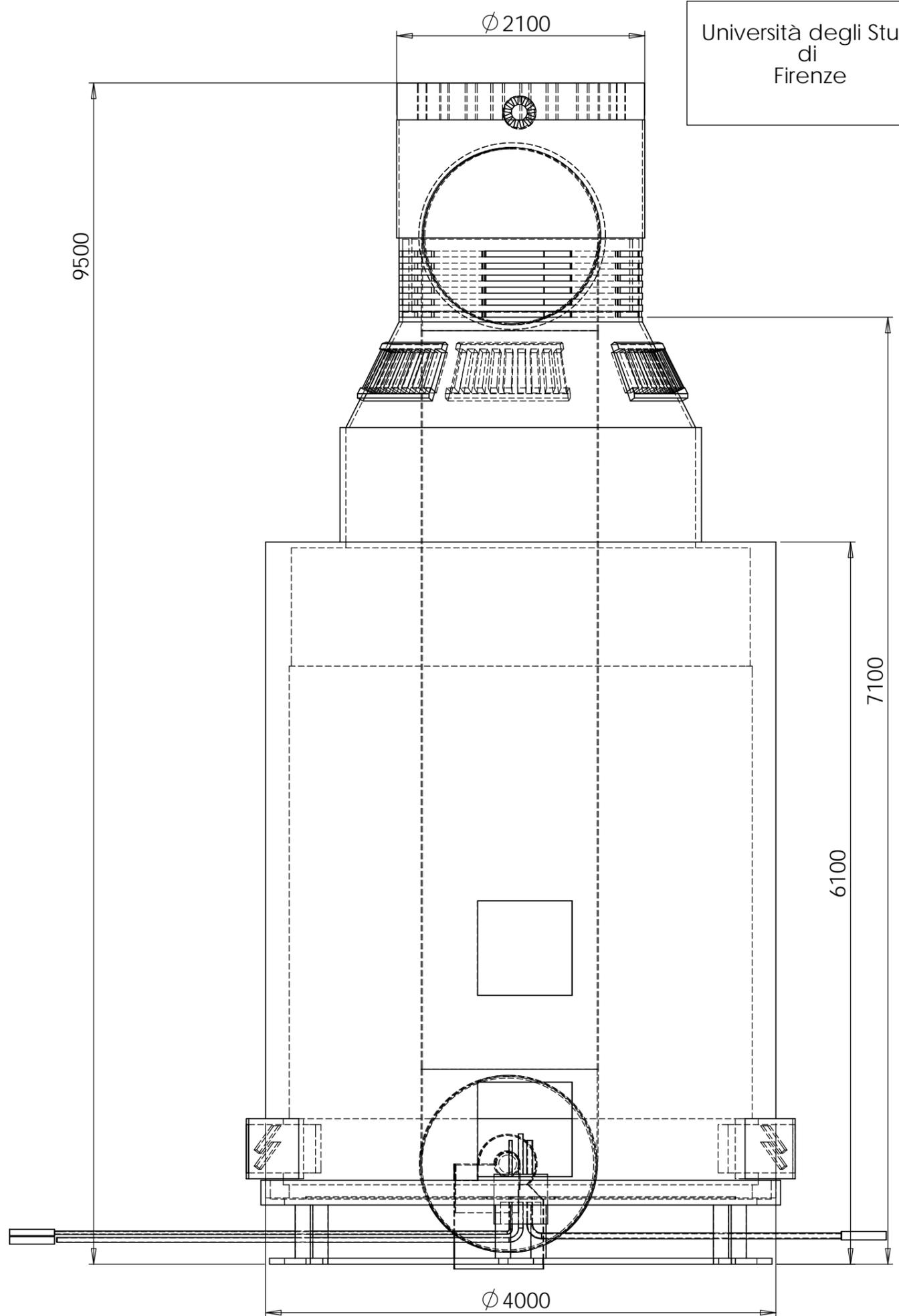


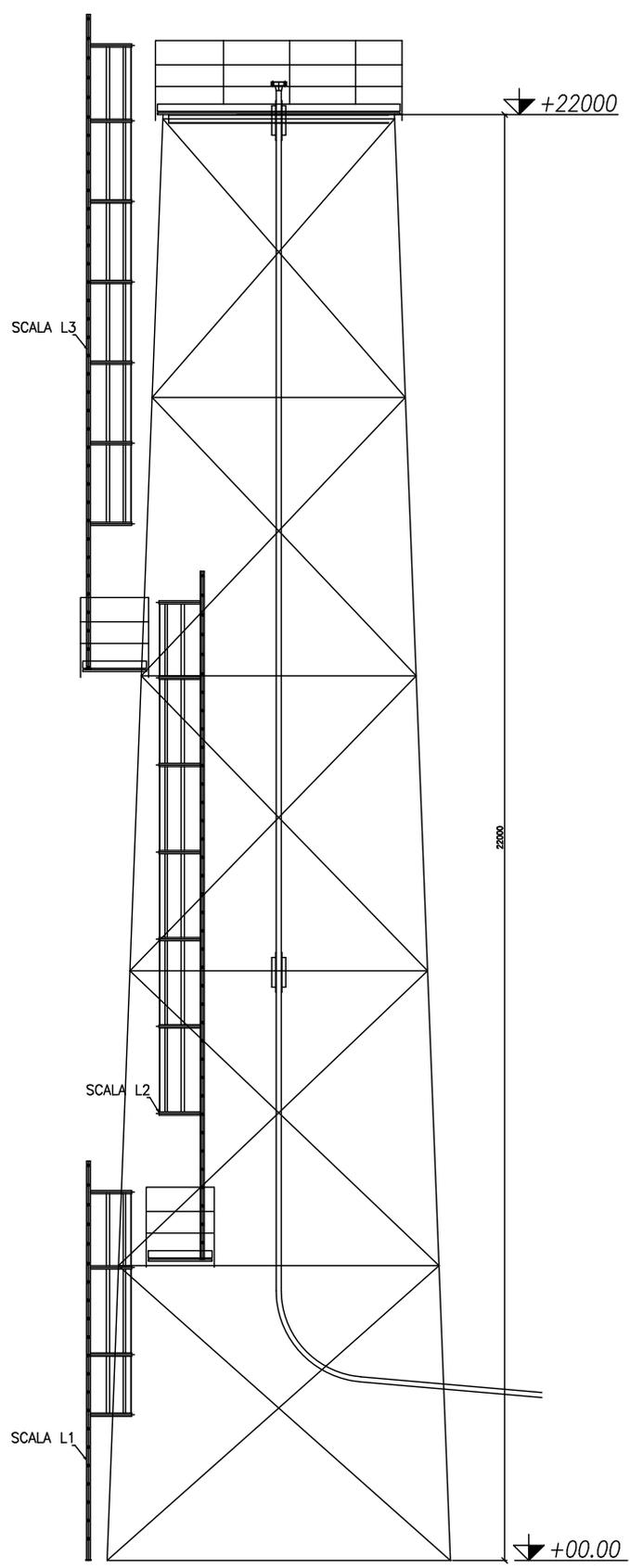
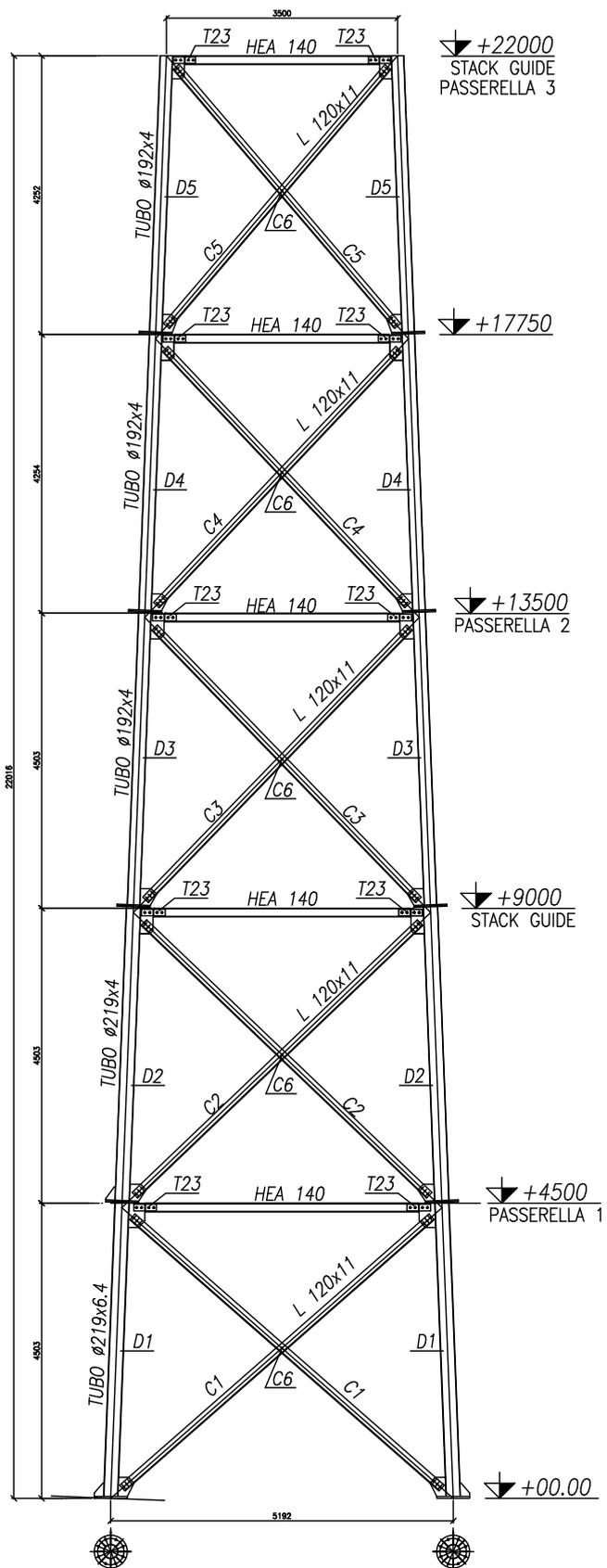
Aspiratore

