

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

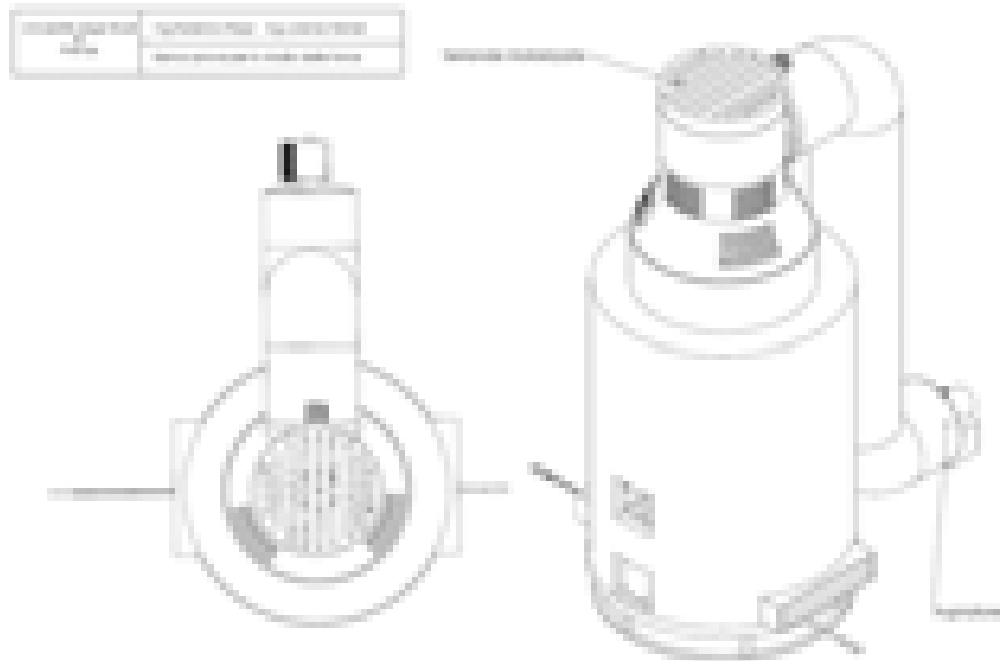
Prof. Ing. MARIO TUCCI

Candidato

Ing. FEDERICO TRIPPI

CAPITOLO 2:

PROGETTAZIONE E SVILUPPO DEL BANCO PROVA PER TORCE INDUSTRIALI



Titolo:

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

2.1 PREMESSA

Alla luce delle considerazioni effettuate nella prima fase di ricerca bibliografica inerente alla realizzazione del banco di prova per lo studio di prototipi di torce industriali e di quanto ricavato dallo sviluppo dei modelli CFD per lo studio della combustione di fiamme in aria libera, è stato quindi possibile raggiungere le minime condizioni progettuali necessarie alla definizione della geometria del sistema. Il lavoro di tesi in questa sede presentata è pertanto proseguito realizzando fisicamente la camera di prova e tutta l'impiantistica termoidraulica necessaria per il corretto funzionamento del sistema.

Il capitolo che segue illustra nel dettaglio la progettazione del banco, la definizione di tutte le strutture ausiliarie necessarie al suo funzionamento, la sensoristica inserita al suo interno e lo sviluppo del software di acquisizione dati realizzato.

Particolarmente significativa è stata la fase di definizione del layout della zona di prova, che come meglio descritto in seguito, ha richiesto la pianificazione degli spazi per l'alloggiamento e le infrastrutture sia per la torcia in scala reale che per la camera di test da utilizzarsi sui modelli scalati. Avvalendosi dei sistemi di progettazione strutturale classica, ovvero di software per lo sviluppo CAD delle strutture, è stato possibile realizzare le messe in tavola e i modelli tridimensionali del banco.

L'impiego di P&ID ha permesso la definizione univoca di tutte le linee e della strumentazione da allestire su di esse; partendo da questi sono state dimensionate e realizzate tutte le condotte di adduzione e i sistemi ausiliari necessari per il funzionamento del banco.

Infine è stata progettata e allestita la catena di misura, acquisizione e gestione dei dati: per fare ciò si è dovuto generare un circuito di condizionamento dei segnali e una rete di alimentazione dei sensori che fosse coerente col sistema di elaborazione. Per facilitare le operazioni di acquisizione, gestione e visualizzazione delle condizioni operative del banco si è dovuto pertanto

programmare un software con interfaccia visuale, concepito nel concetto di quadro sinottico, che ha permesso il monitoring completo del banco.

2.2 DEFINIZIONE DEL PROGETTO

La progettazione e l'allestimento della camera di prova per lo studio di torce industriali ha richiesto un serio approfondimento tecnico e normativo in termini di regole di buona progettazione impiantistica per i sistemi alimentati con combustibili tecnici. Come già discusso nel capitolo precedente, a causata dalla riservatezza industriale legata a questo tipo di tecnologia, la ridotta disponibilità di informazioni recuperabili da letteratura scientifica, ha portato una naturale suddivisione del sistema in sotto blocchi progettuali da sviluppare singolarmente. Nella specifico, come affrontato nel paragrafo successivo, la camera di test è stata sviluppata elaborando la parte strutturale, definendo tramite P&Id le linee, i sistemi di controllo e la sensoristica da installarvi, ed infine programmando il software di acquisizione ed elaborazione dei dati.

Parallelamente il progetto ha previsto anche la progettazione e la realizzazione di un derrick in scala reale per la valutazione degli effetti atmosferici e dei transitori in quota sulle teste di nuova concezione sviluppate appositamente per torce industriali di processo.

2.3 CARATTERISTICHE REALIZZATIVE DELLE TESTE DI COMBUSTIONE PER TORCE

Coerentemente con quanto valutato dalle analisi CFD espone nel dettaglio nel capitolo precedente, sia ritenuto che la struttura dovesse contenere il modello in scala dell'intera torcia. Si è quindi preferito miniaturizzare tutti i componenti inerenti il tip del sistema (iniettori vapore, fiamma pilota e sistema frangivento), permettendo così una simulazione dell'intera zona di fiamma soggetta all'effetto degli agenti atmosferici quali vento e pioggia. Inoltre un tip tella torcia con diametro scalato ha permesso di ridurre, limitando la portata, sia le quantità di gas necessarie alla simulazione del fenomeno, sia le dimensioni effettive del pennacchio. Questo secondo effetto è particolarmente significativo in quanto la potenza irradiata effettivamente prodotta dal fronte di fiamma, è tale da rendere difficilmente gestibile l'intero sistema soprattutto nel caso di pennacchi particolarmente estesi.

In Figura 1 è rappresentata la messa in tavola, gentilmente concessa in visione da G.A.M. Oil&Gas inerentemente alle operazioni strettamente connesse al progetto in questione, dello stack, ovvero della zona terminale, di una torcia di processo elevata. Come visibile dalla Figura 1, per quanto il dispositivo non presenti geometri e particolarmente complesse rispetto a da altre apparecchiature industriali dedicate alla combustione, questo richiede la compartecipazione funzionale di più elementi che nello specifico sono il sistema frangivento, la corona di ancoraggio della fiamma sulla sommità della condotta, i promotori di turbolenza per l'iniezione di vapore e infine i sistemi pilota necessari per l'accensione e per il mantenimento in sicurezza della combustione.

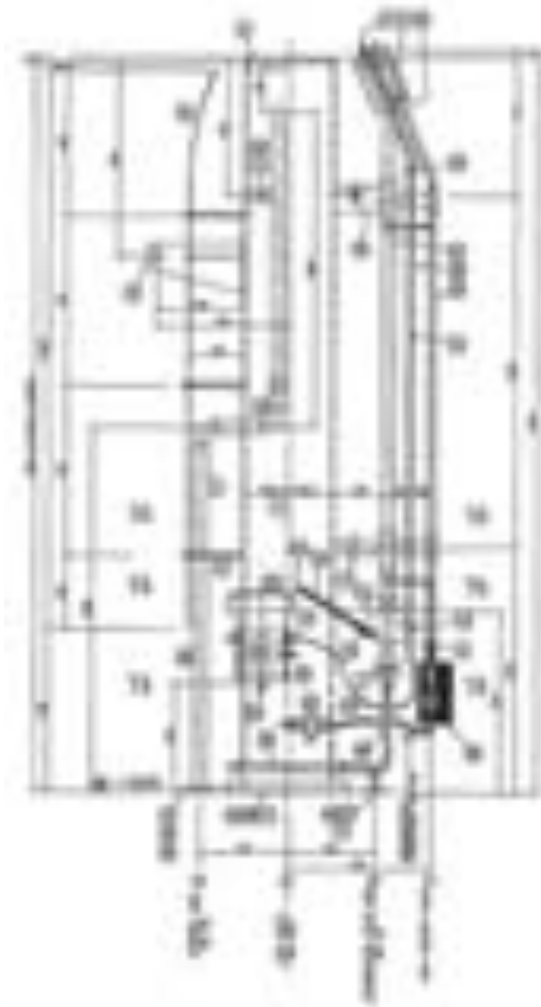


Figura 1: Modulo terminale di una torcia industriale elevata.

Gli effetti prodotti dalla presenza della fiamma pilota e dai sistemi d'immissione di acqua o vapore per aumentare il momento complessivo del gas ed evitare così una combustione sporca, verranno realizzati pertanto- analogamente al resto

dello stack - con sistemi opportunamente scalati in funzione dei rapporti di similitudine appropriati per la caratterizzazione del fenomeno. La soluzione più semplice da adottare è risultata essere quella di nebulizzare piccole quantità di vapore saturo o di acqua direttamente all'uscita della vena di adduzione del gas principale.

E' stato quindi opportuno, una volta individuati i parametri adimensionali significativi, appoggiandosi sulle valutazioni ricavate dai sistemi di calcolo messi a punto, calcolare la scalatura dell'alzata della torre e la sezione di uscita, mantenendo invariati i rapporti tra le varie strutture. Analogamente è risultato estremamente importante anche individuare la posizione (in termini di altezza dal suolo) del modello all'interno della galleria, stabilendo sia le opportune distanze dalla sezione di imbocco, permettendo quindi lo sviluppo dello strato limite e la formazione di turbolenza delle portate in ingresso alla galleria a, sia dalle pareti laterali.

Un'intera torre di combustione presenta tipicamente un'alzata di circa 20 m, composta generalmente da 4 moduli compreso quello riportato in Figura 1, che come già sottolineato, mostra la testa della torcia.

La testa della torcia (stack) reale si presenta con un'altezza di circa 4000 mm e con un diametro approssimativo di 400 mm (24"). Il sistema è munito di una barriera frangivento – ovvero una lastra traforata che permette di aumentare la turbolenza nella sezione di ancoraggio della fiamma. Sulla zona esterna sono alloggiati le tubazioni per la fiamma pilota mentre internamente al canale primario è alloggiato il sistema di iniezione del vapore.

Le simulazioni effettuate con i sistemi di calcolo CFD hanno permesso una stima delle portate massime gestibili internamente al banco, per lo studio del fenomeno.

2.4 MOTIVAZIONI CHE LA SCELTA DALLA LINEA DI PROGETTO

Le motivazioni per le quali è stata scelta una specifica camera tra quelle ideate nel prima fase del lavoro (già dettagliatamente descritte nel primo capitolo) nascono fondamentalmente dalle problematiche che l'analisi CFD ha permesso

di mettere in luce affiancate dalle considerazioni strettamente legate alla realizzazione fisica del sistema.

Le analisi numeriche infatti hanno mostrato che, lavorando con velocità di efflusso del tail gas comprese tra i 5 e i 10 m/s, il fronte di fiamma prodotto da teste della torcia di dimensioni accettabili in termini di lavorazioni meccaniche, sarebbero state di altezze variabili tra i 3 e i 6 m di altezza. Questo avrebbe comportato, se si fosse optato per la costruzione di una galleria ad estensione orizzontale, la realizzazione di una camera con volumetrie considerevoli, dovendo avere necessariamente un'alzata non inferiore agli 8 m. Analogamente, gli effetti prodotti da determinate condizioni atmosferiche sono risultati da letteratura meno significativi rispetto ai più costanti problemi di ancoraggio della fiamma. Pertanto si è preferito prediligere un modello di camera in grado di sostenere delle torce di dimensioni scalate, ma comunque significative, piuttosto che avere una lettura solo parziale degli effetti prodotti dal vento.

Essendo il fronte di fiamma un fenomeno che per sua natura presenta una forte estensione in altezza e un ridotto ingombro radiale, il progetto si è così indirizzato sulla concreta intenzione di generare una camera a ciclo aperto con sviluppo verticale in grado di contenere dei modelli scalati di torcia che permettessero di studiare dettagliatamente le geometrie delle teste delle flare in condizioni di funzionamento continuo.

2.5 DEFINIZIONE DEI BANCHI PROVA

L'attività si è quindi concentrata sullo studio e sulla realizzazione dei due banchi di studio da utilizzare per le attività sperimentali d'indagine scientifica sui prototipi di torce oggetto del programma.

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.

Il banco di studio si presenta quindi come un complesso composto da tre strutture: la camera di estensione e contenimento della fiamma, lo skid per l'allacciamento dei combustibili, il posizionamento dei sensori e l'alloggiamento dei sistemi di sicurezza. Entrambi i banchi di studio sopra descritti sono alimentati mediante un sistema impiantistico appositamente studiato per l'applicazione in oggetto che permette di generare tail gas con composizioni analoghe a quelle descritte nel capitolo precedente miscelando gpl, azoto, gasolio, etc. Si sottolinea che i banchi di studio precedentemente descritti presentano funzionalità complementari nell'ottica di misurare tutte le grandezze fisiche di interesse per studiare il comportamento termo fluidodinamico dei prototipi di torcia oggetto del programma.

2.6 SVILUPPO DEL BANCO PROVA PER TORCE SCALATE

Cronologicamente nello sviluppo del progetto si è proceduto dapprima allo studio ed alla progettazione del banco di studio a dimensioni ridotte.

La Figura 2 rappresenta uno dei primi schemi progettuali definitivi del banco di prova per torce scalate, realizzati durante il progetto.

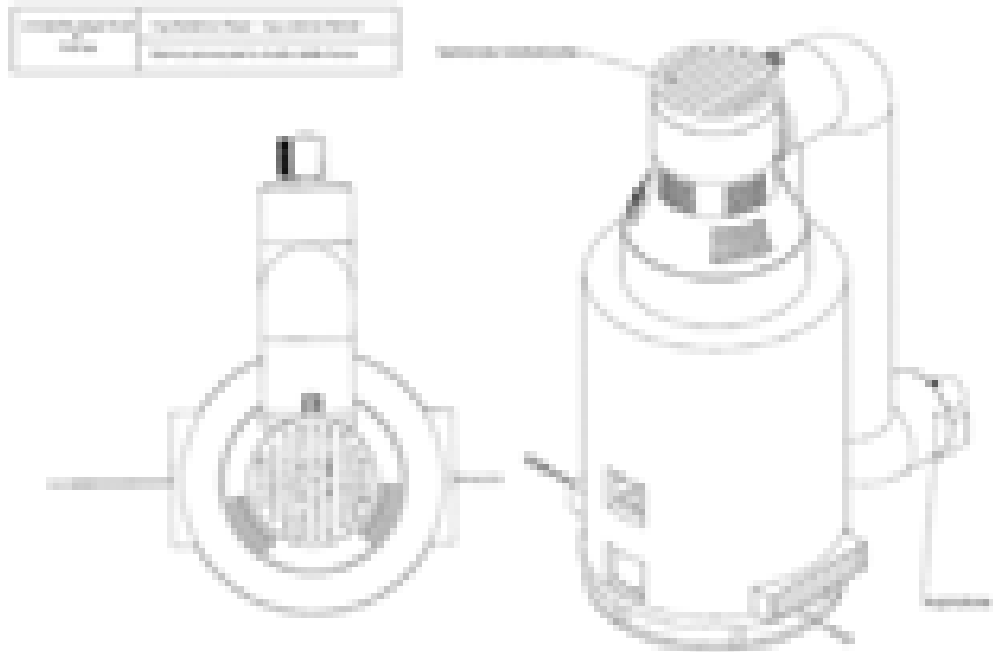


Figura 2: Schema tridimensionale del banco di studio a dimensioni ridotte

Il sistema riportato nella figura precedente prevede:

- Una cappa di contenimento di forma cilindrica dotata di aperture di aspirazione posizionate in basso e di uno scarico per i gas combusti posto sulla sommità.
- Un aspiratore con relativa tubazione di raccordo che permette di convogliare i fumi verso un analizzatore della composizione dei gas di scarico.
- Una serie di accessi ottici situati sulla superficie cilindrica della cappa per effettuare misure di tipo pirometrico o con telecamera ad infrarossi.
- Una testa posta all'interno della cappa su cui montare i vari prototipi di torce per tail gas in scala da sperimentare.
- Un sistema di alimentazione, miscelazione e regolazione di vari gas combustibili ed inerti per ottenere tail gas con composizioni note da bruciare mediante la torcia prototipo.