Università degli Studi
di
Firenze

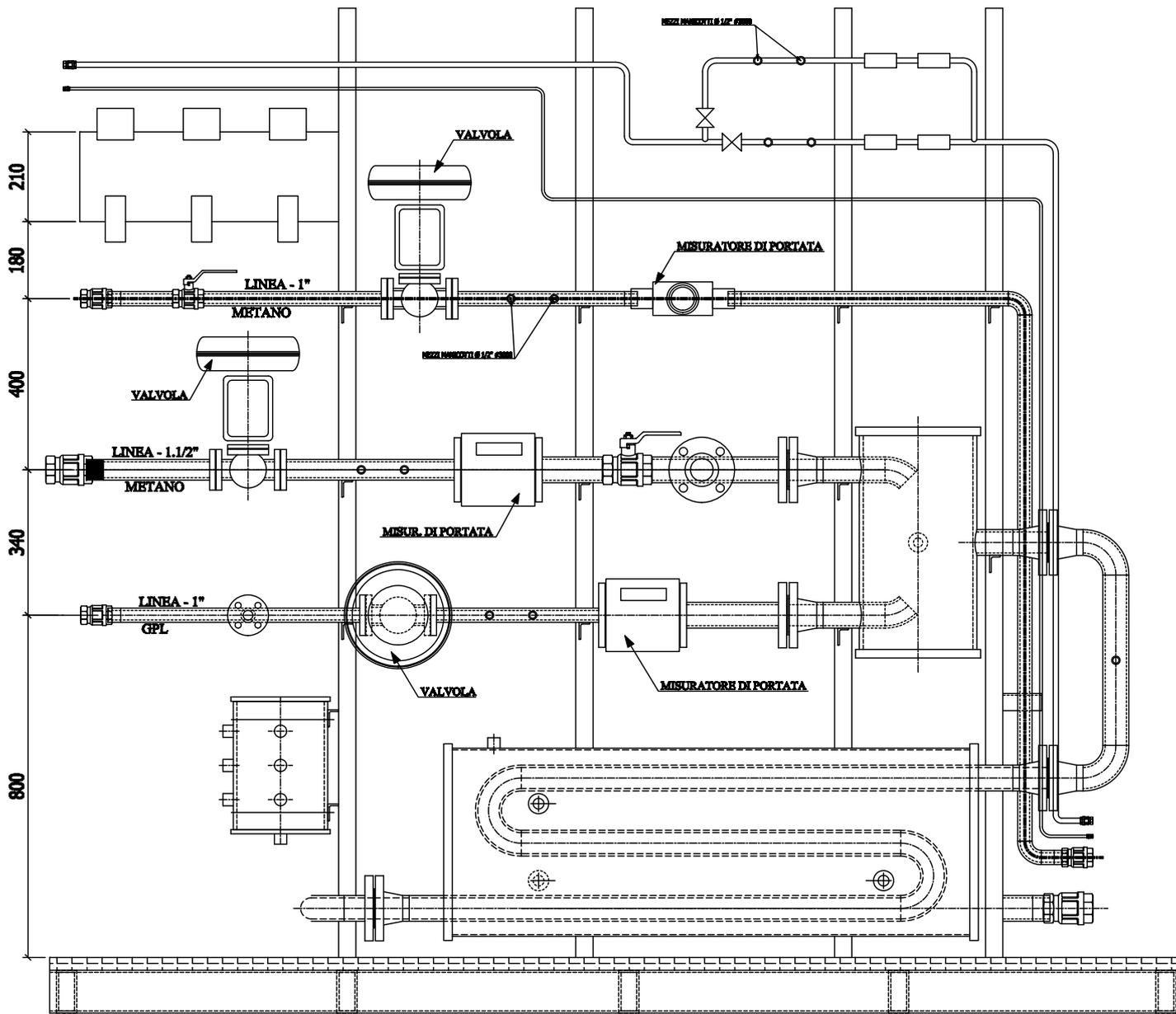
Ing. Federico Trippi Ing. Lorenzo Ferrari

Banco prova per lo studio delle torce



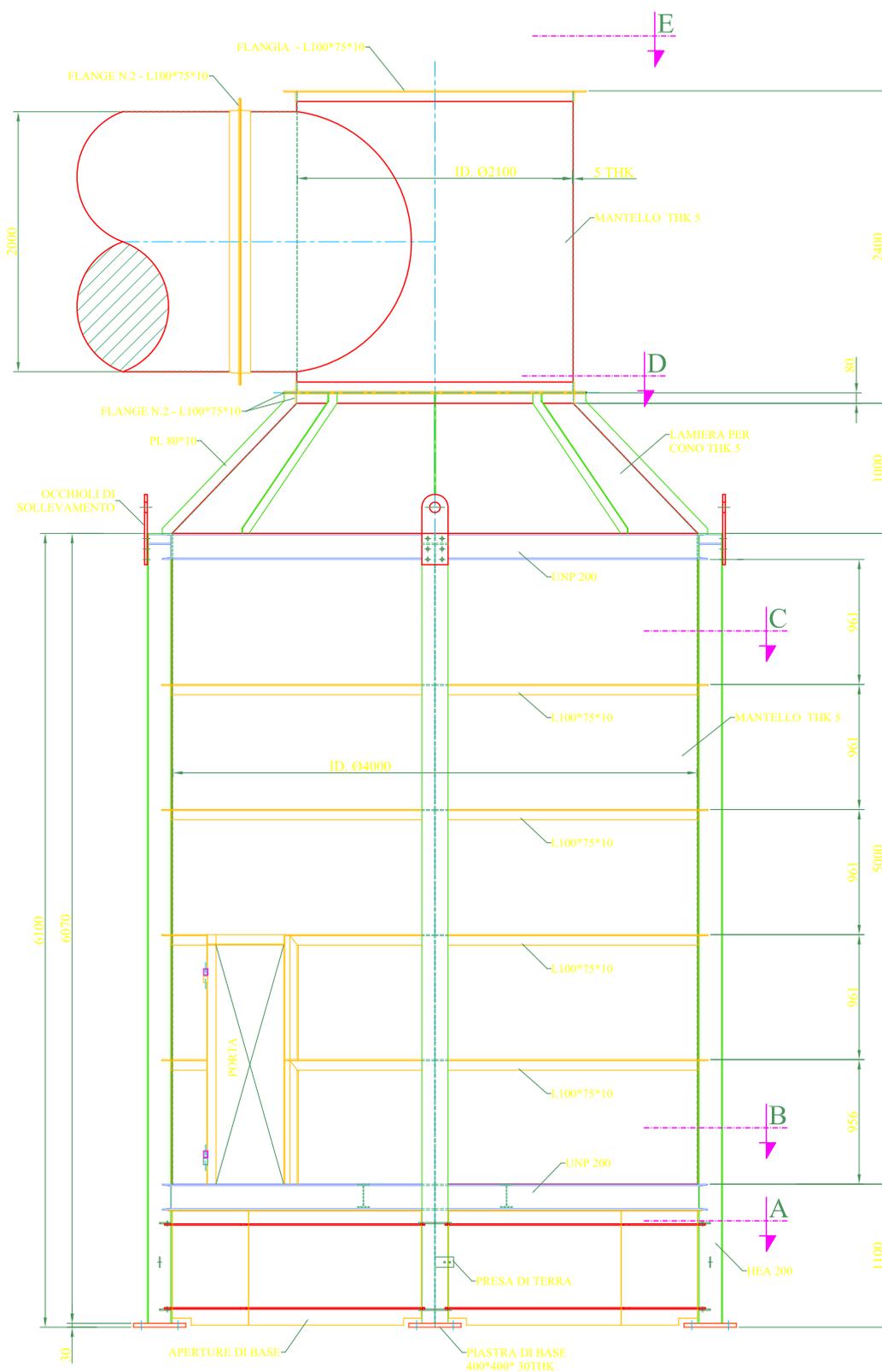


0 ISSUED FOR APPROVAL		POTERBA	MAZZEO	CHIANELLI	-	SPINA/2009
REV.	DESCRIZIONE - DESCRIPTION	PROG.	CHIEF	APP.	Q.C.	DATA
		VESSEL NUMBER: -		CORREL. JOB: UNI-GAM2		
TITOLO: DERRICK		ITEM: -		DEL. N°: 001-09/1		
STRUTTURA DI SUPPORTO		SCALA/SCALE	REV.	REV.		
SOSTITUITO DA - REPLACED BY		N.A.	1/2	0		

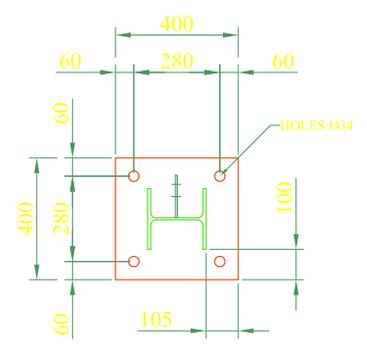


VISTA IN ELEVAZIONE

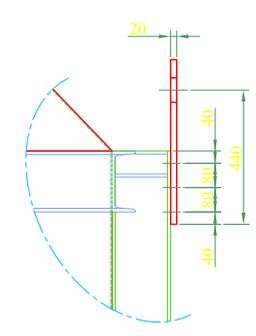
1	MODIFICATO	MAZZEO	MAZZEO	CHIARELLI	-	18/03/10
1	MODIFICATO	MAZZEO	MAZZEO	CHIARELLI	-	13/11/09
0	EMESSO PER APPROVAZIONE	MAZZEO	MAZZEO	CHIARELLI	-	20/04/09
REV.	DESCRIZIONE - DESCRIPTION	ESIG. PREP'D	CONTR. CHECK	APPR. APPR'D	Q.C.	DATE
 ROMBIOLO (VV)		VESSEL NUMBER: --		COMM. JOB BANCO PROVA		
TITOLO TITLE		ITEM: --		DIS. N° DWG N. B/005		
SOSTITUITO DA - REPLACED BY				SCALA/SCALE	SH.	REV.
				N.A.	1/1	0



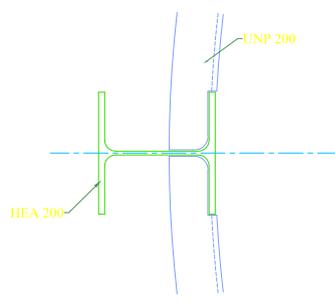
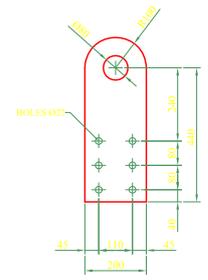
VISTA IN ELEVAZIONE



PIASTRA DI BASE

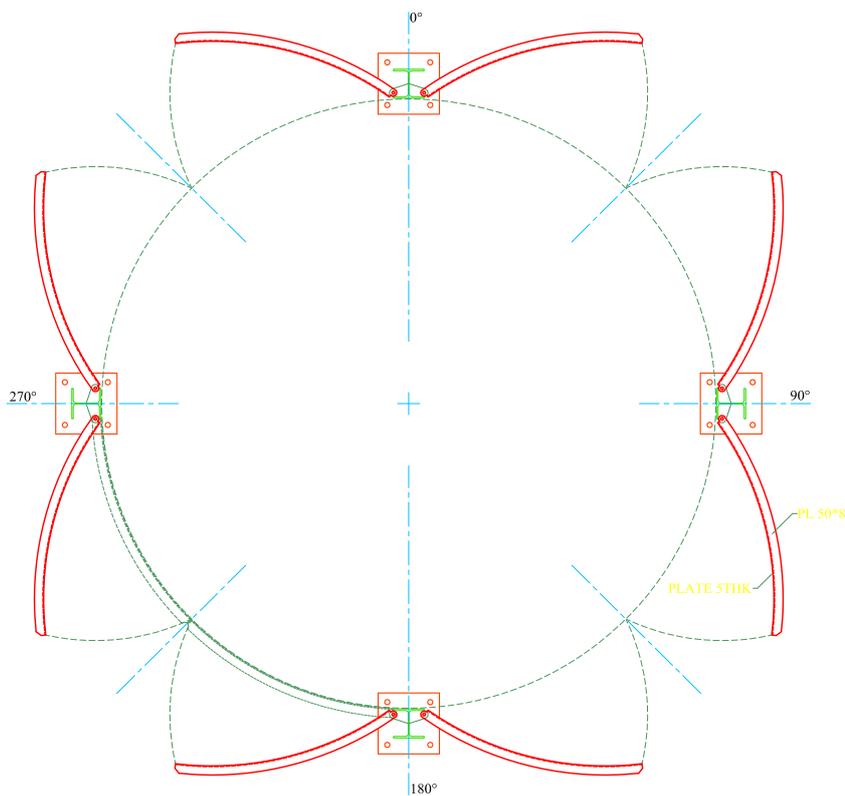


OCCHIOLI DI SOLLEVAMENTO



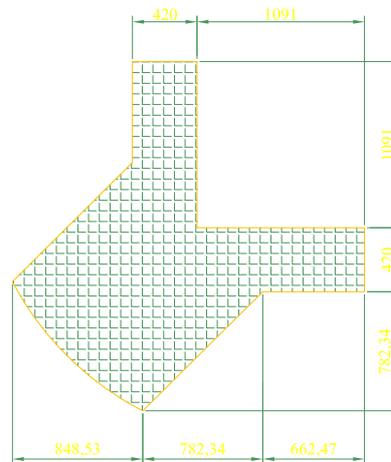
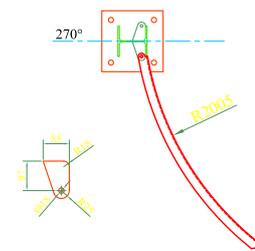
DETTAGLIO "1"

0	ISSUED FOR APPROVAL	MAZZEO	MAZZEO	CHIARELLI	ZAPPINO	22/05/08
REV	DESCRIZIONE - DESCRIPTION	ESEG. PREP.D	CONTR. CHIED.	APPR. APPROD.	O.C.	DATE
		VESSEL NUMBER: -		COMM. JOB -		
ROMBILO (VV)		ITEM: -		DIS. N° STD-AS-779/3		
TITOLO TITLE		BANCO PROVA TORCIA		SCALA/SCALE	SIL	REV.
SOSTITUITO DA - REPLACED BY		N.A.		1/2	0	

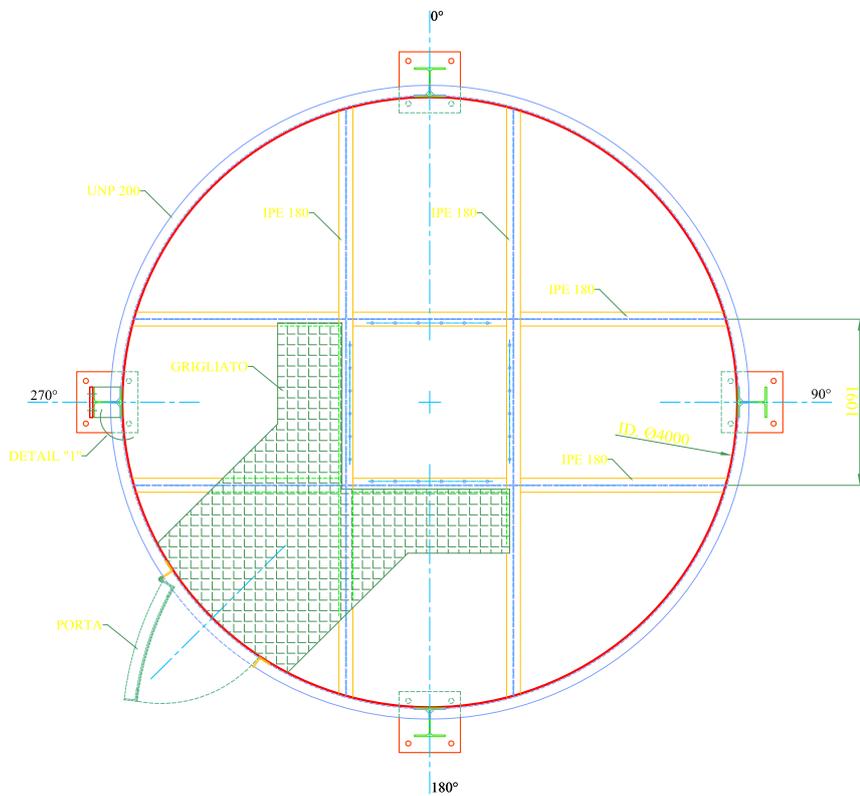


SEZIONE "A"

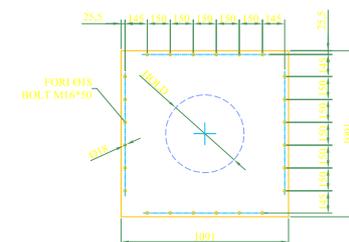
APERTURE DI BASE
TYP



ACCESSO AL BRUCIATORE

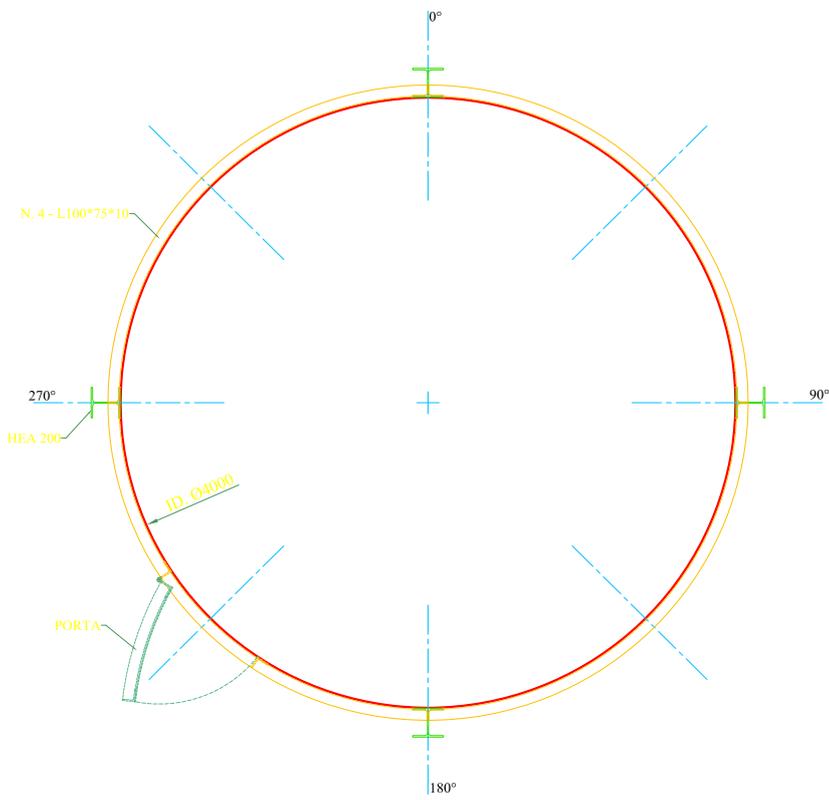


SEZIONE "B"

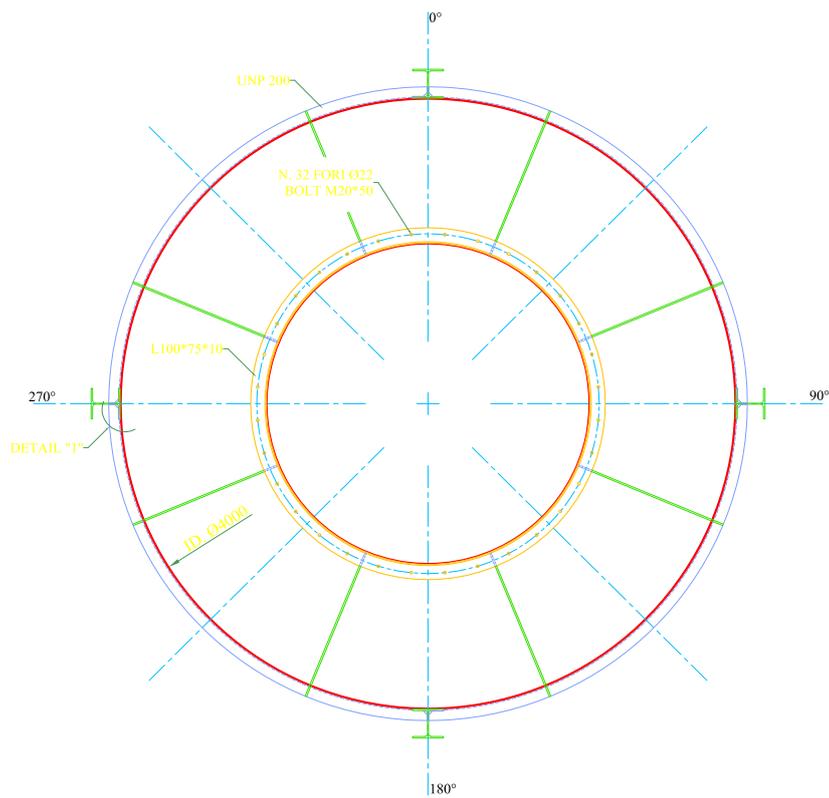


SUPPORTO BRUCIATORE

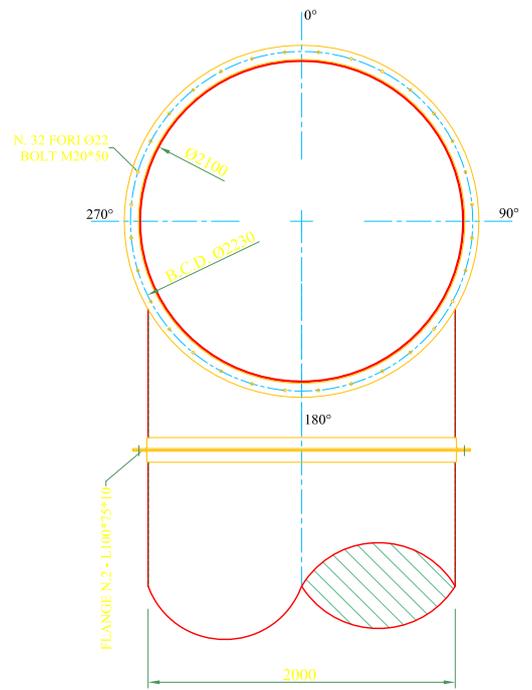
0	ISSUED FOR APPROVAL	MAZZEO	MAZZEO	CHIARELLI	ZAPPINO	22/05/08
REV	DESCRIZIONE - DESCRIPTION	ESEG. PREP.T.	CONTR. CHICTD.	APPR. APPROV.	O.C.	DATE
		VESSEL NUMBER: -		COMM. JOB -		
ROMBILO (VV)		ITEM: -		DIS. N° STD-AS-779/3		
TITOLO TITLE		BANCO PROVA TORCIA		SCALA/SCALE	SIL. REV.	
SOSTITUITO DA - REPLACED BY		N.A.		2/3	0	



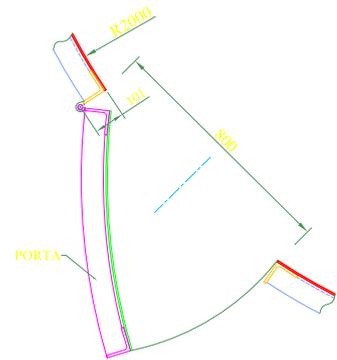
SEZIONE "C"