Il banco di studio è dotato di un sistema di generazione del tail gas ottenuto mediante la miscelazione e regolazione di varie tipologie di combustibili e d'inerzi in ingresso. Tale sistema (Figura 3) è strutturato secondo lo schema funzionale di seguito riportato, ci sarà maggiormente dettagliato e approfondito nei prossimi paragrafi.

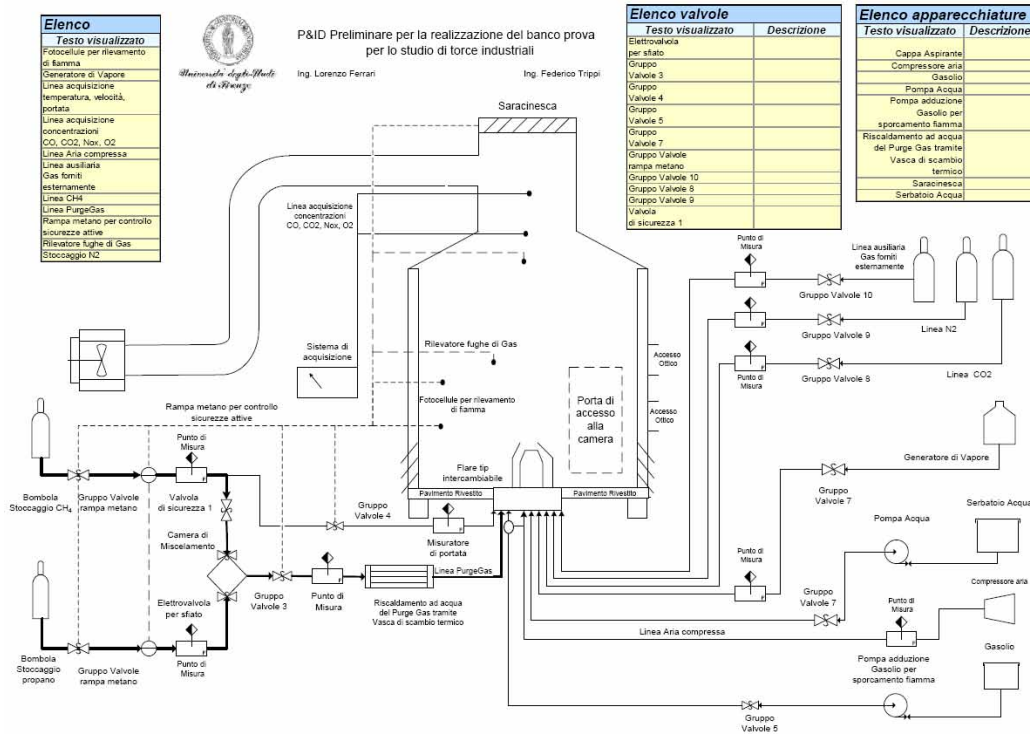


Figura 3: Schema impiantistico del sistema di alimentazione del tail gas

Dallo schema del sistema precedentemente rappresentato risulta evidente che la testa su cui viene montato il prototipo di torcia in scala ridotta sarà collegata ad una serie di linee di gas combustibili (metano e propano) e ad altre linee di alimentazione di gas inerti quali azoto e biossido di carbonio. Sulla testa sono disponibili anche aria compressa, vapore, aria e gasolio. Quest'ultima sostanza permette di simulare l'effetto delle impurità presenti nei tail gas provenienti dai pozzi di estrazione. Occorre sottolineare che la linea di alimentazione dei gas combustibili prevede uno scambiatore di calore acqua/gas che permette di simulare le varie condizioni di riscaldamento del purge gas in ingresso.

Una volta che la fiamma della torcia viene accesa, sarà così possibile studiare il comportamento dei vari prototipi di flare tip misurando le seguenti grandezze:

- la distribuzione della temperatura della fiamma mediante termocoppie distribuite sul banco e una telecamera ad infrarossi;
- Il comportamento della fiamma sullo stack e la generazione di smoke con o senza l'azione dei promotori di turbolenza;
- le emissioni di gas inquinanti o comunque di scarico mediante sistema in continuo di rilevazione di NO_x , CO, CO_2 , O_2 .

Lo scopo del banco sarà quindi quello di effettuare tali misure al variare delle condizioni di alimentazione della torcia e delle geometrie del flare tip.

La geometria ottimale della cappa di contenimento del banco di studio ridotto è quella ottenuta attraverso le simulazioni CFD di cui ampiamente discusso nel capitolo precedente: i parametri di design del sistema sono stati quindi fissati con diametro dello stack di 70 mm, velocità del combustibile di 5 m/s e velocità del flusso d'aria di 1 m/s. Per ottenere il corretto funzionamento del banco, fondamentale è stata la definizione della mappa vettoriale di velocità sul fondo della camera in maniera specifica per il contenimento dei flussi di ricircolo in prossimità della zona di ingresso dell'aria comburente.

Le simulazioni svolte hanno permesso di individuare inoltre la geometria ottimale della cappa di estrazione della banco sia da un punto di vista della sua forma, della posizione e dimensione delle aperture di aspirazione di aria comburente e scarico dei gas combusti.

Analogamente a quanto sopra, la mappa vettoriale (Figura 4) simulata del campo di velocità nella zona all'attaccatura tra corpo cilindrico e camino, ha evidenza un fenomeno di ricircolo del flusso, evidentemente dannoso ai fini della conduzione delle attività sperimentali; per tale motivo la geometria messa a punto, per quanto dal punto di vista strutturale e realizzativo leggermente più complessa, è stata tale da ovviare a tale problematica.

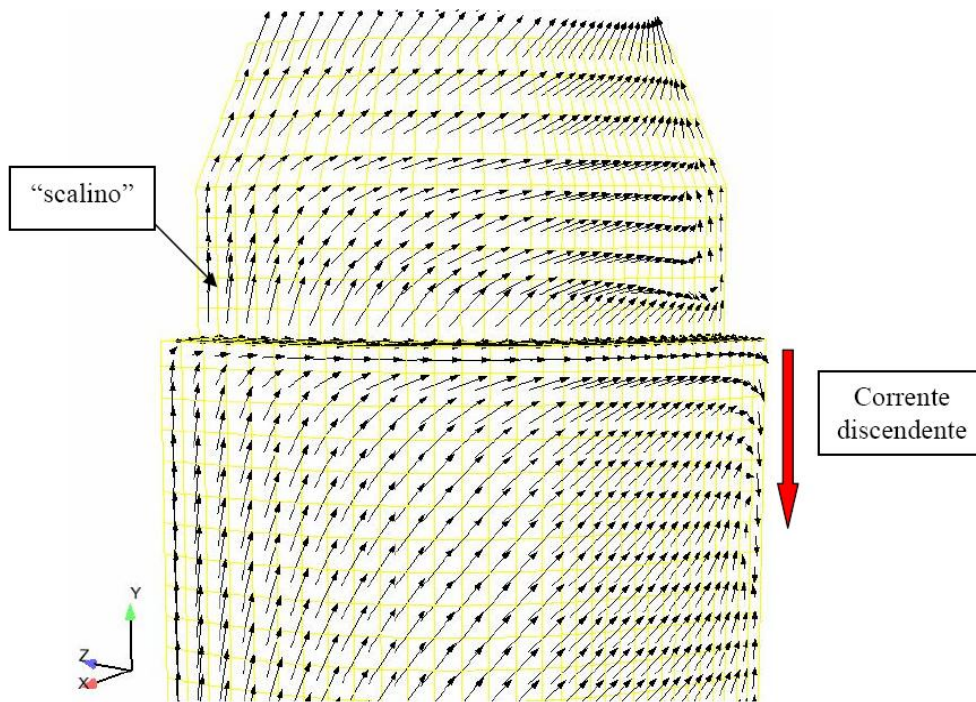


Figura 4: Mappa vettoriale di velocità

Un ulteriore elemento progettuale che è stato possibile affinare mediante gli strumenti simulativi CFD messi a punto nel corso dell'attività di analisi computazionale, sono state le dimensioni dello stack e le velocità dei flussi per contenere la fiamma all'interno del banco di studio ridotto.

Per quanto ampiamente discusso nel capitolo precedente, per continuità nella lettura, in Figura 5 sono riportate le simulazioni sui campi di temperatura con la geometria ritenuta ottimale. Il grafico a sinistra si riferisce ad uno stack di 70 mm di diametro con velocità del flusso di gas di alimentazione di 5 m/s, mentre quello a destra è relativo ad uno stack di 70 mm di diametro con un flusso di gas alimentazione a velocità di 10 m/s.

Nel primo caso si evidenzia che la geometria studiata permette di contenere la lunghezza della fiamma all'interno della cappa; nel secondo caso, al contrario, risulta evidente che la lunghezza della fiamma superi l'altezza della cappa; pertanto determinate portate saranno necessariamente considerate come valori limite da utilizzare nella definizione dei diametri delle condotte idrauliche per l'adozione dei combustibili tecnici.

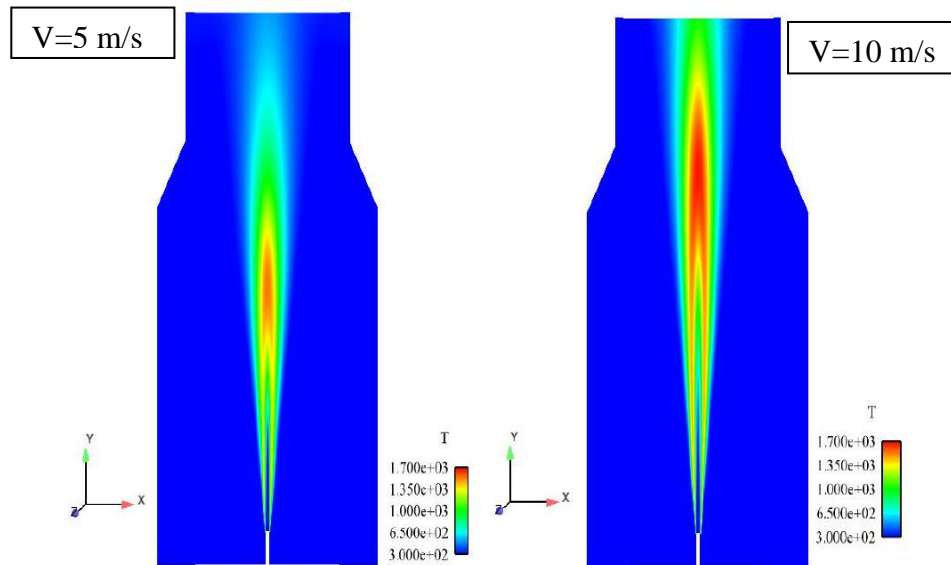


Figura 5: Diagramma di temperatura della fiamma

Al termine del complesso lavoro di simulazione CFD svolto nella fase iniziale del lavoro, è stata quindi definita la configurazione finale e la geometria del banco di sperimentazione per torce in scala.

Da quanto ottenuto in letteratura, in particolare facendo riferimento ad alla camera per lo studio delle torce industriali sviluppata presso l'Università dell'Alberta, si è quindi giunti all'idea di realizzare una camera di test sulla falsariga di quanto già presentato alla dalla comunità scientifica internazionale.

Le scelte progettuali del prototipo sono state pensate nell'ottica di dimensionare la galleria in modo tale da permettere uno studio dettagliato del fenomeno, mantenendo tuttavia un'accettabile semplicità realizzativa e di impiego; sviluppando il sistema su questa filosofia, è stato possibile ottenere un impiego funzionale immediato, più adatto alle realtà aziendali ma senza necessariamente togliere niente alle possibilità di ricerca scientifica in su tale struttura.

La camera è in grado di contenere il modello in scala dell'intera torcia. Per individuare i parametri adimensionali significativi, appoggiandoci sul sistema di calcolo sviluppato, è stato possibile dimensionare l'alzata della torre e la sezione di uscita, mantenendo i giusti rapporti tra tutti i corpi dedicati al funzionamento del sistema.

La miniaturizzazione di tutti i componenti del tipo del sistema (iniettori vapore, fiamma pilota e sistema frangivento), permettendo una simulazione dell'intera zona di fiamma; utilizzando perlopiù una torcia con diametro scalato è stato possibile ridurre, limitando la portata, sia le quantità di gas necessarie alla simulazione del fenomeno, sia le dimensioni effettive del pennacchio.

Questo secondo effetto è particolarmente significativo in quanto la potenza irradiata effettivamente prodotta dal fronte di fiamma, è tale da rendere difficilmente gestibile l'intero sistema soprattutto nel caso di pennacchi particolarmente estesi. Gli effetti prodotti dalla presenza della fiamma pilota e dai sistemi di immissione di acqua o vapore per aumentare il momento complessivo del gas ed evitare così una combustione sporca, sono stati realizzati conseguentemente tramite la riproduzione degli stessi, opportunamente scalati in funzione delle altre strutture primarie e dei rapporti di similitudine appropriati alla descrizione del fenomeno.

2.6.1 SCALATURA DEL MODELLO

Sicuramente un modello di dimensioni molto superiori rispetto a quello ricreabile internamente alla galleria del vento come sopra definita permetterebbe uno studio più approfondito sia degli elementi ausiliari della torcia sia dei fenomeni di ancoraggio della fiamma. Le dimensioni scelte per la scalatura del sistema sono state scelte in maniera opportuna da garantire comunque un buon livello di dettaglio senza tuttavia generare fenomeni di combustione eccessivamente difficoltosi da gestire. Modelli con rapporti di scalatura inferiori comporterebbero perlopiù notevoli problematiche soprattutto a livello di contenimento e di misura della fiamma all'interno della galleria. Inoltre utilizzando sezioni di uscita eccessivamente grandi (con scale comprese da 1:1 a 1:4) – mantenendo la velocità di efflusso a 5 m/s come stimato dalle simulazioni CFD, il sistema richiederebbe notevoli quantitativi di gas per le prove, producendo così complicazioni ulteriori in termini di stoccaggio e di tempi di simulazione ridotti.

E' stato quindi affidato alla bontà delle simulazioni numeriche il compito di studiare nel dettaglio l'efficienza della zona terminale della torcia e degli elementi ausiliari quali iniettori di vapore, fiamma pilota e paratie frangivento.

In questo modo, una volta realizzati i prototipi degli stack, i fenomeni di ancoraggio della fiamma potranno essere analizzati contemporaneamente sia tramite le prove sperimentali, che tramite le simulazioni numeriche ottimizzate con i valori numerici ricavate dalle misure dei sensori disposti sulla camera..