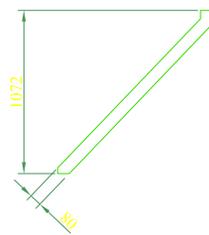
SEZIONE "D"



SEZIONE "E"

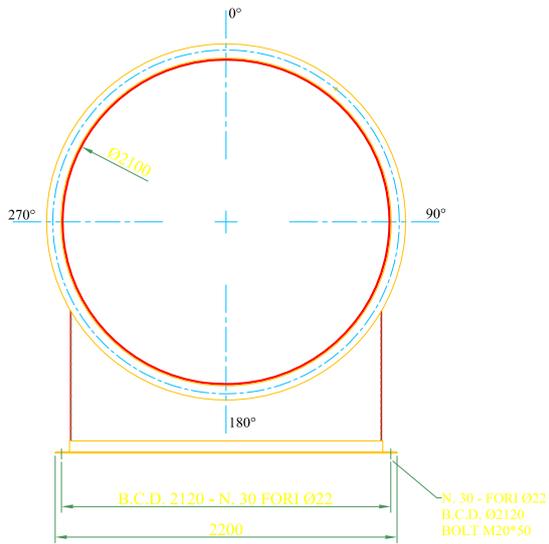


DETTAGLIO PORTA

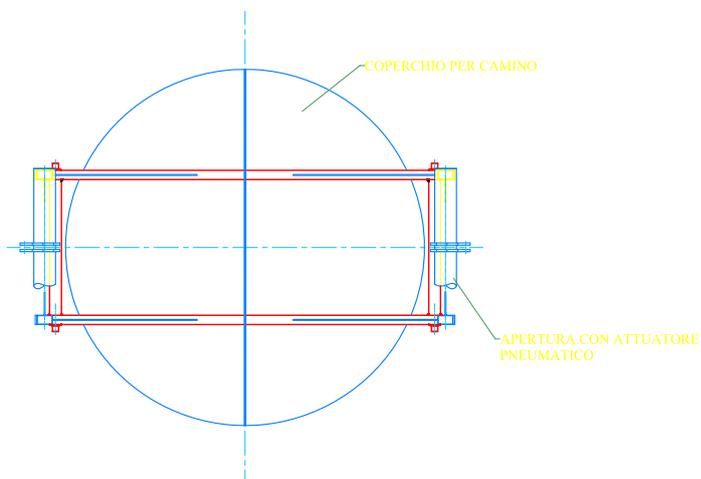
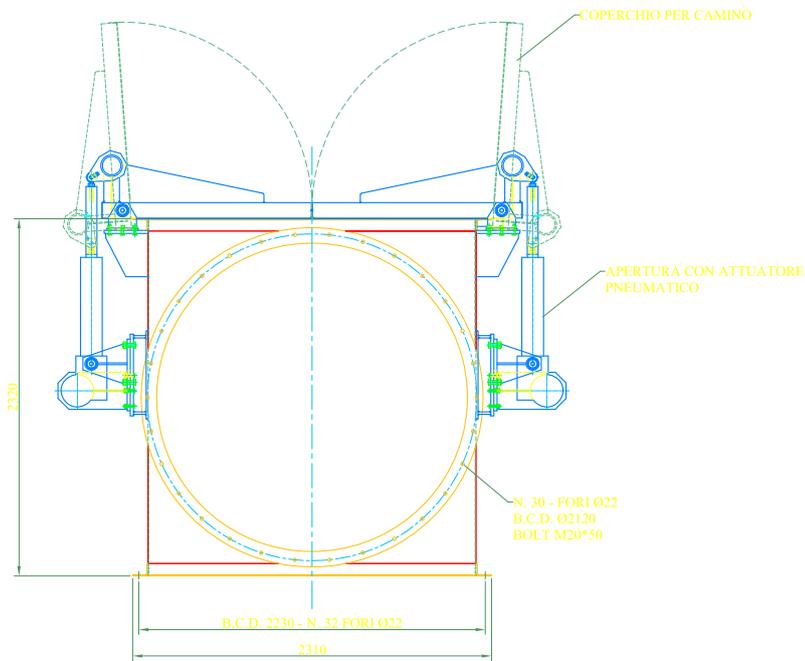


**PIATTO DI RINFORZO
(PARTE DEL CONO)**

REV	DESCRIZIONE - DESCRIPTION	MAZZEO ESIG. PREP.T.	MAZZEO CONTR. CHIED.	CHIARELLI APPR. O.C.	ZAPPINO	22/05/08
0	ISSUED FOR APPROVAL					
		VESSEL NUMBER: -		COMM. JOB -		
ROMBILOLO (VV)		ITEM: -		DIS. N° STD-AS-779/3		
TITOLO TITLE		BANCO PROVA TORCIA		SCALA/SCALE	SIL	REV.
SOSTITUITO DA - REPLACED BY		N.A.		3/4	0	



SEZIONE "E"



0	ISSUED FOR APPROVAL	MAZZEO	MAZZEO	CHIARELLI	ZAPPINO	22/05/88
REV.	DESCRIZIONE - DESCRIPTION	ESSE. PREP.D.	CONTR. CH.D.	APPR. APPR.D.	Q.C.	DATE
 ROMBIOLO (VV)		VESSEL NUMBER: -- ITEM: --		COMM. JOB: -- DIS. N° STD-AS-779/3 DWG N.		
TITOLO TITLE: BANCO PROVA TORCIA				SCALA/SCALE: N.A.	SH: 4/4	REV: 0
SOSTITUITO DA - REPLACED BY						



Università degli Studi di Firenze

P&ID Preliminare per la realizzazione del banco prova per lo studio di torce industriali

Ing. Lorenzo Ferrari

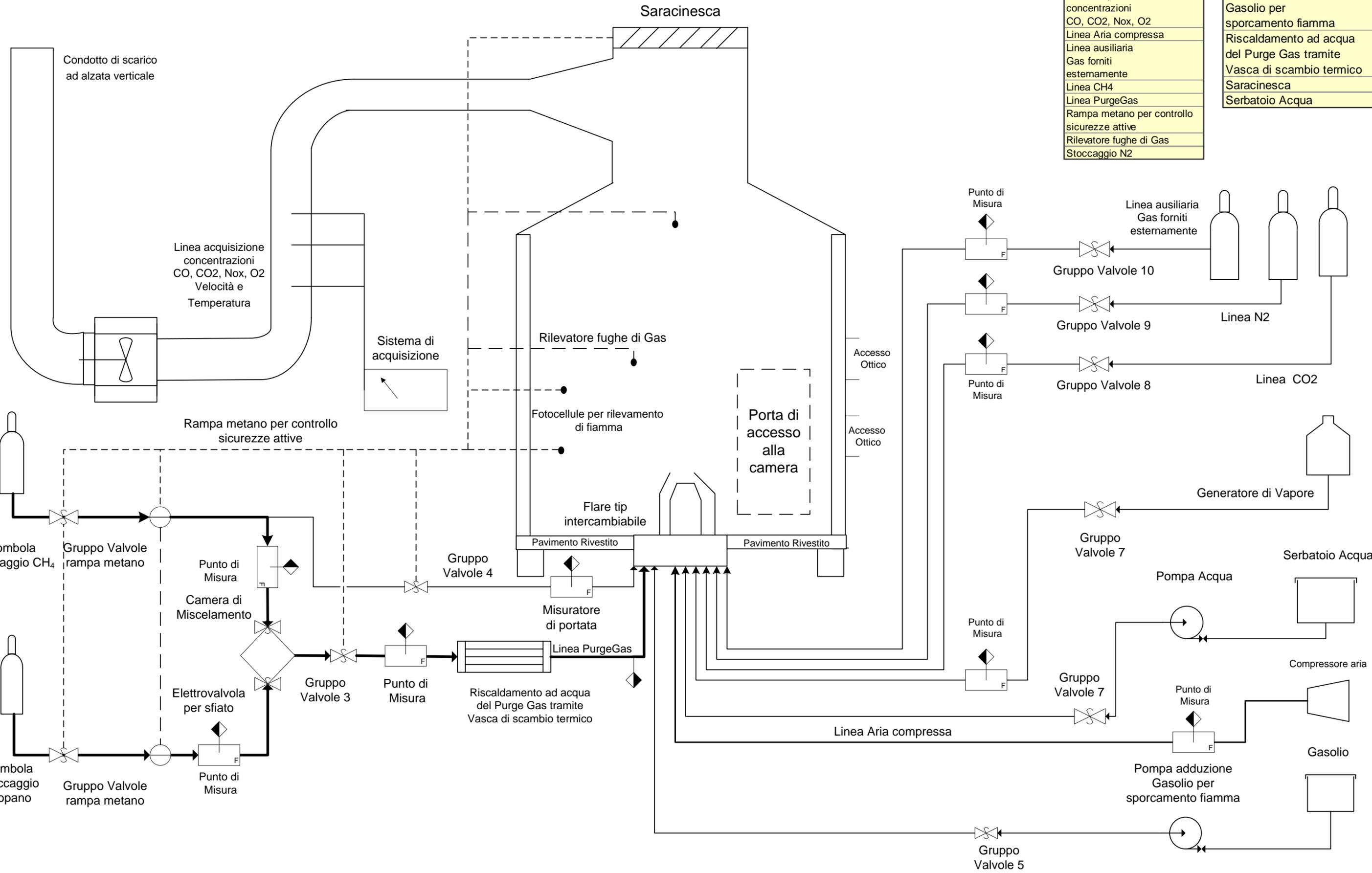
Ing. Federico Trippi

Elenco

Testo visualizzato
Fotocellule per rilevamento di fiamma
Generatore di Vapore
Linea acquisizione temperatura, velocità, portata
Linea acquisizione concentrazioni CO, CO2, Nox, O2
Linea Aria compressa
Linea ausiliaria Gas forniti esternamente
Linea CH4
Linea PurgeGas
Rampa metano per controllo sicurezze attive
Rilevatore fughe di Gas
Stoccaggio N2

Elenco apparecchiature

Testo visualizzato
Cappa Aspirante
Compressore aria
Gasolio
Pompa Acqua
Pompa adduzione Gasolio per sporcamento fiamma
Riscaldamento ad acqua del Purge Gas tramite Vasca di scambio termico
Saracinesca
Serbatoio Acqua



Condotto di scarico ad alzata verticale

Linea acquisizione concentrazioni CO, CO2, Nox, O2 Velocità e Temperatura

Sistema di acquisizione

Rilevatore fughe di Gas

Fotocellule per rilevamento di fiamma

Porta di accesso alla camera

Rampa metano per controllo sicurezze attive

Flare tip intercambiabile

Pavimento Rivestito

Pavimento Rivestito

Bombola Stoccaggio CH4

Gruppo Valvole rampa metano

Punto di Misura

Camera di Miscelamento

Gruppo Valvole 4

Misuratore di portata

Linea PurgeGas

Riscaldamento ad acqua del Purge Gas tramite Vasca di scambio termico

Bombola Stoccaggio propano

Gruppo Valvole rampa metano

Punto di Misura

Elettrovalvola per sfiato

Gruppo Valvole 3

Punto di Misura

Punto di Misura

Linea ausiliaria Gas forniti esternamente

Gruppo Valvole 10

Gruppo Valvole 9

Linea N2

Gruppo Valvole 8

Linea CO2

Punto di Misura

Accesso Ottico

Accesso Ottico

Generatore di Vapore

Gruppo Valvole 7

Serbatoio Acqua

Pompa Acqua

Punto di Misura

Compressore aria

Gruppo Valvole 7

Punto di Misura

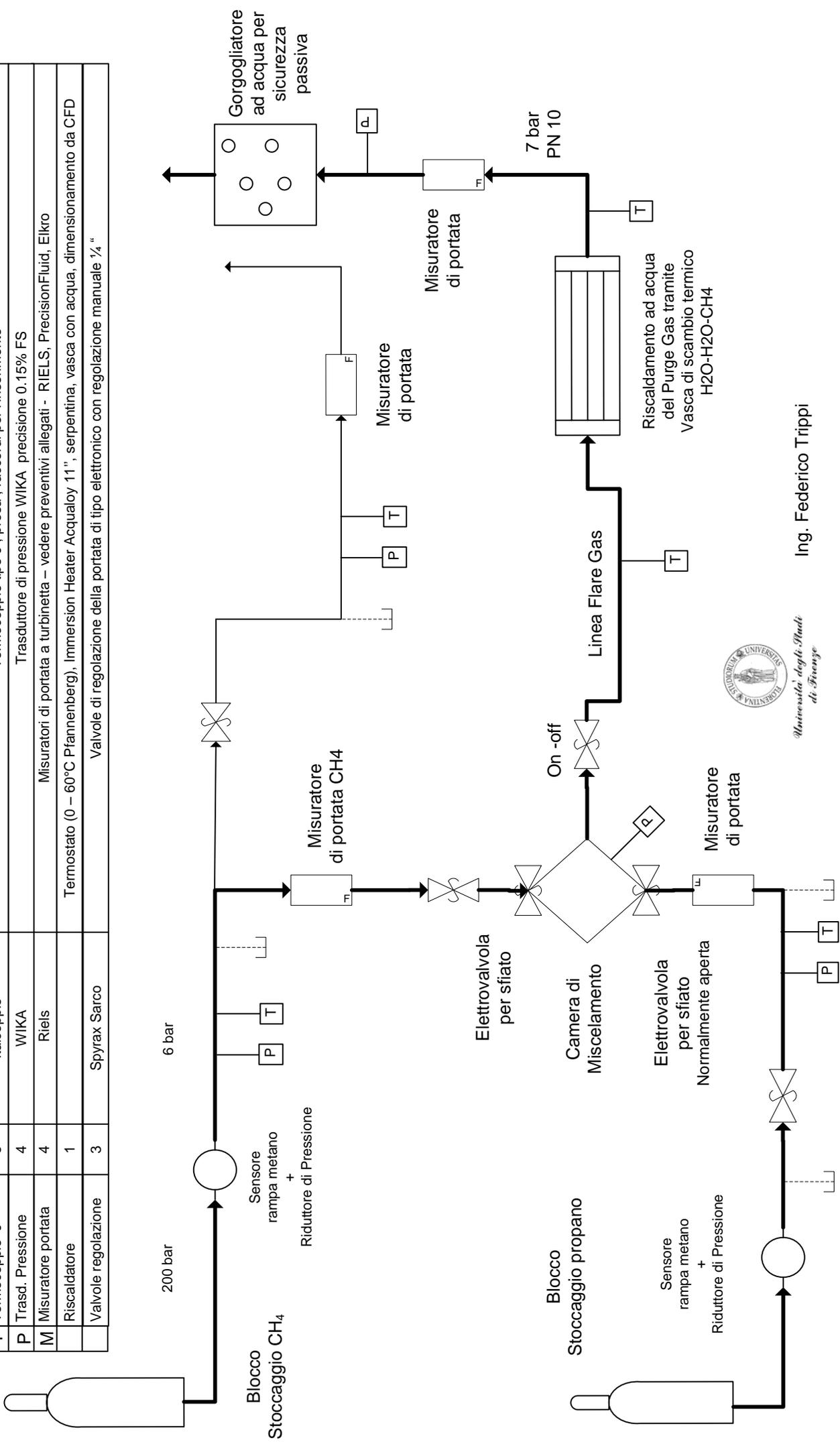
Gasolio

Pompa adduzione Gasolio per sporcamento fiamma

Gruppo Valvole 5

Linee metano e Propano

ARTICOLO	Q.TÀ	Marca – Prezzo Indicativo	Descrizione / Note
Bombole stoccaggio	2		(CH4; CH4+C3H8), Riduttori di pressione, sicurezze, Elettrovalvole, Camera di miscelamento
T Termocoppie J	5	Italcoppie	Termocoppie tipo J ; presa ; accordi per l'inserimento
P Trasd. Pressione	4	WIKA	Trasduttore di pressione WIKA precisione 0.15% FS
M Misuratore portata	4	Riels	Misuratori di portata a turbinetta – vedere preventivi allegati - RIELS, PrecisionFluid, Elkro
Riscaldatore	1		Termostato (0 – 60°C Pfannenbergl, Immersion Heater Acqualoy 11", serpentina, vasca con acqua, dimensionamento da CFD
Valvole regolazione	3	Spyrax Sarco	Valvole di regolazione della portata di tipo elettronico con regolazione manuale 1/4"