2.6.2 PRIMA VALUTAZIONE SULLA STRUTTURA DEL MODELLO

La struttura della galleria ad asse verticale prevede quindi una gabbia centrale con le pareti e il soffitto interamente rivestiti di materiale refrattario (fibra di lana di roccia) in modo da evitare rischi di incendio locali. Questo problema è particolarmente rilevante soprattutto sul soffitto che viene costantemente sollecitato e lambito dal pennacchio durante le fasi di funzionamento del test rig. La galleria è rialzata da terra con un telaio di supporto metallico. Lasciando la zona inferiore della galleria aperta, rialzando quindi il livello di camminamento del banco di 900 mm, è stato possibile creare un accesso diretto di tutti i sistemi ausiliari e delle strumentazioni per le misure da effettuare direttamente sulla zona di fiamma. Il basamento della galleria è stato pensato e realizzato tramite una colata di calce livellata e con interposto un pavimento a griglia per la disposizione e il passaggio delle tubazioni e dei cavi. La parte frontale del test rig presenta una scala per il raggiungimento della porta di accesso alla camera, mentre lateralmente è stato realizzato un accesso ottico sul quale sono state previste delle finestre trasparenti di pirex o vetro termico così da permettere la possibilità di acquisire immagini della torcia in funzione tramite strumentazioni dedicate quali videocamere o termo-camere.

Inizialmente, in maniera analoga a quanto visto per la galleria dell' Alberta, è stata discussa la possibilità di inserire all'interno stesso del banco un binario sul quale far scorrere (manualmente o tramite controllo elettronico) un braccio meccanico. Questo avrebbe permesso il riposizionamento dei sensori di misura.

Tuttavia, volendosi dedicare in maniera più approfondita allo sviluppo delle torce, operativamente è stato optato per una soluzione più economica ma comunque altrettanto funzionale, ovvero quella di allocare i sensori per la misura delle concentrazioni delle specie chimiche direttamente allo scarico della galleria (a valle della sezione convergente).

Considerando le geometrie della camera scelta, si è valutato di gestire il controllo dell'aria comburente immensa della camera tramite due soluzioni realizzative: sul fondo della camera sono state allocate delle paratie mobili in maniera da parzializzare il flusso in ingresso, mentre a valle del condotto di aspirazione (che preleva i gas dalla sommità del banco) è stato inserito un motore per generare un'aspirazione. Tra la zona di fiamma e l'imbocco della sezione discendente che porta al motore aspirante, è stata interposta una sezione convergente del condotto, così da aumentare la velocità del flusso di uscita.

Il primo schema complessivo della galleria è riportato nella Figura 6. Come è ben visibile, il primo modello ideato, ottenuto parallelamente alle simulazioni CFD di cui discusso nel capitolo precedente presentava ancora lo scalino sulla sommità della camera; come risulterà visibile dalle messe in tavola definitive, tale geometria è stata eliminata nella versione finale del banco.

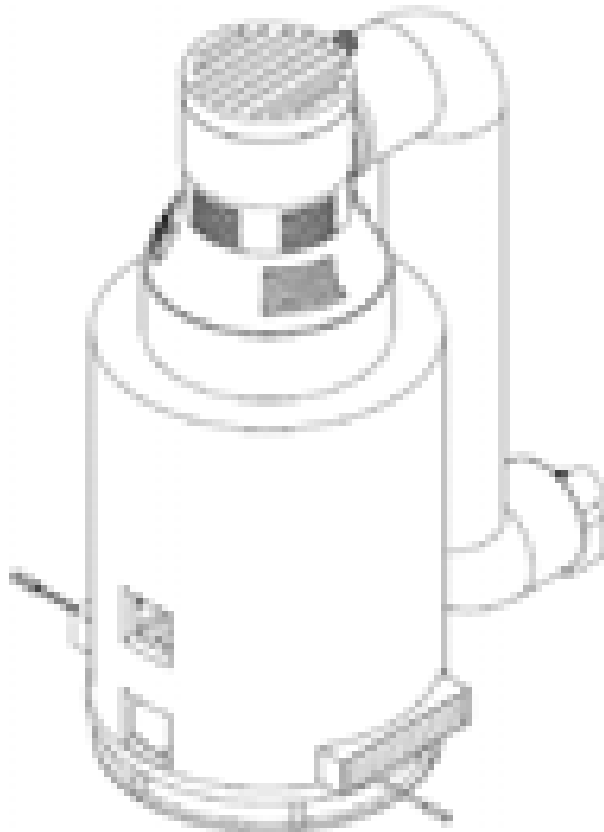


Figura 6: Schema complessivo della galleria

La galleria del vento è predisposta per disporre di numerosi ingressi secondari: i principali riguardano le condotte di adduzione del gas necessario per il

mantenimento della fiamma pilota e i dispositivi per realizzare gli effetti di mixing, evitando pertanto la generazione di combustione sporca (ovvero la formazione di fumo nero sulla sommità della fiamma).

Indipendentemente dal modello di torcia, si è deciso di allestire un sistema di stoccaggio del gas adeguatamente capiente a garantire un funzionamento del banco prova sufficientemente esaustivo al fine di effettuare misure utili per la stima dell'efficienza del bruciatore in analisi. Tale sistema di stoccaggio, costituito fondamentalmente da un grosso serbatoio di gpl interrato e da flange di innesco per bombole standard secondarie, permette l'utilizzo della camera sia utilizzando forniture esterne che combustibile tecnico precedentemente toccato direttamente in loco.

Il sistema infatti è stato concepito in maniera tale da permettere la sperimentazione anche con gas forniti da una generica ditta committente. In fase di sperimentazione del prototipo di torcia viene richiesto infatti, al fine di ottenere un'analisi esaustiva sulla bontà del sistema in studio, un quantitativo di gas sufficiente per generare un fronte di fiamma che permanga per almeno una decina di minuti, permettendo quindi tutte le misure necessarie per lo studio del fenomeno. Per quanto riguarda invece le prove ottenute con gli stoccaggi di gas allestiti presso l'impianto stesso, è stato valutato di utilizzare una miscela di combustibile per riprodurre il peso molecolare del flare gas, nonché un impianto di condizionamento del combustibile in modo da mantenere costante la densità e conseguentemente la portata.

Lateralmente alla galleria, a distanza opportuna seguendo le norme di sicurezza preposte per lo stoccaggio di contenitori in pressione contenente combustibili infiammabili, è stato pensato di realizzare una struttura attrezzata per tali necessità.

La portata del metano per il mantenimento della fiamma pilota e quella di Flare gas da immettere nella vena principale saranno gestite tramite delle valvole pneumatiche con regolatori a controllo manuale.

I sistemi di misura si concentrano quindi sulla capacità di acquisire internamente alla camera le temperature raggiunte dalla fiamma nelle varie zone del

pennacchio, le concentrazioni delle specie chimiche, le portate di aria incidente, di gas bruciato, di vapore e di gas ausiliario immessi.

Di particolare importanza per le funzionalità del banco è inoltre la possibilità di ottenere delle stime accurate delle varie concentrazioni delle specie chimiche generate dalla combustione e presenti nel volume di aria elaborato dalle gallerie, a valle della zona di fiamma. La soluzione scelta per il rilevamento di tali concentrazioni è stata quella di posizionare il sistema di campionamento degli inquinanti direttamente in prossimità del condotto di scarico, a distanza sufficiente dalla zona di fiamma, così da evitare un eccessivo carico termico sulle strumentazioni.

2.6.3 DEFINIZIONE ESECUTIVA DELLA CAMERA E DELLE LINEE

Lo studio del banco e della sua geometria, puntando a trovare il miglior compromesso tecnico per ottenere un sistema funzionale ma che allo stesso tempo permettesse di fare concrete valutazioni scientifiche per l'ottimizzazione delle teste delle flare gas, ha permesso così di definire tutte quelle caratteristiche necessarie alla realizzazione della camera.

Dopo numerosi incontri pianificati, unendo l'esperienza professionale di G.A.M. Oil&Gas alle competenze tecnico scientifiche dei ricercatori dell'Università di Firenze, sono state definite le specifiche finali di progetto per la realizzazione del banco.

Lo sviluppo del banco si è quindi diviso su due linee successive di processo:

- Dimensionamento strutturale della camera
- Definizione delle linee e dei componenti ausiliari del sistema

2.6.4 DIMENSIONAMENTO STRUTTURALE DELLA CAMERA E SCELTE REALIZZATIVE DEFINITIVE

In questa fase G.A.M. Oil&Gas, avendo esperienza pluriennale nella carpenteria metallica, ha realizzato calcoli strutturali, scelto i materiali e sviluppato fisicamente il corpo della camera, mantenendo le dimensioni richieste e le

specificità ricavate dalle simulazioni CFD, dai calcoli sperimentali per la valutazione dei fronti di fiamma e dei carichi termici.

Rispetto all'idea inizialmente prodotta in fase di progettazione, in fase realizzativa, dovendo rispondere alle necessità strutturali, sono state inserite le seguenti modifiche rispetto al primo modello di camera ad asse verticale:

- Si è definito che Il corpo del banco prova, non volendo infrangere normative edili ma generando comunque un banco adatto agli scopi prefissati, fosse composto una struttura fissa con un'alzata massima non superiore ai 6 m comprensiva di camera principale e cono convergente (Figura 7). Sopra a questa (che risulta essere la parte fissa),viene inserito un camino di scarico facilmente rimovibile di alto 3,5 m. La posizione del ventilatore è stata alla fine fissata a terra; questo infatti implica la possibilità di prelevare i gas e quindi stimare gli inquinanti su un camino di discesa facilmente accessibile.

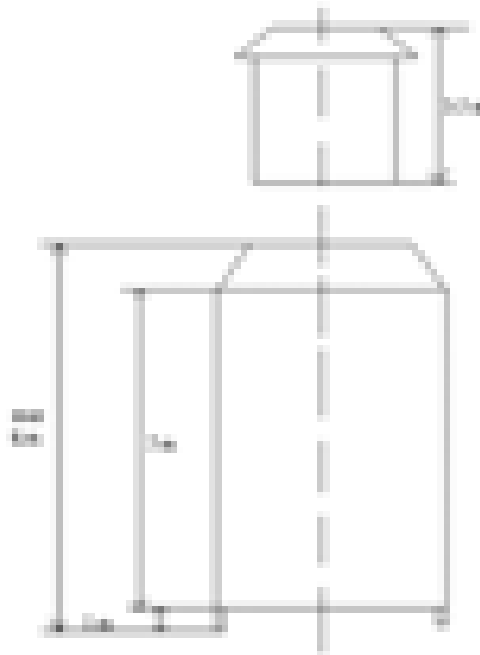


Figura 7: Ingombri e composizione della camera

- Si è stabilito di contenere il diametro della camera cilindrica principale a 4 m (Figura 8); con questa dimensione è possibile garantire un flusso di aria adeguato allo studio del fenomeno e allo stesso tempo non generare un carico termico eccessivo sulla struttura del banco. Così facendo è stato

perlopiù possibile omettere la presenza della gabbia interna traforata di cui discusso nella presentazione del modello come illustrata nel primo capitolo.

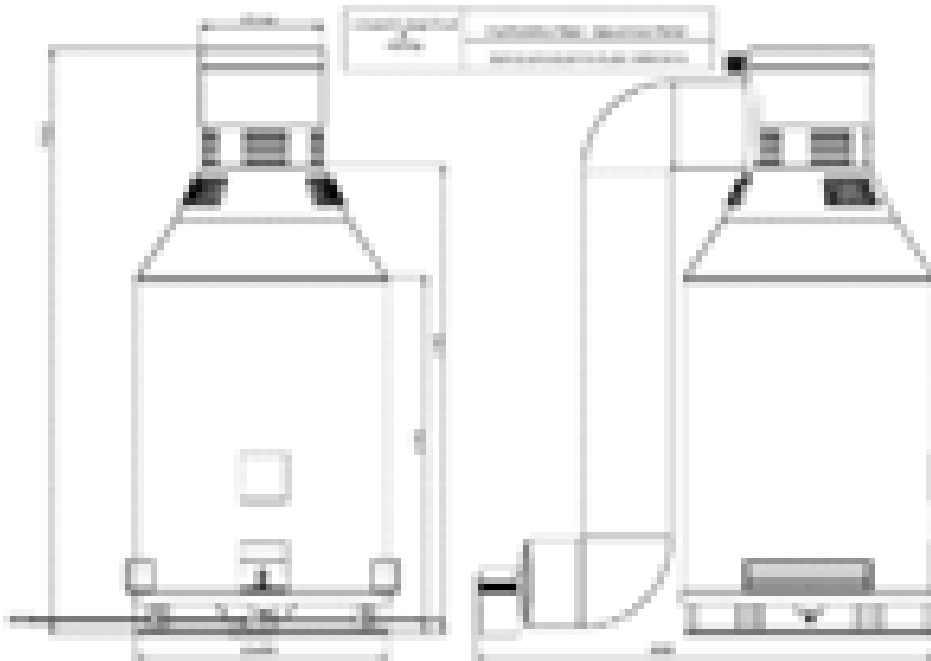


Figura 8: Modello CAD di dimensionamento finale della camera

- Alla luce dell'esperienza carpentieristica di G.A.M. Oil&Gas, è stato deciso che tutti gli attacchi della cappa e della testa della torcia fossero flangiati e non saldati, così da facilitare le fasi di montaggio, smontaggio ed eventuali modifiche in corso di progetto.
- Per facilitare le fasi di sperimentazione, si è deciso di realizzare una porta di accesso al banco in maniera da avere un ingresso agevole per la sostituzione dei prototipi di torcia;
- Al posto della gabbia interna traforata, è stato quindi previsto uno spessore di refrattario. Nota la stima dei carichi termici ottenuta dalle simulazioni CFD, G.A.M. Oil&Gas, forte di esperienze precedenti provenienti dallo sviluppo di forni industriali, ha definito lo spessore e il tipo di materiale isolante; la camera è stata così realizzata con una soluzione da 200 mm di strato isolante refrattario e 50 mm di fibra ceramica (Figura 9); Di fronte ad una temperatura interna di parete prossima agli 800°C, all'esterno non si

dovrebbero superare i 50-60°C (questo è stato poi confermato in fase di test).

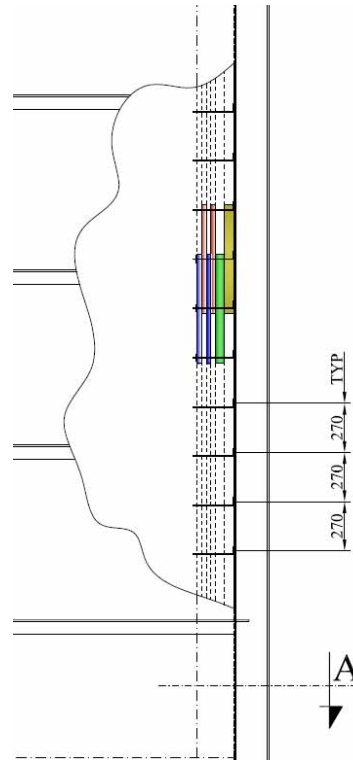


Figura 9: Particolare con sezione degli strati di refrattario interni alla camera

- Dalle valutazioni dei flussi ottenute con le tecniche CFD, si è stimato che le prese per l'immissione dell'aria d'ingresso devono occupare indicativamente sulla base della camera 4/5 del diametro; per fare ciò la parte rialzata della camera è stata munita di paratie removibili. La portata aspirata è invece controllata dall'aspirazione prodotta dal motore posto a valle della sezione di scarico dei fumi.
- Il basamento cementato per il banco di prova è stato previsto di circa 15x15 m e prevede delle fosse di contenimento che in caso di emergenza hanno la funzione di sistemi frangi fiamma.

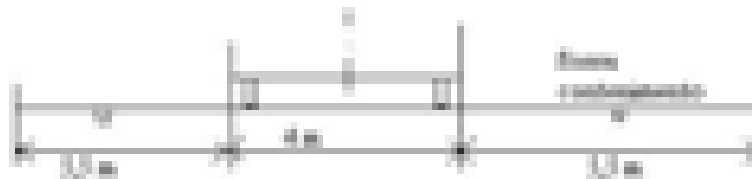


Figura 10: Definizione fosse tagliafuoco sul basamento cementato.