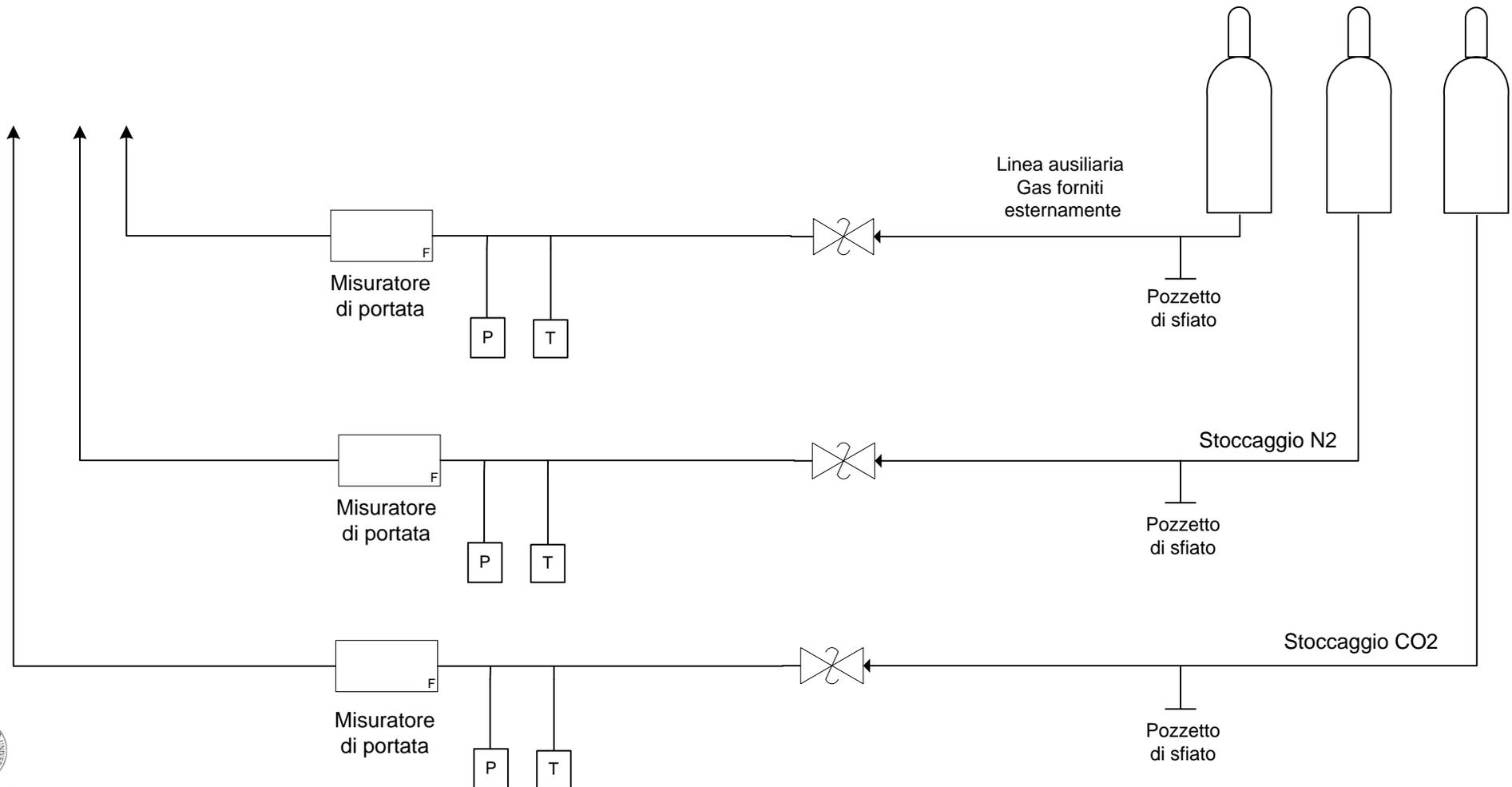


Università degli Studi di Firenze

Ing. Federico Trippi

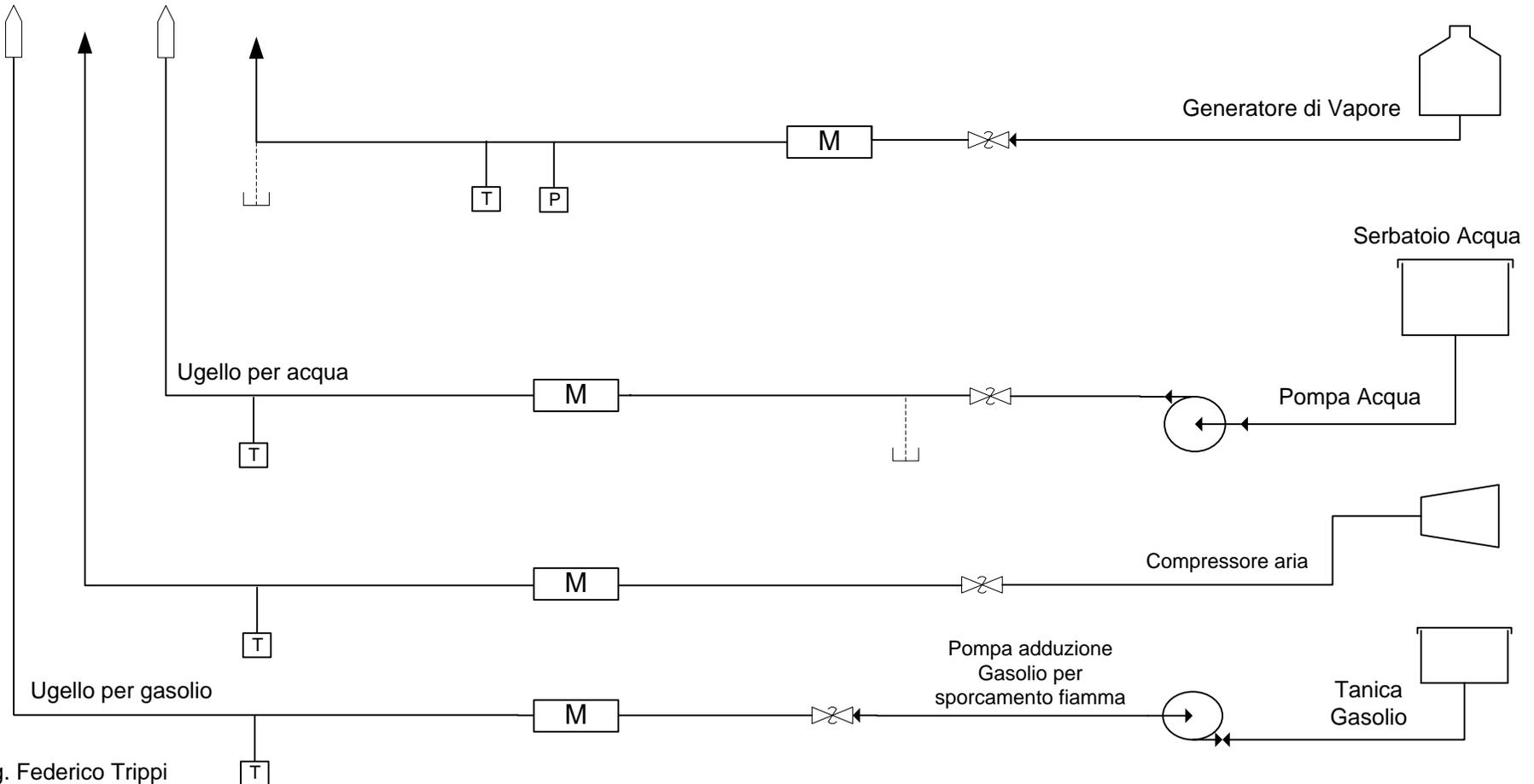
Linee Ausiliarie

ARTICOLO	Q.TÀ	Marca	diametro	Descrizione / Note
Bombole stoccaggio	3			(CO2, N2, Altri), Riduttori di pressione, sicurezze, Sistema frangifiamma
T Termocoppie J	3	Italcoppie		Termocoppie tipo J ; presa ; raccordi per l'inserimento
P Trasd. Pressione	3	WIKA		Trasduttore di pressione WIKA precisione 0.15% FS
M Misuratore portata	3	Riels	2"	Misuratori di portata a turbinetta – vedere preventivi allegati - RIELS, PrecisionFluid, Elkro
Gruppo valvole	3	Spyrax Sarco	2"	Gruppo valvole elettroniche o a vite micrometrica con regolazione manuale + pozzetto di sfiato



Linee ausiliarie promotori di turbolenza

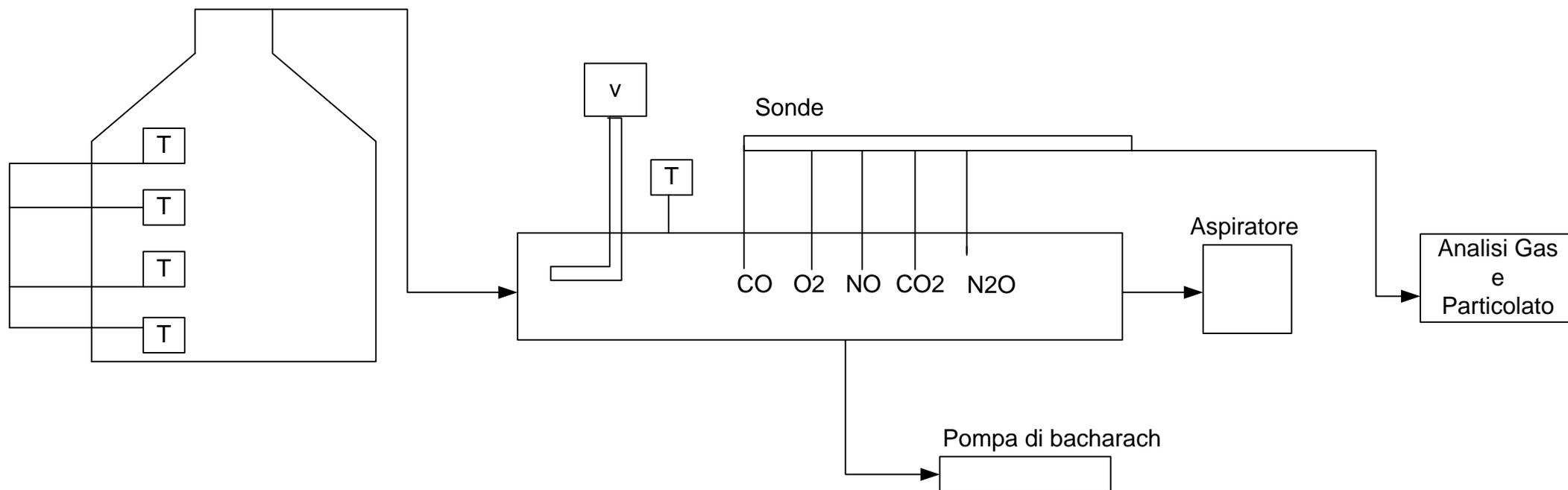
ARTICOLO	Q.TÀ	Marca - Prezzo	Descrizione / Note
Generatore vapore	1	Mibe	Modello "HILL INJECTION 8 bar – 62 g/min" con copertura in INOX; Termocoppia tipo J; Scaricatore di condensa; Misuratore di portata da valutare
iniezione gasolio	1	Tecnocontrol	Po241 elettropompa x gasolio a pistone oscillante 30 lt/h ; Termocoppia tipo J; Misuratore di portata da valutare
	1	Tecnocori	V20.4 contaltri gasolio – tipicamente per uso condominiale – In alternativa la lettura può essere effettuata con serbatoio graduato (buretta)
Iniezione aria	1	CKD	Aria di rete, Sensore di portata per gas RAPIFLOW da valutare (portata max 500 l/m),
Iniezione acqua	1	Ecopool	Pompa per ricircolo acqua 650W prevalenza 4,5m p (max 100 l/min); Termocoppia tipo J; Misuratore di portata da valutare
M Misuratore portata	1	RR	Misuratore di portata di acqua RR campo di misura 0,2-10 l/min
Ugello gasolio	1	Tecnocori	Ugelli Steinen a 45°
Ugello acqua	1	Tecnocori	Ugelli Steinen a 45°
T Termocoppie J	4	Italcoppie	Termocoppie tipo J ; presa ; raccordi per l'inserimento
P Trasd. Pressione	1	WIKA	Trasduttore di pressione WIKA precisione 0.15% FS

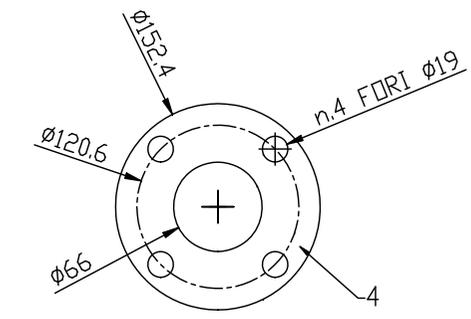
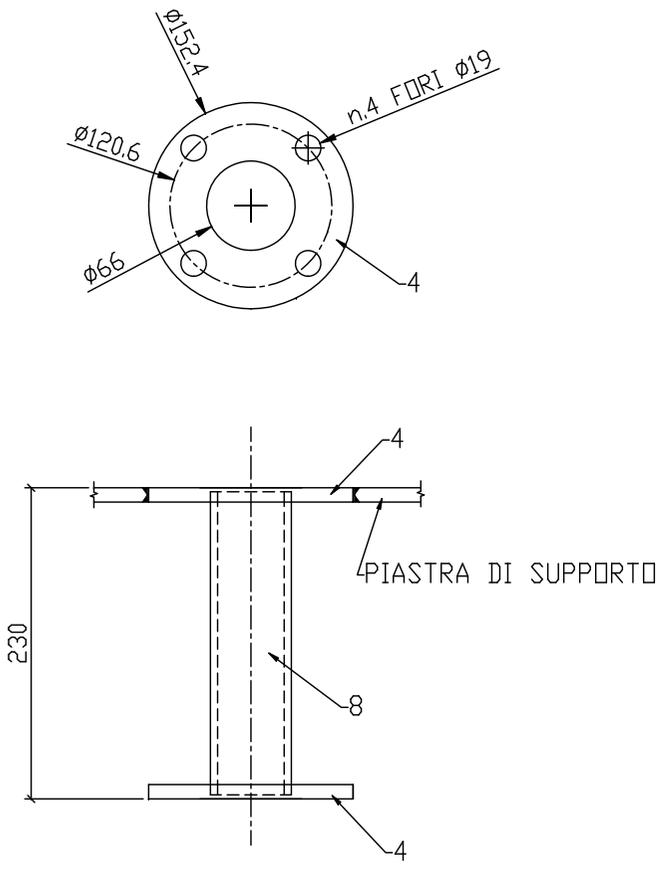


Linee acquisizione dati

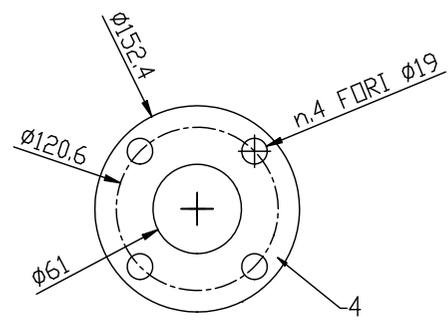
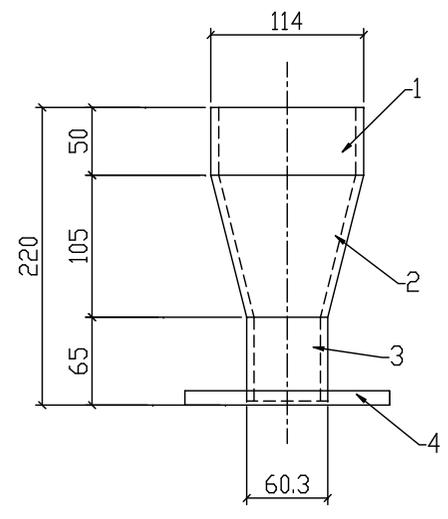
ARTICOLO	Q.TÀ	Marca	DESCRIZIONE/ PREZZO Indicativo
Analizzatore gas	1	Tempest	Misuratore CO, O2, NO, NO2, sensore HCL, sonda alta temperatura, Software -
	1	Eurotron	GreenLine 8000 celle elettrochimiche (O ₂ , CO, NO/NO _x , HxCx), sonda prelievo alta temperatura, Pitot, Bacharach, Software
	1	Testo	Misuratore CO, SO2, NO, NO2, HC, software, sonda alta temperatura

Pompa Bacharach	1	Tecnocontrol	Pompa di Bacharach + Carta assorbente + Scala confronto
Misuratore velocità	1	Precision Fluid	Valutare se utilizzare il sensore della Precision Fluid o realizzare secondo norme ISO un tubo di Pitot in officina
Termocoppie K	5		Termocoppie tipo K ; presa ; raccordi per l'inserimento

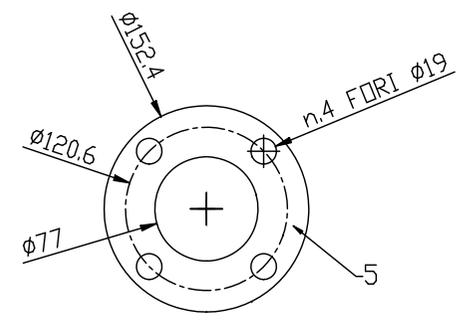
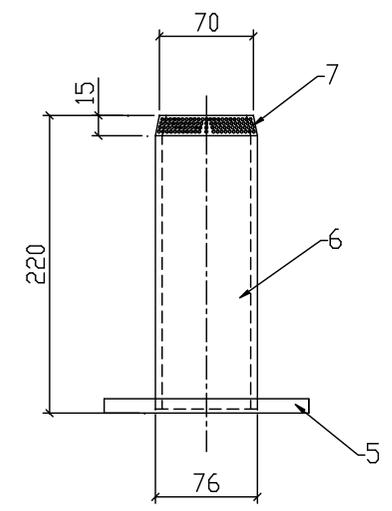




SUPPORTO BRUCIATORE



BRUCIATORE 1

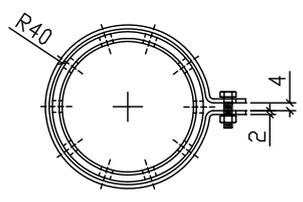
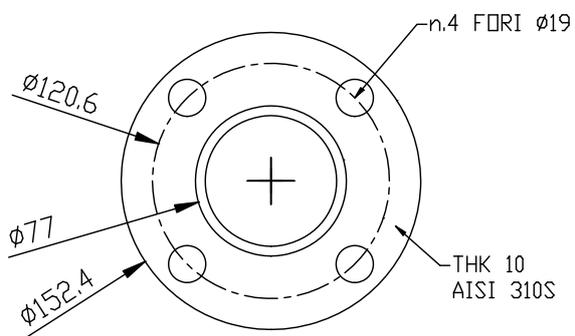
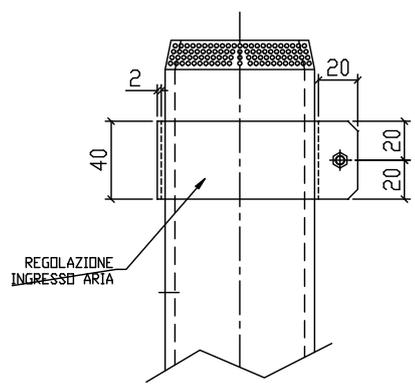
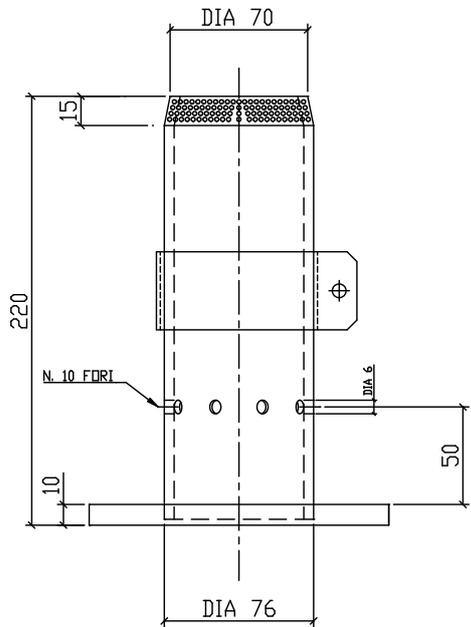


BRUCIATORE 2

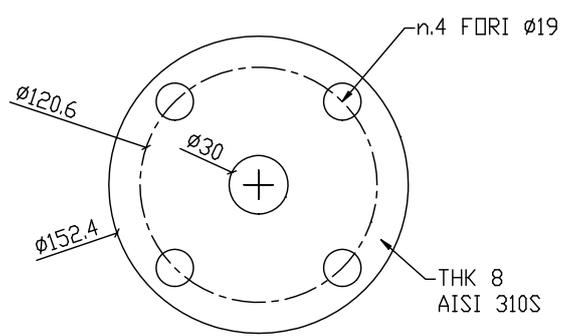
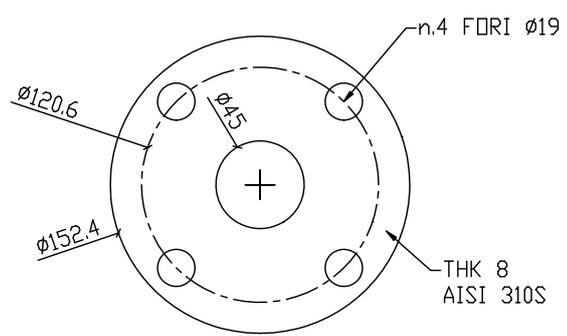
ITEM	DESCRIPTION / DIMENSION	Q.TY	MATERIAL
10	-	-	-
9	-	-	-
8	TUBO Ø2" SCH 80	1	A 312 TP 310 S
7	CONO - LAMIERA 50*352*5 THK - FORATA	1	A 240 TP 310S
6	TUBO Ø76" 6 THK	1	A 312 TP 310 S
5	FL SO Ø2" #150 RF - DA LAMIERA THK 8	1	A 240 TP 310S - ALLOY
4	FL SO Ø2" #150 RF - DA LAMIERA THK 8	3	A 240 TP 310S - ALLOY
3	TUBO Ø2" SCH 80	1	A 312 TP 310 S
2	CONO - LAMIERA 150*400*5 THK	1	A 240 TP 310S
1	TUBO Ø4" 6 THK	1	A 312 TP 310 S

LISTA MATERIALI / MATERIAL LIST

0		EMESSO PER APPROVAZIONE		MAZZEO	MAZZEO	CHIARELLI	-	16/04/09
REV.	DESCRIZIONE - DESCRIPTION	ESBG. PRG/PD	CONTR. CE/CD	APPR. APP/CD	Q.C.	DATE		
 ROMBIOLO (VV)		VESSEL NUMBER: --		COMM. JOB		BANCO PROVA		
TITOLO / TITLE		BRUCIATORE		DIS. N° / DWGN.		B/004		
SOSTITUITO DA - REPLACED BY				SCALA/SCALE	SEL.	REV.		
				N.A.	2/3	0		

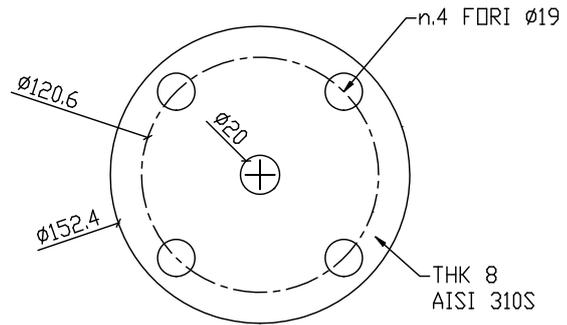


BRUCIATORE
REV. 1



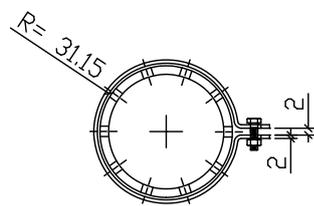
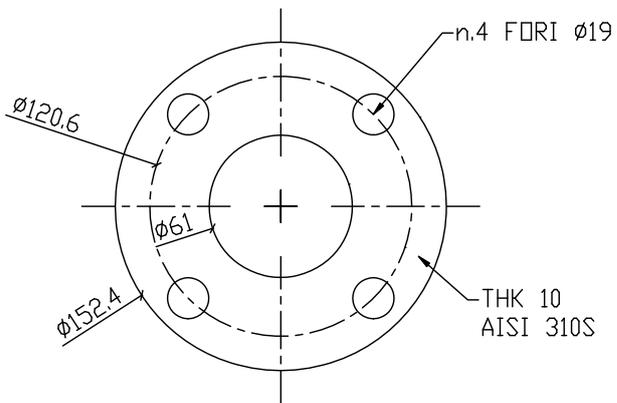
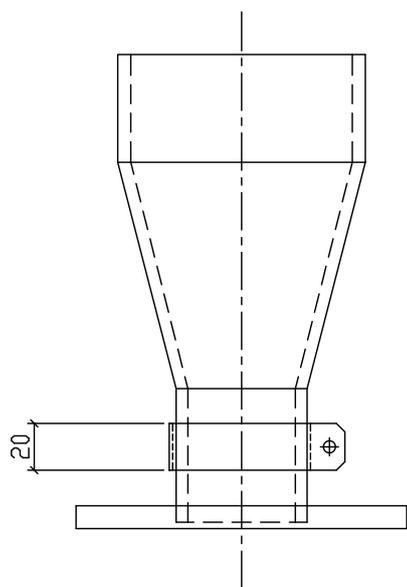
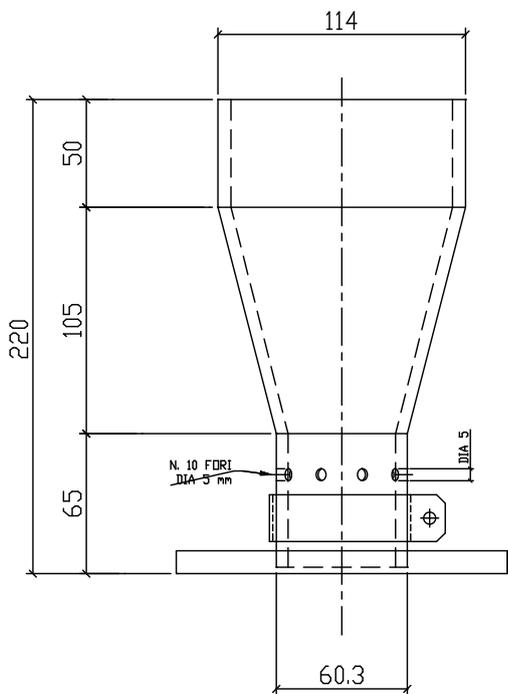
DIAFRAMMA FORO $\phi 45$

DIAFRAMMA FORO $\phi 30$

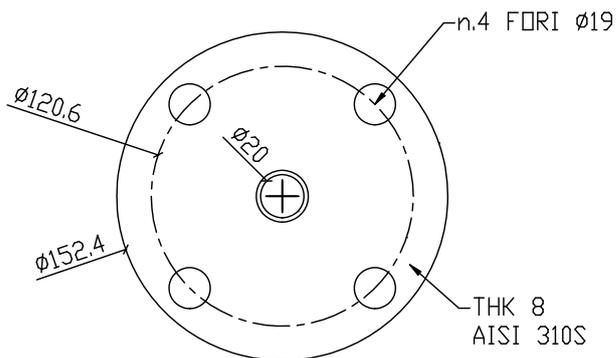


DIAFRAMMA FORO $\phi 20$

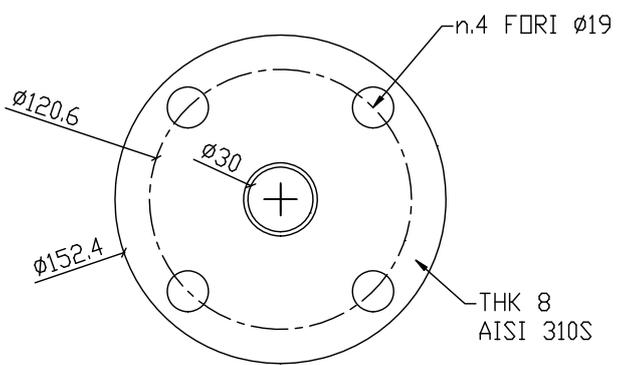
0	EMESSO PER APPROVAZIONE	MAZZEO	MAZZEO	CHIARELLI	-	07/01/10
REV.	DESCRIZIONE - DESCRIPTION	ESIG. PREP'D	CONTR. CH'ED	APPR. APP'ED	Q.C.	DATE
		VESSEL NUMBER: --		COMM. JOB BANCO PROVA		
ROMBIOLO (VV)		ITEM: --		DIS. N° B/009 DWG. N.		
TITOLO TITLE				SCALA/SCALE		
BRUCIATORE / DIAFRAMMI				1/1		
SOSTITUITO DA - REPLACED BY				REV. 0		
				N.A.		