I disegni costruttivi definitivi della camera sono riportati di seguito (Figura 11, Figura 14 e Figura 15):

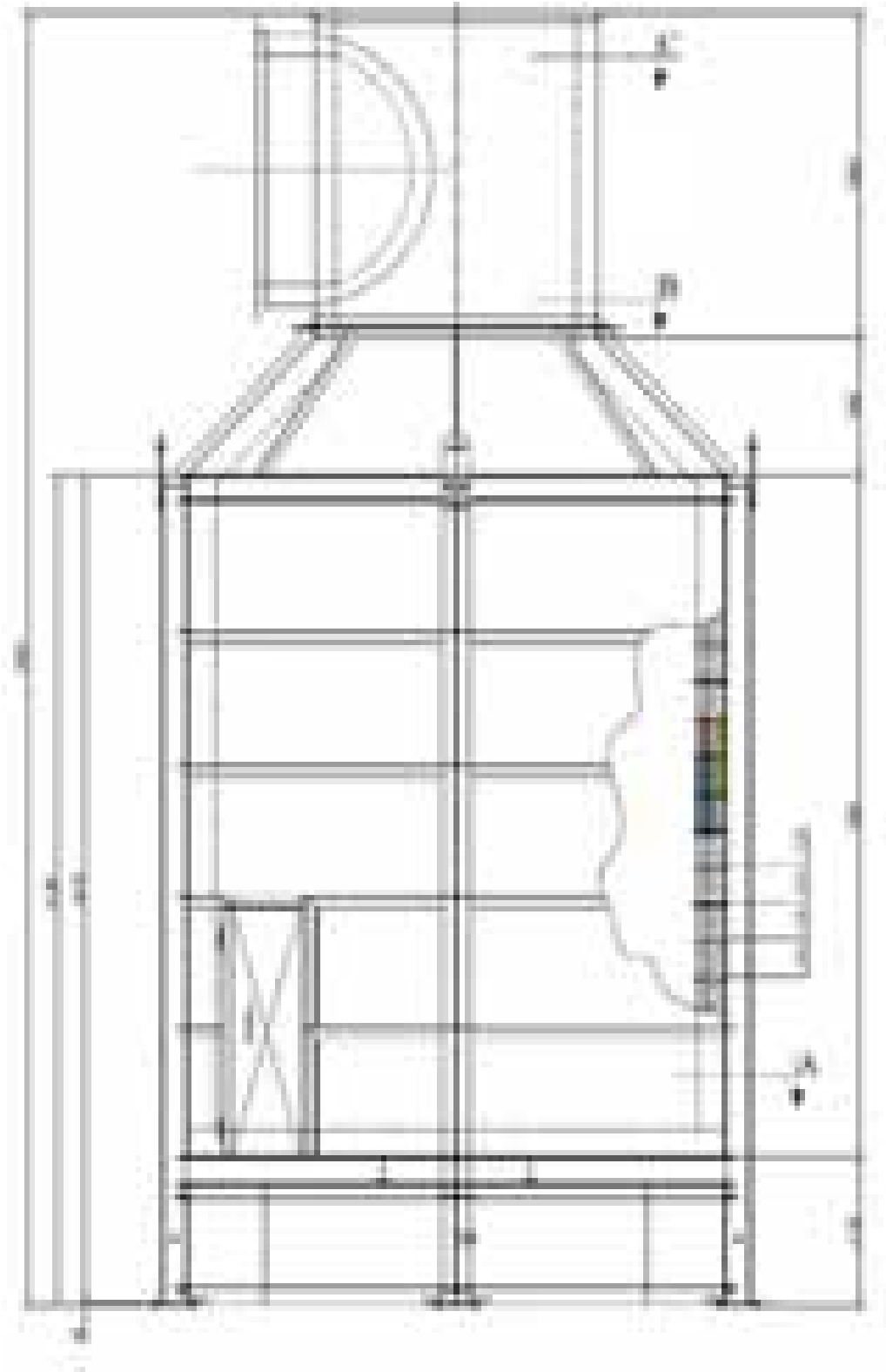


Figura 11: Vista laterale del banco con sezione sullo spessore di coibentante.

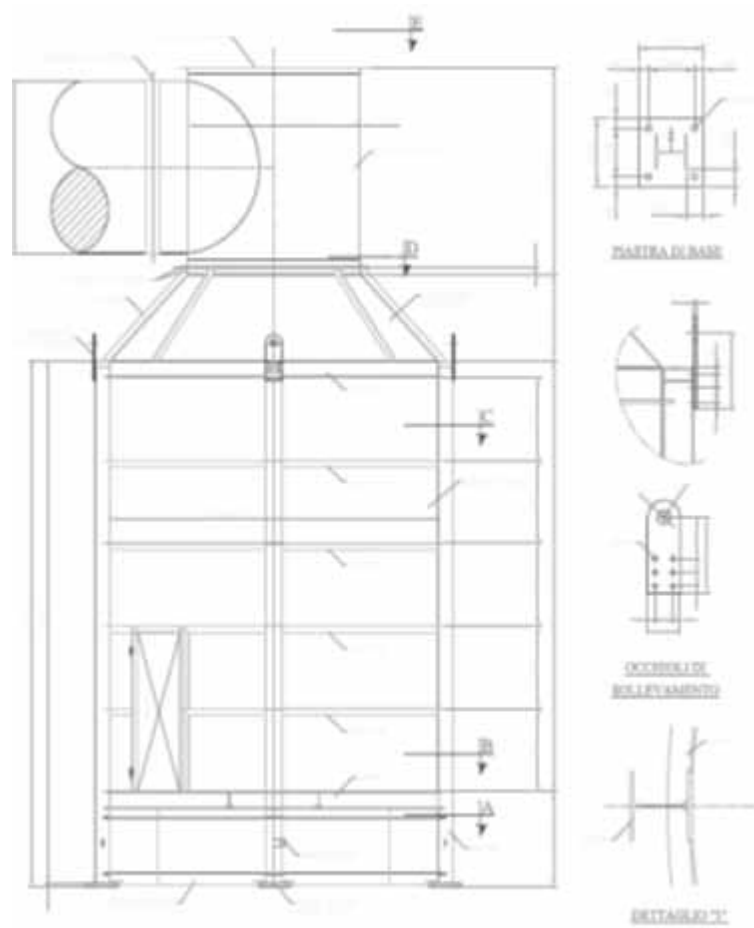
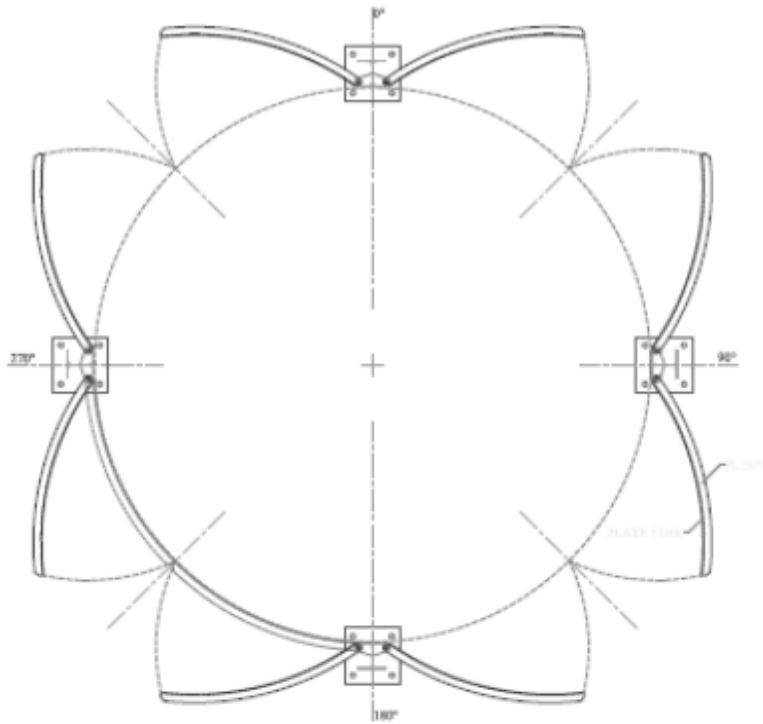


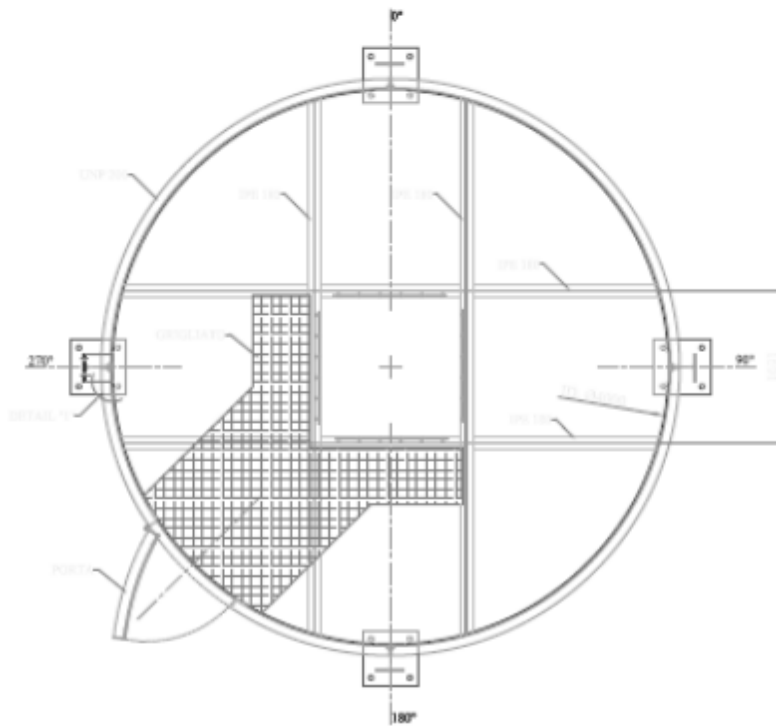
Figura 12: Progetto definitivo vista laterale della camera

<i>Elemento di riferimento</i>	<i>Ingombri camera</i>
Alzata corpo	5000 mm
Diametro corpo	4000 mm
Alzata sezione convergente	1000 mm
Alzata Camino	2400 mm
Diametro Camino	2100 mm
Diametro sezione aspirazione fumi	900 mm
Elevazione da terra	1100 mm
Tipo di isolante	Sibral SiO_2 ; Al_2O_3 + ZrO_3 (55% + 45%)
Spessore dell'isolante fianchi camera	400 mm
Spessore dell'isolante fianchi camino aspirazione	300 mm
Temperatura massima ad impiego continuo	1430 °C

Tabella 1: Ingobri del banco prova



SEZIONE "A"



SEZIONE "B"

Figura 13: Vista in sezione della camera – particolare del pavimento con griglia d'accesso.

In Figura 14 sono riportate alcune foto scattate durante le fasi di allestimento del banco prova.

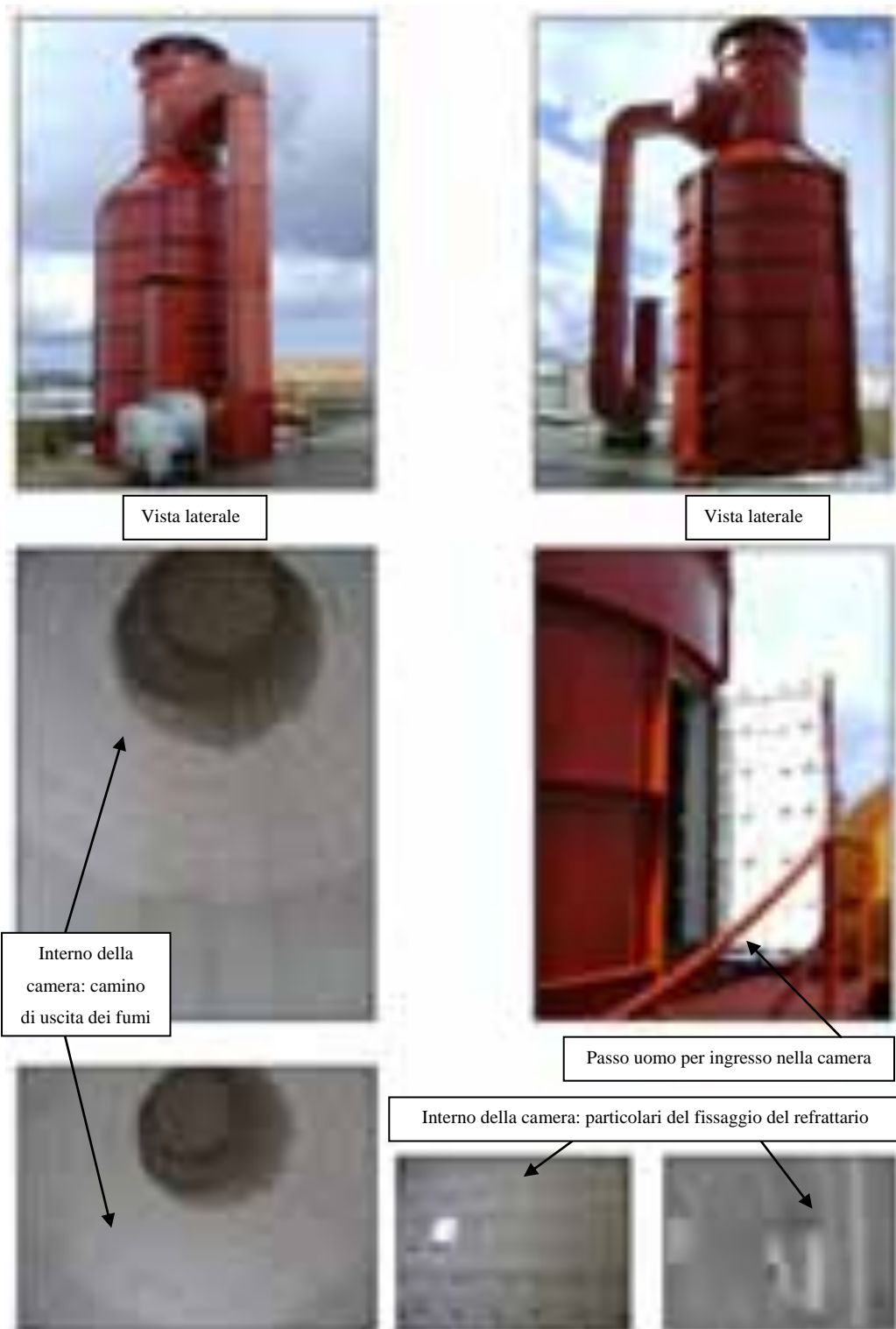


Figura 14: Configurazione definitiva del banco di studio a dimensioni ridotte

2.6.5 ANALISI STRUTTURALE DELLA CAMERA

Durante la fase di progettazione, al fine di procedere verso la realizzazione del banco, definite le geometrie secondo quanto ottenuto dalle valutazioni CFD e concordemente con quanto emerso dalle necessità costitutive necessarie al suo corretto funzionamento, sono state svolte varie simulazioni FEM per l'analisi strutturale. Nello specifico sono state effettuate simulazioni sia sulla cappa di contenimento che sul corpo della struttura. Nota la ripartizione dei carichi concentrati, avendo effettuato l'analisi statica del sistema, è stato quindi possibile dimensionarlo in maniera tale da garantire la stabilità della struttura e la resistenza a forze agenti esternamente (come il vento) sulle superfici. E' stato quindi necessario costruire una gabbia esterna con la funzione di telaio portante: questa è stata poi rivestita con le pareti in metallo che a loro volta, come già precedentemente illustrato, sono state ricoperte internamente di materiale coibentante. In Figura 15 è riportato il modello FEM della camera e del telaio portante. Come dimostrato dalle simulazioni, questa risultata correttamente dimensionata – considerando perlopiù un coefficiente di sicurezza pari a 2,5 - sia in termini di resistenza strutturale alle sollecitazioni meccaniche (carichi), che agli stress termici che tipicamente possono portare a deformazione della struttura per deformazione del materiale.

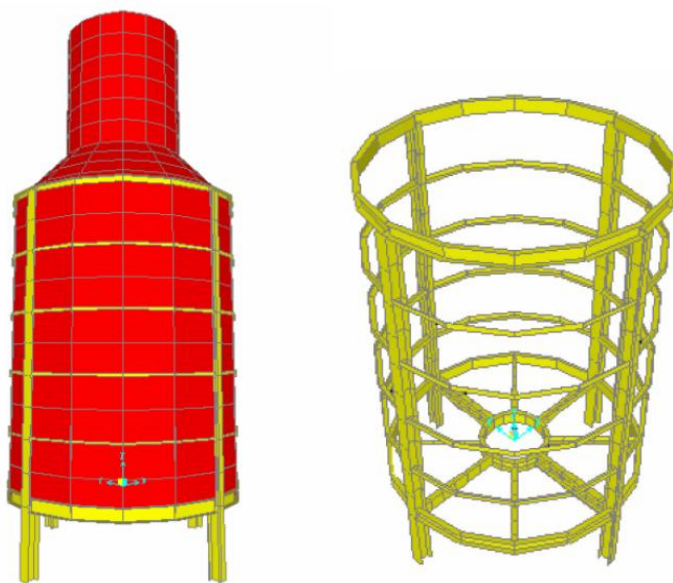


Figura 15: Modello FEM del telaio e della camera

Per completezza, in Figura 16 seguente si riporta il campo vettoriale degli stress strutturali (tensioni/deformazioni) prodotte dai carichi termici generati dall'attività di combustione simulata sul modello.

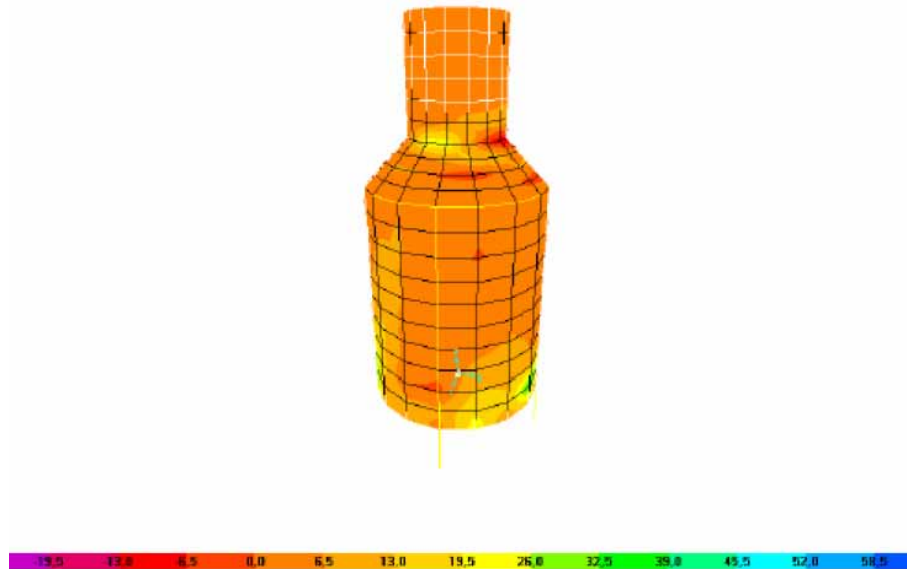


Figura 16: Diagramma vettoriale delle tensioni a massimo carico termico

2.7 SVILUPPO DEL BANCO PROVA IN SCALA 1:1

Come già discusso precedentemente, utilizzando un unico banco prova per ottenere le misure e le condizioni di test sopra descritte sarebbe stato necessario utilizzare delle geometrie costruttive del test rig estremamente dispendiose e con volumetrie nettamente più grandi di quelle presentate. I pochissimi sistemi di misura realizzati al mondo fino ad oggi risultano limitati nelle funzionalità di test rispetto al banco prova realizzato nel presente progetto. Quelli in grado di elaborare portate di metano considerevoli, e quindi adatte a lavorare in condizioni prossime a quelle di piena funzionalità, si limitano a testare le condizioni di ancoraggio e stabilità della fiamma (non registrando quindi le condizioni termodinamiche rilevabili con la griglia tridimensionale dei sensori, né tantomeno le concentrazioni dei gas combusti). Al contrario i sistemi strumentati da laboratorio (tipo la galleria realizzata dall'università dell'Alberta – Canada) permettono di effettuare registrazioni dettagliate tramite sistemi di sensoristica ma su portate di gas estremamente ridotte. Questo comporta una

scalatura del modello delle teste talmente spinta da non apprezzare più significativamente i fenomeni necessari a descrivere il sistema in questione.

Seguendo quanto sopra indicato, il sistema concepito con due banchi operanti in parallelo offre alcuni vantaggi che hanno permesso una progettazione razionale del sistema di sperimentazione. Infatti utilizzando la stessa geometria sia per le teste allocate sulla sommità del Derrick (nome gergale delle torce elevate) che per quelle inserite nella camera di test, è stato possibile unificare il punto di controllo delle linee (e quindi delle valvole di alimentazione) generando una struttura di controllo chiamata in gergo impiantistico “Skid”. Nei prossimi paragrafi la realizzazione di tale apparato sarà ampiamente argomentata.

Così facendo è possibile evitare sia la duplicazione del sistema di controllo, ne tantomeno delle linee di alimentazione, avendo vantaggi sia da un punto di vista di ingombri che di utilizzabilità del banco, mantenendo sia sulle valvole che sulle condutture le stesse dimensioni e caratteristiche strutturali. Anche in termini di affidabilità, il sistema è peraltro più robusto e gestibile. Perlopiù, utilizzando gas tecnici e combustibili altamente infiammabili, il confinamento degli stoccaggi e la riduzione delle zone all'interno delle quali questi possono fluire permette una maggiore sicurezza del sistema.

La torcia in scala reale si presenta come un tralicciato metallico suddiviso da 3 passerelle intermedie di ispezione. Una scala di accesso, opportunamente dimensionata secondo normativa vigente, permette di accedere ai tre livelli per poi raggiungere la sommità della struttura. La linea di adduzione del metano – contraddistinta come da normativa dal colore giallo, passa in maniera assiale rispetto al tralicciato per uscire nel centro della passerella terminale.

L'attività di sviluppo del banco prova in scala 1:1 ha richiesto un'analisi delle tipologie di torcia presenti su impianti funzionati così da realizzarne uno che fosse peculiare alle attività di ricerca che si è inteso approfondire con il presente progetto. Le torce industriali si dividono fondamentalmente secondo due tipologie: quelle elevate (elevated) e quelle a terra (grounded).

Le torce elevate presentano altezze variabili dai 10 ai 100 m. La fiamma è esposta agli agenti atmosferici. Vengono utilizzate tipicamente in zone non

residenziali per problemi di irraggiamento al suolo e caduta di tizzoni incendiari che si possono formare a causa delle condense e continuare a bruciare. Risentono perlopiù di problematiche legate alla rumorosità durante la fase di funzionamento; per tali motivi vengono classificate come strutture ad alto impianto ambientale (termo - acustico). Solitamente sono composte da due linee in parallelo in maniera da tenerne una in funzione mentre la seconda è in manutenzione permettendo il funzionamento complessivo del sistema in ciclo continuo.

Le torce *grounded* presentano le bocche di fuoco a terra e la fiamma si sviluppa all'interno di una camera di combustione con forma cilindrica. In questo caso ovviamente, i problemi causati dalla presenza di venti e altri agenti atmosferici non sono presenti. A differenza di quelle elevate, sono utilizzabili in zone popolate in quanto la fiamma è confinata e occultata non dando problemi di irraggiamento. Perlopiù presentano una rumorosità molto ridotta. Tuttavia questi dispositivi di combustione risultano molto più costosi e complessi.

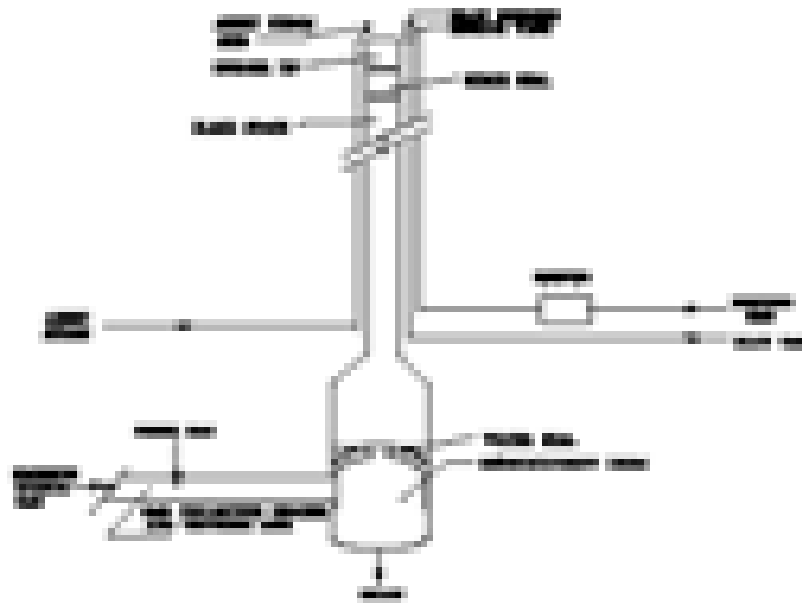


Figura 17: Schema teorico di un corpo di torcia industriale

I componenti che compongono una torcia industriale sono tuttavia fondamentalmente sempre gli stessi; lo schema di Figura 17 mostra concettualmente la struttura che è composta da una linea di adduzione del gas di processo, un tamburo per la raccolta delle condense, un sistema di

prevenzione per lavaggio con gas inerte per evitare effetti di ritorno di fiamma, un sistema di adduzione del gas per la fiamma pilota (singolo o multiplo) e in alcuni casi un sistema di immissione del vapore per incrementare la quantità di moto e il miscelamento con l'aria comburente del gas.

Come elementi di promozione della quantità di moto del tail gas ,vengono utilizzati sistemi di immissione di vapore o di aria in pressione per aumentare localmente il miscelamento combustibile/comburente, permettendo una fiamma “pulita”, ovvero senza produzione di fumo nero sulla cresta (smokeless). Tipicamente vengono montati due tipi di ugelli: uno interno per le basse portate di gas e uno esterno per le alte.

Le caratteristiche del gas di alimento tipicamente impiegato in questi dispositivi sono riportati nella tabella sottostante:

Valore minimo necessario potere calorifico:	7500 – 9300 kJ/m ³
Portata:	
condizioni minimo funzionamento:	45 -90 kg/hr
condizioni standard:	450 -900 kg/hr
condizioni di emergenza:	700 tons/h
Condizioni Funzionamento ottimale:	
Rendimento:	98%
LHV :	11200 kJ/m ³

Tabella 2: Condizioni di riferimento per il funzionamento di torce operative

Al fine di progettare un sistema in scala reale è stato quindi necessario effettuare un accurato studio dei parametri progettuali di base per il dimensionamento del sistema, tenendo ovviamente di conto anche delle effettive problematiche realizzative che potessero insorgere dall'installazione di un sistema di fiamma di tale natura. Tali parametri si concentrano fondamentalmente sui criteri di progettazione del corpo della torcia stessa, rifacendosi così ai i requisiti di sicurezza API(RP)521 che sottolineano le norme progettuali incentrate sulla disponibilità del sistema, i costi, la resistenza strutturale e il limitato impatto ambientale.

Al contempo il dimensionamento del dispositivo è strettamente vincolato alle condizioni d'immissione del gas di alimento. Pertanto, così che fosse possibile ottenere un sistema che rispondesse alle piene funzionalità del dispositivo, le caratteristiche fondamentali sulle quali è stata valutata la realizzazione del Derrick sono state le seguenti:

Portata:

Nella progettazione delle torce, l'utilizzo di portate considerevoli di tail gas aumenta i costi, la richiesta di manutenzione e contemporaneamente riduce il tempo vita utile del sistema. La portata massima si usa tipicamente in condizioni di emergenza. Tuttavia in fase progettuale il dimensionamento lo si effettua proprio nelle condizioni di massimo efflusso. Oltre alle condizioni di design, va definita la portata limite per la quale si attiva un processo di combustione con la relativa formazione di fumo (considerando le condizioni di guasto o gli imprevisti che possono portare a questo).

Composizione:

E' fondamentale avere una stima significativa del contenuto e delle proprietà del gas di alimento - da questo infatti dipende la buona determinazione del design ottimale della torcia. Lavorando su un banco prova, i gas di riferimento utilizzati per le accensioni effettuate sono noti (metano e propano). Tuttavia il sistema è stato concepito in modo da poter gestire future forniture (stoccate in bombole standard o in appositi container) di tail gas proveniente da processi di lavorazione industriale.

Temperatura:

Il controllo della temperatura di fiamma sui punti di ancoraggio è piuttosto importante. Se la temperatura si abbassa eccessivamente può avvenire infatti la formazione di condensa. Sorge così la necessità di valutare ed eventualmente introdurre dei sistemi di rimozione della condensa come tamburi ad asse verticale (che provocano il rallentamento del flusso e la caduta per gravità del condensato) o sistemi a ciclone (nei quali la parte liquida viene separata da quella gassosa per forza centrifuga). La valutazione di tale parametro e quindi dei corrispettivi elementi ad esso connessi è importante per ottimizzare il costo di funzionamento dell'impianto.

Pressione disponibile:

Il funzionamento ottimale di questi dispositivi avviene con gas ad alta pressione. Concettualmente il motivo di tale affermazione risiede nel fatto che si cerca di convertire la pressione del gas in quantità di moto, così da favorire il miscelamento ed evitare la formazione di fumo (smoke - combustione sporca).

Lavorando ad alta pressione, il volume del gas si riduce permettendo di diminuire le dimensioni della bocca della torcia (ottenendo quindi anche una rispettiva riduzione costi).

Alla luce dei parametri sopra indicati, sono state studiate più soluzioni al fine di realizzare un sistema che fosse gestibile ai fini del progetto ma che al contempo permettesse di studiare dei sistemi di fiamma innovativi. Le prime idee progettuali si sono concentrate su dispositivi classici con strutture di torcia elevata per processo continuo.