BRUCIATORE TIPO 2

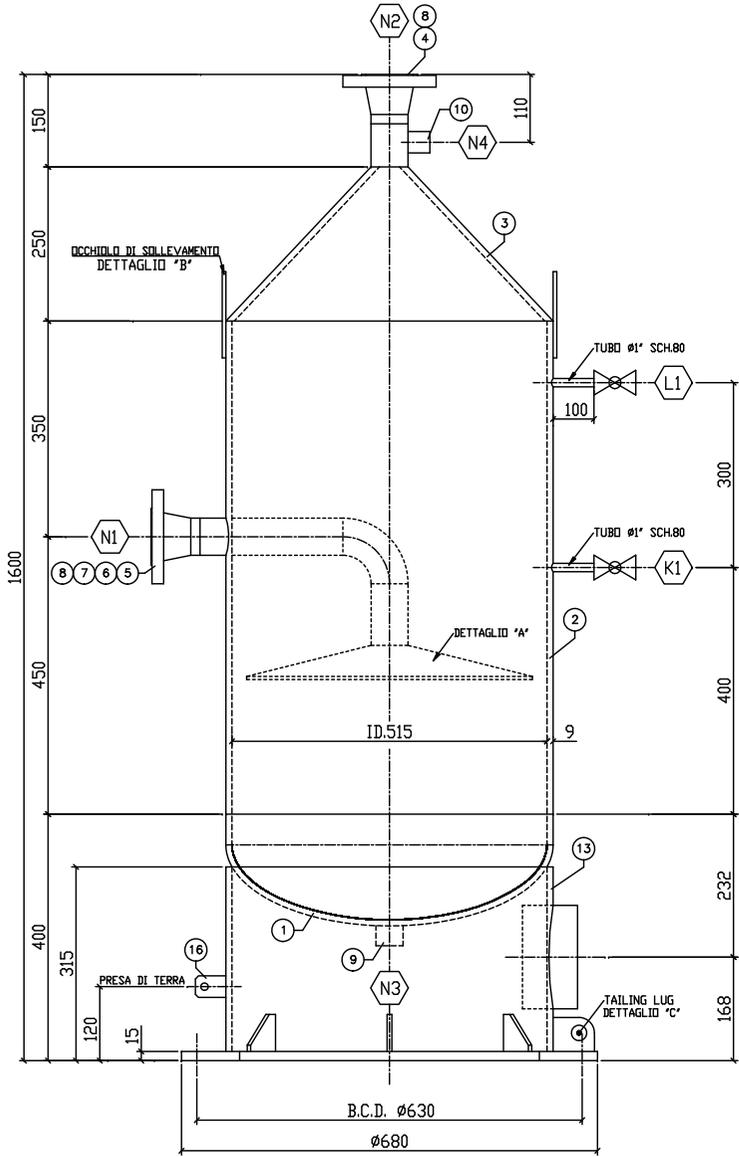


DIAFRAMMA FORO Ø20

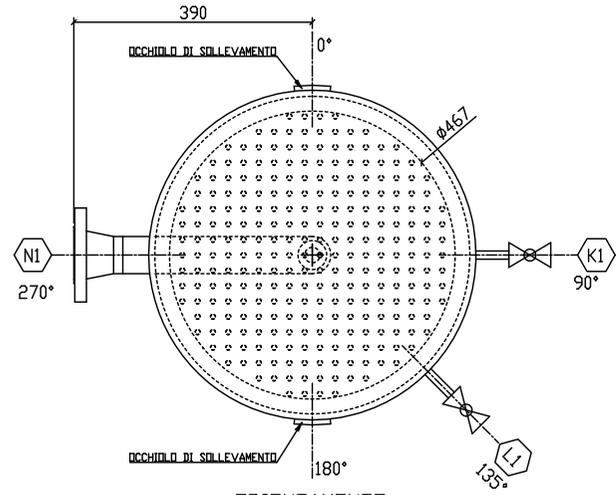


DIAFRAMMA FORO Ø30

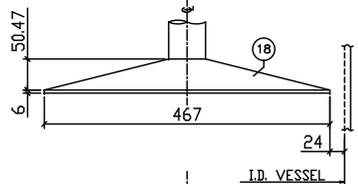
0	EMESSO PER APPROVAZIONE	MAZZEO	MAZZEO	CHIARELLI	-	07/01/10
REV.	DESCRIZIONE - DESCRIPTION	REQ. PREP	CONTR. CHKD	APP. APPED	Q.C.	DATE
		VESSEL NUMBER: --		COMM. JOB BANCO PROVA		
ROMBIOLO (VV)		ITEM: --		DIS. N° DWGN. B/010		
TITOLO TITLE BRUCIATORE TIPO 2				SCALA/SCALE	SEL	REV.
SOSTITUITO DA - REPLACED BY				N.A.	1/1	0



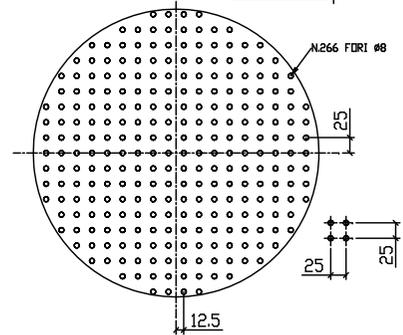
VISTA IN ELEVAZIONE



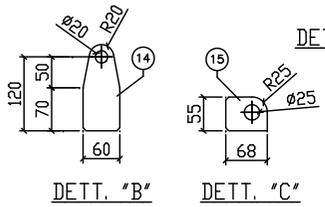
ORIENTAMENTO



I.D. VESSEL

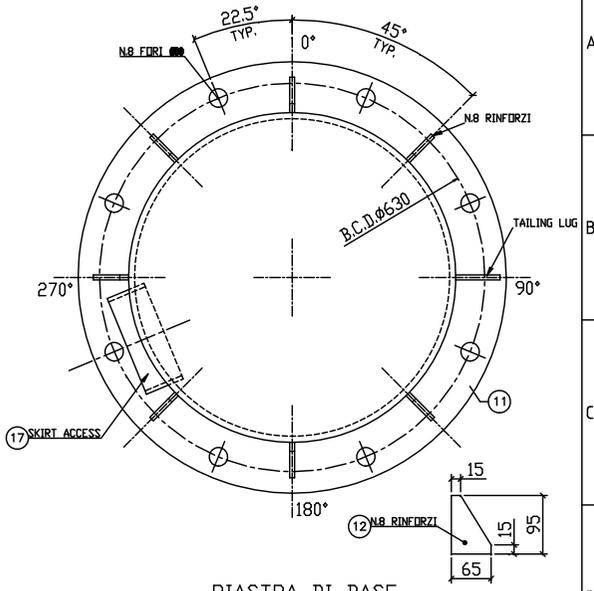


DETTAGLIO "A"



DETT. "B"

DETT. "C"



PIASTRA DI BASE

18	LAMIERA FORATA	OD. 467 - 6 THK	1	A 516 Gr 60
17	ACCESSO ALLA GONNA	TUBO 6" SCH 40	1	A 106 Gr B
16	PRESA DI TERRA	35 x 50 x 6 THK	1	A 240 TP 304
15	OCCHIOLO	120 X 60 X 9 THK	2	A 516 Gr 60
14	OCCHIOLO	68 X 95 X 9 THK	1	A 516 Gr 60
13	GONNA / SKIRT	295 X 1680 X 9 THK	1	A 516 Gr 60
12	RINFORZI	65 X 95 X 9 THK	8	A 516 Gr 60
11	PIASTRA DI BASE	OD. 700 - 20 THK	1	A 516 Gr 60
10	MEZZO MANICOTTO #1/2" #3000 NPT	MEZZO MANICOTTO #1/2" #3000 NPT	1	A 105
9	MEZZO MANICOTTO #1" #3000 NPT	MEZZO MANICOTTO #1" #3000 NPT	1	A 105
8	FL WN #2" #150 RF SCH 80		2	A 105
7	TUBO #2" SCH 80		1	A 106 Gr B
6	CURVA #2" LR 90° SCH 80		1	A 234 WPB
5	TUBO #2" SCH 80		1	A 106 Gr B
4	TUBO #2" SCH 80		1	A 106 Gr B
3	LAMIERA PER CONO	350 X 1680 X 9 THK	1	A 516 Gr 60
2	LAMIERA PER MANTELLO	800 X 1680 X 9 THK	1	A 516 Gr 60
1	FONDO P/E 2x1	OD. 535 - 9 THK	1	A 516 Gr 60

ITEM	DESCRIPTION / DIMENSION	Q.TY	MATERIAL
------	-------------------------	------	----------

LISTA MATERIALI / MATERIAL LIST

POSITION NOZZLE	SIZE	SERVICE	NOMINAL SIZE (NPS)	ASME PRESSURE CLASS	SCHEDULE/THICKNESS
L1	1"	INGRESSO ACQUA	1"	VALVOLE A SFERA	-
K1	1/2"	LIVELLO ACQUA	1/2"	LIVELLO	-
N4	1/2"	PRESSOSTATO	1/2"	MEZZO MANICOTTO #3000 NPT	-
N3	1"	DRENAGGIO	1"	MEZZO MANICOTTO #3000 NPT	-
N2	2"	USCITA GAS	2"	WN #150 RF	SCH 80
N1	2"	INGRESSO GAS	2"	WN #150 RF	SCH 80

NOZZLES

0		EMESSO PER APPROVAZIONE	MAZZEO	MAZZEO	CHIARELLI	-	11/03/09
REV.	DESCRIZIONE - DESCRIPTION	ESBG. PREP'D	CONTR. CHICQ	APPR. APPRD	Q.C.	DATE	
		VESSEL NUMBER: --		COMM. JOB		-	
ROMBIOLO (VV)		ITEM: --		DIS. N° B/002		DWGN.	
TITOLO TITLE				WATER SEAL GPL - METANO			
SOSTITUITO DA - REPLACED BY				SCALA/SCALE		SEL. REV.	
				N.A.		1/1 0	