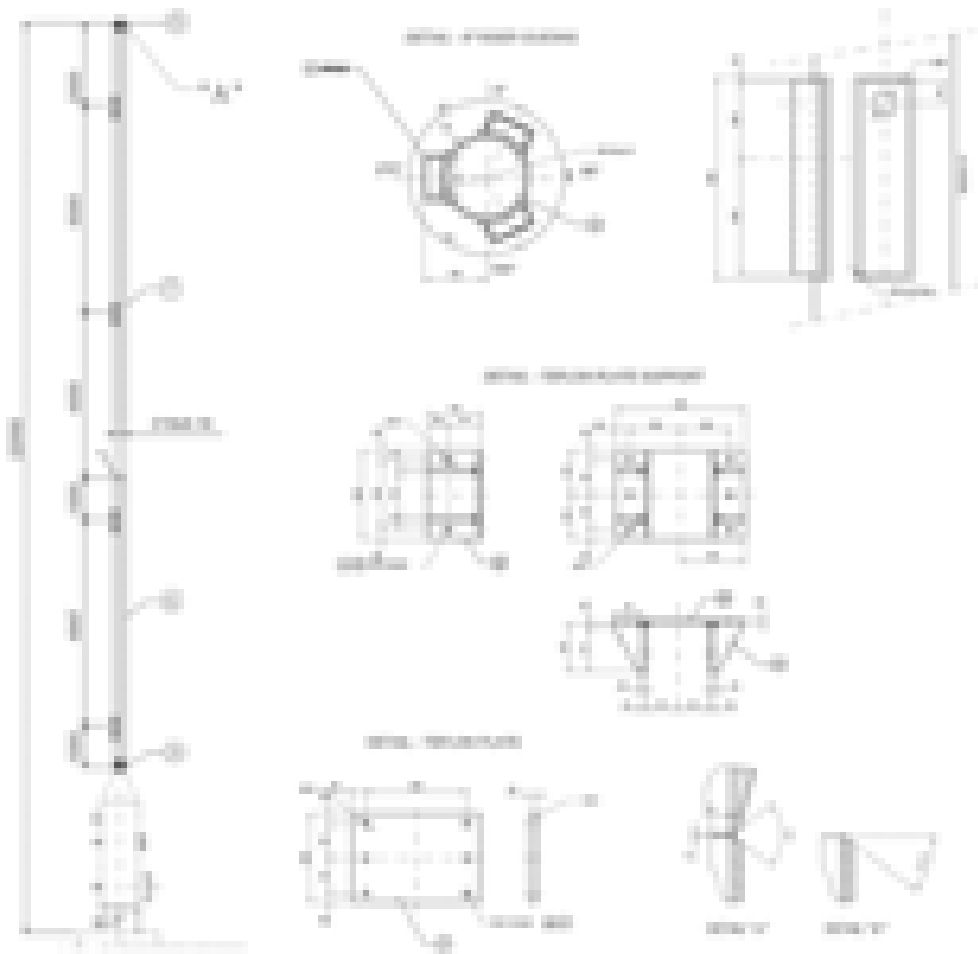


Figura 18: Schema progettuale per la prima idea di torcia in scala reale

La struttura considerata si presenta con un'alzata di 22m rispetto al livello del suolo e si compone fondamentalmente di due elementi, un "Riser", ovvero la condotta di adduzione in quota del flare gas, e un "Vessel" che ha la funzione di guardia idraulica per evitare che un eventuale fronte di fiamma possa risalire a valle delle condotte fino ai serbatoi di stoccaggio. Uno schema progettuale del "Vessel" è riportata in Figura 18. La geometria finale del Water Seal realizzato

e utilizzato sul banco prova è infatti una derivazione ottimizzata di questo primo sistema. Una secondo sistema di sicurezza preso in considerazione per la realizzazione del sistema è stato quello di mettere una barriera frangi fiamma in prossimità della testa della torcia. Il suo scopo primario è quello di interrompere per la fiamma creando un salto di pressione considerevole. Tipicamente lo si realizza con sistemi a campana rovescia. In alternativa vengono inserite in prossimità della zona di ancoraggio della fiamma, delle griglie metalliche a maglie relativamente fitte così da avere un effetto di perdita di carico ed ridurre il rischio di percorrenza della fiamma lungo il condotto di adduzione del flare gas. Questa seconda soluzione risulta tuttavia nettamente meno performante della precedente. Avendo stimato il volume della colonna flare gas in condizioni di regime e lo spessore dei tubi della condotta verticale, si è valutato che la presenza delle elettrovalvole/spurghi di sicurezza, il Waterseal (Figura 19) e l'utilizzo della tecnica di purging (pulizia dei condotti di adduzione con gas inerti) fosse sufficiente per garantire il funzionamento in sicurezza dell'impianto.

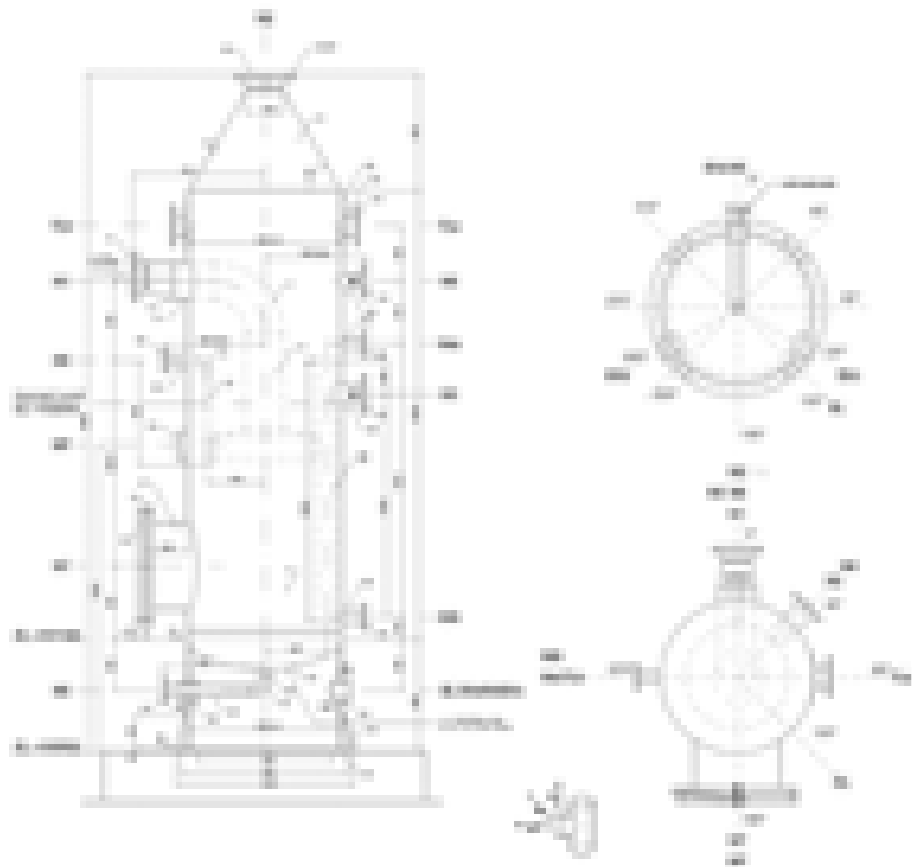


Figura 19: Waterseal per torce di emergenza in attività

Lo schema riportato in Figura 20 presenta alcune viste della struttura realizzate in fase di progettazione del sistema.

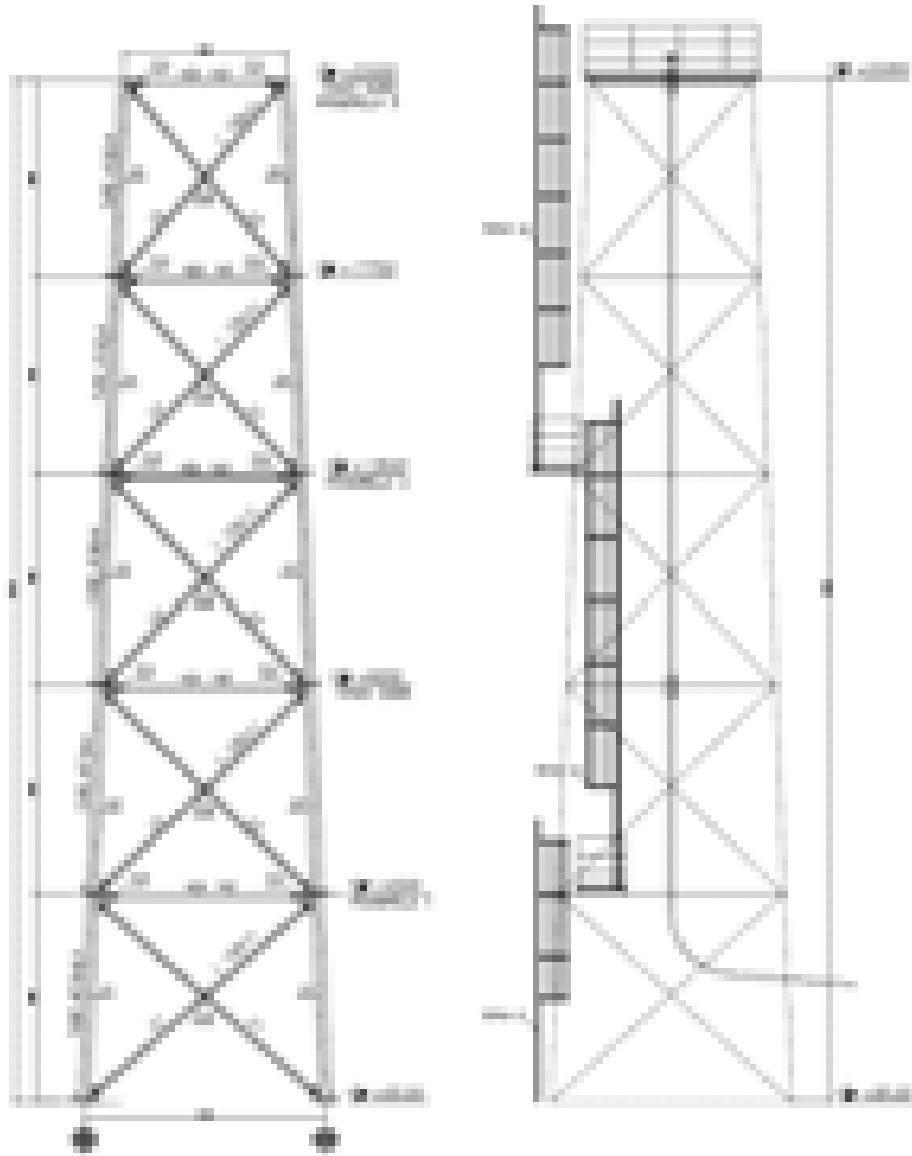


Figura 20: Viste della torcia in scala 1:1

La struttura – concepita come un tronco di piramide a base quadrata - presenta un'alzata di 22 m, con una sezione a terra di forma quadrata con lato 5,2 m. Le passerelle di supporto sono state disposte rispettivamente a 4,5 – 13,5 e 22m di altezza da terra. La sezione terminale si presenta come un quadrato di lato 3,5m munito di balaustra di sicurezza (1m) e pavimento grigliato con apertura centrale per l'arrivo della tubazione di adduzione flare gas. La progettazione degli elementi strutturali è stata effettuata attenendosi alle normative di riferimento e dimensionando la struttura sia a carichi concentrati che a carichi esterni come le

sollecitazioni dovute a fattori atmosferici. Il tubo di adduzione del tail gas sulla sommità del Derrick presenta un diametro di 2” – pienamente concordante con quello realizzato per la camera di test. Tale realizzazione permette di fare prove del fenomeno in studio pienamente comparabili tra di loro. Nella progettazione sono stati utilizzati software specifici per il disegno meccanico quali Autocad al fine di realizzare le messe in tavola da officina. La Figura 21 illustra alcune delle tavole realizzate durante lo svolgimento del progetto.

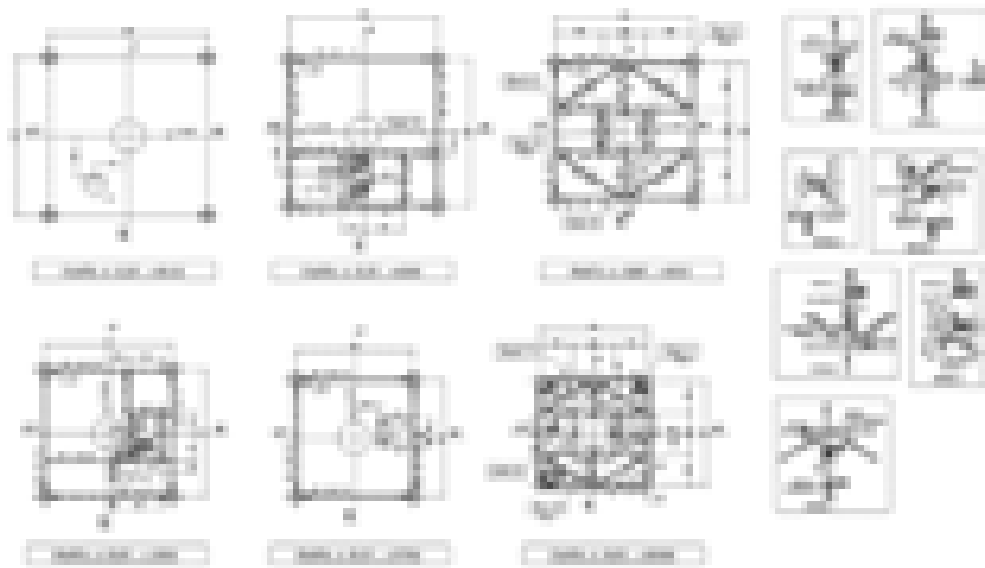


Figura 21: sezioni delle diverse quote del Derrick

La definizione del layout delle linee di adduzione dei gas tecnici ha richiesto particolare attenzione per motivi di natura differente; in primis è stato necessario disporre razionalmente tutte le tubazioni in maniera da minimizzare e raccogliere le zone nelle quali si ha passaggio di gas tecnici. Inoltre è stato indispensabile allestire anche una zona di stoccaggio di dimensioni considerevoli per il gas inerte utilizzato nelle fasi di pulizia e spurgo della sezione verticale di tubo nel quale passa il tail gas. Infatti, le principali criticità in termini di sicurezza che sono emerse dalla realizzazione della torcia, sono state strettamente legate alla sezione verticale del condotto di adduzione del metano. Dovendo portare a 20 m dal suolo una colonna di gas in pressione, come emerso da quanto presente in letteratura scientifica analizzata durante le fasi precedenti del progetto, si possono instaurare fenomeni di ritorno di fiamma nelle fasi transitorie (accensione e spegnimento) che tendenzialmente provocano la detonazione e la relativa esplosione del condotto. Nelle attività di

pianificazione è stato quindi individuare un metodo e i corrispondenti elementi strutturali da realizzare per ottenere le piene funzionalità del banco senza incorrere in problemi di sicurezza.

In Figura 21 sono riportate alcune foto che mostrano la struttura del banco per le prove di resistenza agli agenti atmosferici.



Figura 22: Foto dell'impianto e particolare dal basso del Derrick

A differenza di quanto realizzato nel test rig a terra, utilizzandolo fondamentalmente per testare l'ancoraggio, la stabilità e la rumorosità della fiamma, sul derrick non sono state portate le linee per alterare le condizioni di combustione – come l'immissione degli inerti, del vapore o del gasolio. Per tale motivo le linee realizzate per l'installazione del sistema sono state le seguenti:

- Linea primaria tail Gas (composizione mista metano e GPL)
- Linea CO₂ per le fasi di pulizia del banco (purging)
- Linea di metano per l'innesco del pilota
- Linee elettriche per l'innesco della scintilla del pilota, per l'apertura/chiusura delle valvole di sicurezza e infine i cablaggi per il sistema di visione remota con telecamera.

Come già precedentemente discusso, avendo optato per la soluzione con un canale di uscita con diametro da 2", è stato possibile riutilizzare la strumentazione già allestita sullo Skid di controllo della camera di test, così da sfruttare perlopiù anche la sensoristica già installata per il banco prova in scala.

Apportando quindi solo qualche lieve modifica alle linee del banco prova a terra – inserendo fondamentalmente delle linee di bypass munite di elettrovalvola di sicurezza (Figura 23) – è possibile far passare lo skid dalla modalità di controllo del test rig a quella di controllo del Derrick.



Figura 23: Linee di bypass per l'adduzione del tail gas alla torre

In questo modo anche i sistemi di stoccaggio sono stati unificati, permettendo una razionalizzazione degli spazi e un miglior controllo del sistema.

Per superare le criticità legate alla sicurezza sopra indicate, si è utilizzato sia sistemi attivi che passivi: tra i primi si fa riferimento alla tecnica di purging – o lavaggio – tipicamente utilizzata nel settore delle turbine a gas, mentre per quelli passivi si è riutilizzato il Waterseal come barriera frangifiamma.

La tecnica del purging, consiste fondamentalmente nell'immissione di un gas inerte all'interno di condotti nei quali deve transitare un gas tecnico innescabile. Questo sistema permette un lavaggio di tutte le sezioni – comprese possibili intercapedini nelle quale potrebbero formarsi degli accumuli non soggetti a deflusso – così da evitare nelle fasi transitorie come quelle di accensione e spegnimento, fenomeni di detonazione locale con corrispettivo aumento di pressione e detonazione della struttura.

Fornendo il banco di un adeguato sistema di stoccaggi della CO₂, è stato messo a punto un sistema di sfiati e per permettere una completa pulizia del Derrick,

limitando entro i margini di sicurezza la possibilità che insorgano eventi potenzialmente pericolosi. Per ogni accensione del sistema, prima dell'immissione del tail gas nelle linee, e analogamente durante la sua progressiva riduzione di portata in fase di spegnimento, viene fatto un lavaggio completo delle linee riempiendole e mantenendo il flusso costante per almeno qualche minuto con CO₂. Il lavaggio pre accensione risulta un'operazione piuttosto semplice, particolare attenzione va invece posta nella fase di spegnimento della fiamma. Infatti durante tale attività, la riduzione di portata del taiga va controbilanciata con il progressivo aumento della CO₂ inserita, così da mantenere sulla sezione di uscita della torcia una portata globalmente costante e garantire che non ci siano immissioni di ossigeno verso l'interno della sezione di ancoraggio della fiamma. E' proprio tale fenomeno infatti, che genera gli effetti di detonazione interna al condotto. Considerando le soluzioni che tipicamente vengono impiegate per questo tipo di tecnologie, si è opportunamente riadattato il sistema di guardia idraulica (Waterseal) – peraltro già dimensionato per la camera di test a terra e meglio descritto nei paragrafi successivi, così da avere un secondo sistema passivo di sicurezza. In Figura 24 sono riportate alcune viste dei disegni esecutivi da officina sviluppati durante il presente progetto e utilizzati per la realizzazione del medesimo:

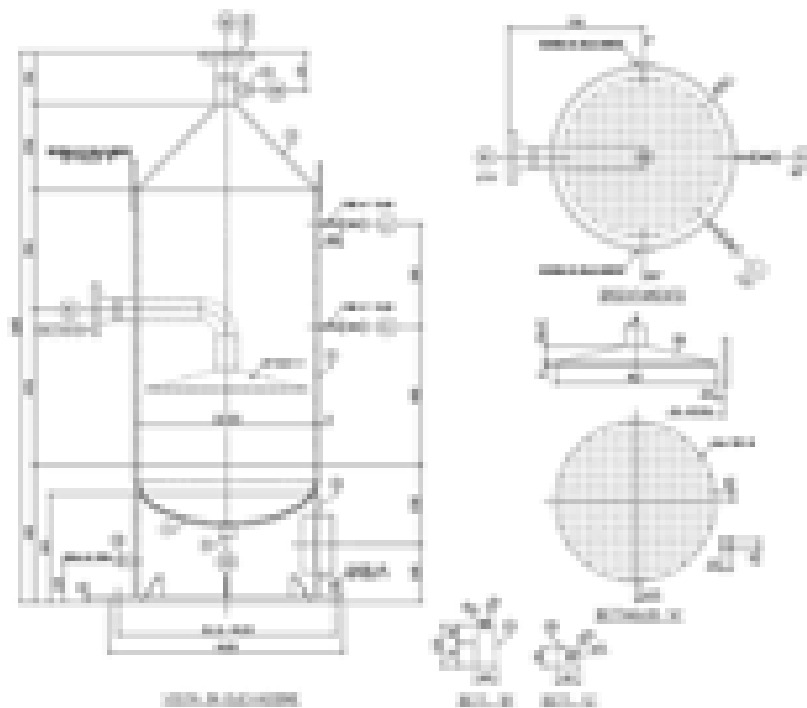


Figura 24: Schema finale del Waterseal

Il Waterseal è stato opportunamente dimensionato in modo tale da sostenere le pressioni di esercizio di entrambe le parti che compongono l'area di test.

Le derivazioni delle linee provenienti dallo skid, sono state quindi effettuate a valle del Waterseal. Due valvole a tre vie permettono il passaggio dalla modalità test rig (banco a terra) a quella di funzionamento della torcia in scala 1:1. Lo stoccaggio di CO₂ è stato posizionato in prossimità del Waterseal (come visibile nella Figura 23). L'intera fase purging è stata volutamente affidata a operazioni manuali da effettuare sull'impianto, in maniera da non avere problemi legati a sistemi di controllo puramente elettronici remoti.

Sulla sommità della torcia, è stata montata una piastra per l'ancoraggio delle teste intercambiabili. Intorno alla zona è stata inserita una paratia forata per ridurre gli effetti prodotti dal vento in quota. Inoltre tramite l'inserimento di una telecamera di controllo, il cui terminale video è stato alloggiato all'interno del locale tecnico, è possibile osservare da vicino la fiamma e il suo ancoraggio alla testa della torcia.



Figura 25: Sistema frangivento e gruppo di ancoraggio testa torcia

Sulla sommità della struttura è stata posizionata anche una luce di segnalazione. In fase di dislocamento dei dispositivi di test, sono state fatte alcune valutazioni legate all'irraggiamento prodotto dal sistema sulle strutture circostanti. Utilizzando il codice di calcolo Flare Sim™ appositamente acquistato nel corso del progetto da GAM Oil&Gas, si è valutato che la posizione scelta per la posa del basamento garantisce sulle strutture adiacenti un carico termico irraggiato del tutto accettabile rispetto a quello disposto da

normativa e da buona pratica realizzativa – considerando ovviamente la massima portata di combustibile e quindi il massimo fronte di fiamma. Il posizionamento della torcia ha così solamente richiesto alcune modifiche legate alle infrastrutture di servizi adiacenti alla zona, come l'interramento da parte dei gestori della rete elettrica di alcune linee della media tensione.



Figura 26: Vista dell'impianto realizzato

La caratteristica di questa prima idea di torcia è data dalla sezione di uscita sulla testa. Questa, infatti, presenta un diametro nominale di 8" (208 mm) con la sezione di uscita che termina senza inviti né fori di ancoraggio fiamma, in atmosfera. Tale sistema però ha mostrato alcuni limiti emersi dall'analisi effettuata con strumenti di calcolo messi a punto. Avendo infatti una sezione di uscita così ampia, volendo mantenere le velocità di esercizio valutate per il sistema in studio all'interno della camera di prova a terra, il fronte di fiamma che si ottiene risulta dai calcoli zero dimensionali con un'estensione indicativa di circa 14 m. L'irraggiamento prodotto a terra da tale fenomeno di combustione è considerevole e quindi avrebbe generato problemi per le infrastrutture circostanti. Inoltre tale configurazione, essendo studiata per reali condizioni di funzionamento su processi produttivi, richiede intrinsecamente grossi quantitativi di gas da bruciare, spingendo lo stoccaggio e il consumo di combustibile necessario per effettuare le prove sperimentali a quantitativi cospicui.

Alla luce delle considerazioni di cui sopra, si è optato per riprodurre il fenomeno scalato all'interno del banco prova anche in quota, studiando così gli effetti di ancoraggio della fiamma rispetto alle perturbazioni prodotte dagli agenti atmosferici. In questo modo, si ha comunque la sicurezza che la geometria realizzativa delle teste sia tale da garantire il giusto miscelato aria e combustibile, in quanto anche scalando il fenomeno i rapporti tra le grandezze fondamentali rimangono invariati. Per evitare le problematiche strettamente connesse ai consumi difficilmente sostenibili in termini di stoccaggio e di durata della prova, oltre che all'irraggiamento prodotto a terra, si è deciso così di adottare, mantenendo la configurazione di cui discusso sopra, un canale di adduzione verticale da 2" (50,8 mm). Le teste su di esso posizionate sono una corrispettiva scalatura geometrica dei sistemi. Nelle immagini sottostanti (Figura 27) sono riportati alcuni istanti della torcia durante un'accensione di test che sarà poi ampiamente commentata nel capitolo 3.



Figura 27: Fasi di attività sperimentale durante la prima accensione del Derrick

2.8 *DEFINIZIONE DEI RANGE DI FUNZIONAMENTO DEL BANCO E DIMENSIONAMENTO IMPIANTISTICO DELLE CONDOTTE*

Una volta definite tutte le caratteristiche geometriche e strutturali del banco, è stato necessario fissare i campi di operatività dei vari componenti che ne permettono il funzionamento. Dall'analisi dei dati valutati con i sistemi di simulazione computazionale precedentemente descritti, è stato quindi possibile definire operativamente sia i range di portata dei gas e delle sostanze che partecipano alla realizzazione del tail gas usato nella sperimentazione delle teste, che conseguentemente i diametri delle relative linee di adduzione.

Il dimensionamento ottenuto dai sistemi di progettazione computazionale ha portato quindi a sviluppare un sistema che rispondesse ai seguenti requisiti:

- Diametro torcia: 70.0 mm
- Velocità Gas: 5 - 10.0 m/s
- Velocità aria: 0.5 - 1.0 m/s
- Temperatura media gas di scarico: 500 °K

Per ottenere una prima stima delle condizioni di simulazione, sono stati quindi ipotizzati dei casi di analisi testabili:

- Condizione di riferimento: con 49.5% di propano C₃H₈ e 50.5% di Metano CH₄
- Tutto Metano
- Tutto Propano
- Low BTU: 25% metano e 75% inerti (importante per stimare la massa di inerti da stoccare)

I valori attesi dai quattro casi di studio sopra indicati, con riferimento a quanto ottenuto dalle correlazioni numeriche è quanto riportato di seguito :

1) Miscela di riferimento

- Temperatura media di uscita 600 K°
- Lunghezza fiamma: 3.70 m
- Portata combustibile: 35. g/s
- Per una prova di 10 min si ha:
 $35.\text{g/s} \cdot 60 \text{ s/min} \cdot 10.\text{min/prova} = 35.\text{g/s} \cdot 600.\text{s/prova} = 21000 \text{ g} = 21 \text{ kg}$

2) *Metano*

- Temperatura media di uscita 500 K°
- Lunghezza fiamma: 2.60 m
- Portata combustibile: 24. g/s
- Per una prova di 10 min si ha:
- $24 \text{ g/s} * 60 \text{ s/min} * 10 \text{ min/prova} = 24 \text{ g/s} * 600 \text{ s/prova} = 14400 \text{ g} = 14.4 \text{ kg}$

3) *Propano*

Nel caso di solo propano si otterrebbe una fiamma lunga circa 8 metri pertanto si deve valutare l'ipotesi di diminuire la velocità di uscita

4) *Miscela Low-BTU*

Nel caso di Miscela Low BTU (12505.63 kJ/kg) 25% metano, 75% azoto in massa:

- Temperatura media di uscita 400 K°
- Lunghezza fiamma: 2.25 m
- Portata combustibile: 37 g/s
- Per una prova di 10 min si ha:
- $37 \text{ g/s} * 60 \text{ s/min} * 10 \text{ min/prova} = 37 \text{ g/s} * 600 \text{ s/prova} = 22200 \text{ g} = 22.2 \text{ kg}$

Alla luce di quanto sopra, sono emerse le seguenti considerazioni:

- In termini di consumo specifico la condizione più sfavorevole è quella con fiamma alimentata esclusivamente utilizzando metano. In questa situazione un serbatoio da 200 kg effettivi può bastare per 13 prove.
- Per il consumo di propano la condizione più sfavorevole è quella in cui la fiamma è alimentata con miscela di riferimento (avendo ovviamente escluso prove con solo propano). In questa situazione un serbatoio da 200 kg effettivi può bastare per 19 prove.
- Per il consumo di azoto la condizione più sfavorevole è quella in cui la fiamma è alimentata con miscela Low BTU. In questa situazione un serbatoio da 200 kg effettivi può bastare per 12 prove.
- E' importante definire la massa da stoccare nei casi limite;

Alla luce delle valutazioni legate alle prove sperimentali, e conseguentemente alle capacità della camera di test progettata, è stata proposta una prima

definizione delle linee impiantistiche necessarie al suo funzionamento. Queste sono riassumibili in tre sottogruppi di utilizzo.

Linee di adduzione del combustibile

- [1] Metano
- [2] Propano
- [3] Flare gas
- [4] Piloti

Linee per la generazione della turbolenza

- [1] Acqua
- [2] Vapore
- [3] Aria compressa

Immissione di agenti sporcanti per lo studio del fenomeno di combustione

- [1] Gasolio
- [2] Inerte N₂
- [3] Inerte CO₂
- [4] Linea ausiliaria per prove con campioni di gas fornito da terzi

Sono state quindi valutate tutte le portate in condizioni Normali (1 bar – 25°C) dalle quali è stato possibile dimensionare le dimensioni delle tubature delle linee.

Metano primario

Pressioni							
7	6	5	4	3	2	1	bar
16.5	19.2	23.1	28.9	38.5	57.7	115.5	m ³ /h Max
6.46	7.53	9.04	11.30	15.06	22.59	45.19	m ³ /h Min

Propano

Pressioni							
7	6	5	4	3	2	1	bar
5.9	6.9	8.3	10.3	13.8	20.6	41.3	m ³ /h Max
2.31	2.69	3.23	4.04	5.39	8.08	16.16	m ³ /h Min

CO₂

Pressioni							
7	6	5	4	3	2	1	bar
0.3	0.3	0.4	0.5	0.7	1.0	2.1	m ³ /h Max
0.12	0.14	0.16	0.20	0.27	0.41	0.82	m ³ /h Min

N₂

Pressioni							
7	6	5	4	3	2	1	bar
0.3	0.3	0.4	0.5	0.7	1.0	2.1	m ³ /h Max
0.19	0.22	0.26	0.32	0.43	0.65	1.30	m ³ /h Min

Tabella 3: valutazione delle portate degli aeriformi a differenti livelli di pressione

In questa fase è stata affrontata direttamente e per la prima volta nel progetto, la definizione degli ugelli per le linee pilota. Infatti la portata necessaria sia sui piloti, che sulle bocche di inserimento dei gas ausiliari, condiziona pesantemente le geometrie da realizzare per la costruzione del modello scalato della torcia (Tabella 4).

Condizioni NORMALI

Metano				0.717 kg/m³		velocità (m/s)	
							10
kg/s	m³/s	m³/h	l/m in			Area (mm²)	
0.023	0.032078103	115.4812	1925	MAX		3208	
0.016	0.022315202	80.33473	1339			Diametro (mm)	
0.009	0.012552301	45.18828	753	MIN		64	

Propano				2.005 kg/m³		velocità (m/s)	
							10
kg/s	m³/s	m³/h	l/m in			Area (mm²)	
0.023	0.011471322	41.29676	688	MAX		1147	
0.016	0.00798005	28.72818	479			Diametro (mm)	
0.009	0.004488778	16.1596	269	MIN		38	

CO₂				1.977 kg/m³		velocità (m/s)	
							10
kg/s	m³/s	m³/h	l/m in			Area (mm²)	
0.00115	0.000573566	2.064838	34	MAX		58	
0.0008	0.000404654	1.456753	24			Diametro (mm)	
0.00045	0.000227618	0.819423	14	MIN		9	

N₂				1.25 kg/m³		velocità (m/s)	
							10
kg/s	m³/s	m³/h	l/m in			Area (mm²)	
0.00115	0.000573566	2.064838	34	MAX		92	
0.0008	0.00064	2.304	38			Diametro (mm)	
0.00045	0.00036	1.296	22	MIN		11	

Tabella 4: Valutazione di massima delle portate di aeriformi da immettere nella camera

Definite le portate per ciascuna linea, si è quindi potuto scegliere nella maniera più opportuna, trovando il giusto compromesso tra disponibilità commerciali e richieste imposte dal sistema, il dimensionamento delle tubazioni.

La Tabella 5 la Tabella 6 riassumono quindi tutte le grandezze caratteristiche del sistema e ne definisce i range di funzionamento, formulando così il primo layout impiantistico del banco prova per il test di torce industriali.

	Pressione (bar)	Temperatura (°C)	Portata (kg/s)	Portata (Nm ³ /h)	Portata (l/m)	Dim. linea
Linea metano (CH₄) – Flare gas	200 – 1.01	10 - 35	0.009 - 0.023	40 - 120	753 - 1925	2”
Linea propano (C₃H₈)	50 – 1.01	10 - 35	0.009 - 0.023	10-50	269 - 688	2”
Linea metano (CH₄) – Pilot	200 – 1.01	10 - 35	10% CH ₄ Flare gas	4-12	75 - 192	2”
Linea Gasolio	Nebulizzazione	Ambiente	Nebulizzazione	---	---	1/4”
Linea Aria compressa	2 – 1.01	Ambiente	5% – 10% aria stechiometrica	---	---	1/4”
Linea Vapore	1.3	106 - 108	Nebulizzazione	---	---	1/4”
Linea CO₂	Stoccaggio	10 - 35	0.00045-0.001 5% CH ₄ Flare gas	0.81 – 2	14 – 35	1/4”
Linea N₂	Stoccaggio	10 - 35	0.00045-0.001 5% CH ₄ Flare gas	0.81 – 2	22 - 55	1/4”
Linea H₂O	Stoccaggio	10 - 35	10% CH ₄ Flare gas	---	0.1 - 1.5	---
Linea ausiliaria	Stoccaggio	10 - 35	0.009 -0.023	40-120	753 - 1925	2”
Parete interna	---	575 - 580	---	---	---	---
Parete esterna	---	55 - 60	---	---	---	---
Fiamma	---	≈ 1700	---	---	---	---
Aria	Ambiente	Ambiente	230- 280	8 Nm ³ /s	195 3250	---

Tabella 5: caratteristiche tecniche delle linee di adduzione

	Range Pressione (bar)	Range di portata (kg/s)	Range di portata (m ³ /h)
Linea metano (CH₄) - FlareGas	200 – 1.01	(max) 0.023 -0.009 (min)	40-120 (DN 65 mm)
Linea propano (C₃H₈)	50 – 1.01	(max) 0.023 -0.009 (min)	10-50 (DN 40 mm)
Linea metano (CH₄) – Pilot	200 – 1.01	10% CH ₄ Flare gas	40-120 (DN 65 mm)
Linea Gasolio	Nebulizzazione	Nebulizzazione	---
Linea Aria compressa	2 – 1.01	0.05 – 10% aria stechiometrica	---
Linea Vapore	1.3	0.001	---
Linea CO₂	stoccaggio	5% CH ₄ Flare gas	0.01-3 (DN 10 mm)
Linea N₂	Stoccaggio	5% CH ₄ Flare gas	0.11-3 (DN 12 mm)
Linea ausiliaria	Stoccaggio	(max) 0.023 -0.009 (min)	40-120 (DN 65 mm)
Linea Aria/fumi	Ambiente	230- 280	8 m ³ /s 195 m ³ /h

Tabella 6: Definizione delle portate nominali e diametri idraulici delle condotte

Nella definizione delle linee di collegamento ai serbatoi si è stabilito di installare necessariamente come apparati di sicurezza e regolazione i seguenti componenti: un riduttore di pressione, valvole di sicurezza pneumatiche normalmente aperte con intervento rapido e regolatori di portata.

E' stato perlopiù anche considerato che il combustibile debba essere preriscaldato riportandolo alla temperatura ambiente prima di immetterlo nel canale di miscelamento; infatti dopo la laminazione la temperatura diminuisce e quindi deve essere ripristinata alle condizioni ambientali per evitare rischi di congelamento lungo le zone di riduzione (soprattutto nel periodo invernale).

Gli elementi fondamentali da inserire lungo le linee per ottenere tutti gli effetti utili che si desidera studiare sul sistema sono quindi i seguenti:

- un sistema di raccordo delle linee sulla testa della torcia;
- una camera di miscelamento per la generazione della miscela da testare;
- un gorgogliatore in bagno d'acqua per evitare rischi di detonazione dati dalla risalita della fiamma lungo i condotti;
- una sezione di riscaldamento del gas per portarlo a temperature scalate ma confrontabili a quelle operative; per fare ciò la soluzione ritenuta più opportuna prevede un tubo alettato inserito all'interno di un mantello nel quale è presente acqua calda controllata con un termostato (Riscaldatore ad acqua).

Le caratteristiche geometriche dichiarate nella tabella precedente e sulle quali sono state definitivamente stabilite le caratteristiche impiantistiche e l'allestimento delle linee sono le seguenti:

\emptyset pol \emptyset	DN mm	\emptyset est. mm
1/2"	15	21,3
3/4"	20	26,9
1"	25	33,7
1" 1/4	32	42,4
1" 1/2	40	48,3
2"	50	60,3
2" 1/2	60-65	76,1
3"	80	88,9

Tabella 7: Tabella di conversione in mm e pollici, dei diametri nominali (DN)

La Tabella 7 è di riferimento, per completezza alla trattazione, nella valutazione impiantistica delle condotte idrauliche per l'adduzione di gas al sistema.

E' stato così necessario definire il set in condizioni di design delle grandezze numeriche sulle quali si è poi dimensionato l'intero sistema; alle portate nominali delle sostanze partecipanti alla combustione, sono state quindi affiancate le temperature di funzionamento previste per il sistema e la portata dell'aria di aspirazione.

La testa della torcia vede così un flusso composto da diversi fluidi che cooperano per generare complessivamente sia l'effetto di sporcamento che di turbolenza, in modo da vedere come risponde il sistema in differenti condizioni di funzionamento. Per portare ciascuno di questi alla torcia, è stato necessario allestire un'apposita linea di adduzione adeguatamente strumentata con tutta la strumentazione di controllo necessaria.

2.9 RIEPILOGO DELLE CARATTERISTICHE FUNZIONALI DEL AREA DI TEST

Il banco di studio si presenta quindi come un complesso composto da tre strutture: la camera di estensione e contenimento della fiamma, lo skid per l'allacciamento dei combustibili, il posizionamento dei sensori e l'alloggiamento dei sistemi di sicurezza.

La prima struttura da realizzare è quindi un banco prova (test rig) per l'ottimizzazione delle teste delle torce industriali. Il sistema prevede un corpo centrale al cui interno si svilupperà la fiamma. Sulla base della struttura verrà allestito il sistema di montaggio delle teste con l'innesto diretto dei canali di adduzione del gas per le fiamme pilota e del vapore per promuovere il miscelamento. In Tabella 8 sono riportate sinteticamente le caratteristiche strutturali, funzionali e impiantistiche che ne descrivono le peculiarità.

Parallelamente è stato quindi previsto l'allestimento di una torre da 22 m per testare gli effetti dell'efflusso di gas ad alta velocità (*emergency flare*) e per validare sui prototipi di testa messi a punto col banco scalato, l'ancoraggio della fiamma e la resistenza ad agenti atmosferici. Analogamente a quanto fatto per il banco scalato, in Tabella 9 sono riportate sinteticamente le caratteristiche strutturali, funzionali e impiantistiche che ne descrivono le caratteristiche.

Il sistema di che permette la regolazione e il controllo di entrambe le camere è un banco di raccordo impiantistico, che raggruppa tutti i sensori e i punti di attuazione in maniera da poter gestire in maniera funzionale le strutture. Nei paragrafi successivi verrà affrontato nel dettaglio la realizzazione di tale elemento.

Banco prova	<ul style="list-style-type: none"> - Banco prova per torce industriale in scala 1:5 circa - Galleria in aspirazione forzata - Velocità di efflusso del gas prevista 1 – 10 m/s - Sistema per aggancio/sgancio con filettatura testa torce per prove con sistemi di fiamma differenti
Sistema di coibentazione & Raffreddamento	<ul style="list-style-type: none"> - Camiciatura esterna con materiale refrattario - Batteria di raffreddamento anteposta al sistema di aspirazione
Sistemi Ausiliari	<ul style="list-style-type: none"> - Sistema di pompaggio per adduzione del Purge Gas - Sistema di pompaggio per adduzione del CH₄ per alimentazione fiamme pilota - Camera di calma per miscelamento del metano con propano, butano e inerti Batteria di preriscaldamento del Purge Gas e del CH₄ - Sistema di immissione cherosene nebulizzato per sporcamento della fiamma - Generatore di vapore istantaneo (tipo uso ospedaliero) - Valvole di sicurezza per alimentazione (Rampa metano uso caldaie) - Finestra per accesso ottico (Pirex, vetro termico) - Griglia traforata sul basamento - Motore elettrico per aspirazione forzata - Saracinesche per blocco di funzionamento - Canale di aspirazione dei fumi per misure concentrazione inquinanti - Cappa convergente per permettere lo sfiato della camera e evitare accumulo incombusti
Strutture	<ul style="list-style-type: none"> - Piazzale per allestimento Banco prova – basamento livellato e drenato in cemento - Strutture antidetonazione secondo normativa vigente per stoccaggio dei gas
Misure	<ul style="list-style-type: none"> - Rilevamento temperatura di fiamma - Rilevamento portata di Purge Gas - Rilevamento portata di CH₄ per fiamme pilota - Rilevamento velocità del vento - Rilevamento concentrazione degli inquinanti (CO, CO₂,NO,incombusti)
Strumenti	<ul style="list-style-type: none"> - Sistema ottico per il rilevamento della temperatura - Termocamera (IR) - Sistema per monitoraggio continuo della fiamma - Sistema per le misure di irraggiamento Sonde per il prelievo e il campionamento dei gas (analisi concentrazioni specie inquinanti)

Tabella 8: Definizione sintetica delle peculiarità del banco per torce scalate

Torcia	<ul style="list-style-type: none">- Torcia industriale in scala 1:1- Velocità di efflusso del gas prevista 5 – 25 m/s
Sistema di coibentazione	<ul style="list-style-type: none">- Schermo protettivo a terra per ridurre l'irraggiamento prodotto dalla fiamma
Ausiliari	<ul style="list-style-type: none">- Sistema di pompaggio per adduzione del Purge Gas- Sistema di pompaggio per adduzione del Ch4 per alimentazione fiamme pilota- Camera di calma per miscelamento del metano con propano, butano e inerti- Batteria di preriscaldamento del Purge Gas- Generatore di vapore istantaneo (tipo uso ospedaliero)- Sonda telescopica per analisi delle concentrazioni degli inquinanti- Canale ceramico per estrazione dei gas in quota
Strutture	<ul style="list-style-type: none">- Piazzale per allestimento torcia – basamento livellato e drenato in cemento- Rete di sicurezza per circoscrivere l'area non accessibile durante il funzionamento delle torcia- Strutture antidetonazione secondo normativa vigente per stoccaggio dei gas- Struttura coibentata per alloggiamento strumentazione di misura e rilevamento durante il funzionamento della torcia
Misure	<ul style="list-style-type: none">- Rilevamento temperatura di fiamma- Rilevamento portata di Purge Gas- Rilevamento portata di CH4 per fiamme pilota- Rilevamento velocità del vento- Misure di irraggiamento al suolo
Strumenti	<ul style="list-style-type: none">- Sistema ottico per il rilevamento della temperatura- Termocamera (IR)- Sistema per monitoraggio continuo della fiamma- Sistema per le misure di irraggiamento al suolo- Sonde per il prelievo e il campionamento dei gas (analisi concentrazioni specie inquinanti)
Accorgimenti tecnici	<ul style="list-style-type: none">- Studio tecnico di progettazione per la realizzazione a norma delle opere civili (basamento, perimetro, strutture stoccaggio, accessi)- Studio tecnico di progettazione per la realizzazione a norma dei sistemi ausiliari (allacciamento con metanodotto, impiantistica linea gas, allacciamento con acquedotto per iniezione vapore)- Richiesta concessioni per installazione sistema di fiamma

Tabella 9: Definizione sintetica delle peculiarità del sistema di fiamma in scala 1:1

2.10 DEFINIZIONE DELLE LINEE IMPIANTISTICHE E DELLA STRUMENTAZIONE

2.10.1 INTRODUZIONE

Il seguente paragrafo fornisce una prima valutazione della strumentazione necessaria per poter esercire in condizioni efficienti il banco prova per lo studio delle torce industriali.

Questa fase del lavoro ha previsto quindi lo studio e la messa a punto dei P&ID relativo ai sistemi di acquisizione dati dell'impianto, definendo tutte le linee necessarie al funzionamento del sistema e tutti gli ausiliari legati a questo. Si possono individuare quattro sottosistemi:

- Linea di adduzione del combustibile alla camera di combustione.
- Linea di adduzione di gas sporcanti alla camera di combustione.
- Linea dei sistemi ausiliari per i promotori di turbolenza e per l'iniezione dei liquidi sporcanti.
- Linea di acquisizione delle concentrazioni degli inquinanti.

Sono stati quindi individuati tutti i componenti meccanici per il funzionamento delle linee sopracitate (pompe, generatori di vapore, ..), i sensori necessari per avere una stima e un controllo delle grandezze fisiche da analizzare all'interno della camera e i componenti elettronici (schede di acquisizione, pc,..) adeguati per poterle acquisire. La scelta dei componenti si è basata per buona parte sulle considerazioni tecniche e sull'esperienza impiantistica messa a disposizione dai tecnici di GAM Oil&Gas; a questa si sono aggiunti i valori numerici ottenuti dai calcoli CFD (Computational Fluid Dynamics) effettuati presso il Dipartimento di Energetica della facoltà di Ingegneria di Firenze.

Le linee e i P&ID riportati in seguito, rappresentano un layout dettagliato della configurazione finale del banco realizzato presso gli stabilimenti di Rombolo della GAM Oil&Gas. Dovendo provvedere all'allestimento fisico delle linee, durante questa fase del lavoro sono stati contattati diversi fornitori per ciascuno dei componenti presentati, così da poter valutare la soluzione ottimale sia in termini di componentistica che di costi di realizzazione.

Il paragrafo seguente presenta una lista dettagliata della struttura delle linee valutate indispensabili per il pieno funzionamento del banco; questa prima formulazione ha permesso la definizione dei P&ID complessivo dell'impianto

Le linee di adduzione dei gas coinvolti nella combustione da testare col banco, sono raggruppabili fondamentalmente in 4 categorie:

- Linee primarie
- Linee Ausiliarie
- Sensori per acquisizione dati nella camera
- Sistemi di sicurezza

Ciascuno di questi raggruppamenti è a sua volta composto di più elementi funzionali che determinano la sua utilità primaria di funzionamento sul sistema.

2.10.2 LINEE PRIMARIE

LINEA GAS METANO (FLARE GAS)

La linea per il flare gas sarà costituita da una miscela di propano e metano che si formerà all'interno di una camera di miscelamento appositamente fornita di elettrovalvole di sicurezza. Si è pensato quindi di realizzare sulla linea una sezione di preriscaldamento del gas costituita da una vasca contenente acqua preriscaldata tramite una caldaia a metano e una serpentina al cui interno viene fatto passare il gas. Le misure da effettuare sulla linea, come direttamente riportato sul P&ID n°1, saranno di temperatura, pressione e portata.

LINEA GAS METANO (PILOTI)

Derivando dalla linea primaria del metano appositamente portata alla pressione di esercizio tramite un riduttore di pressione, si preleva una frazione del CH₄ all'alimentazione dei piloti della torcia. Le misure da effettuare sulla linea, come direttamente riportato sul P&ID n°1, saranno di temperatura, pressione e portata.

LINEA PROPANO (FLARE GAS)

La linea del propano serve a costituire, in compartecipazione con quella di metano, il flare gas coinvolto nella combustione; i due combustibili tecnici vengono quindi convogliati in una camera di miscelamento prima di raggiungere la sezione di preriscaldamento di cui sopra. Per le misure da effettuare sulla linea si rimanda direttamente ai P&ID allegati. Anche in questo caso le misure da effettuare sulla linea, come direttamente riportato sul P&ID n°1, saranno di temperatura, pressione e portata.

2.10.3 LINEE AUSILIARI

LINEA GASOLIO

La linea del gasolio è composta da un gruppo formato da serbatoio, elettropompa e ugello per immettere delle piccole quantità di gasolio nebulizzate direttamente sulla fiamma, così da “sporcare” la combustione del flare gas. Le misure da effettuare sulla linea sono direttamente riportate sul P&ID n°2.

LINEA ARIA COMPRESSA

La linea dell'aria è prelevata dal sistema pneumatico di rete per poi essere immessa direttamente sulla base della fiamma, così da promuovere un incremento della quantità di moto e migliorare le condizioni di stechiometria locale. Anche in questo caso, le misure da effettuare sulla linea sono direttamente riportate sul P&ID n°2.

LINEA ACQUA

La linea dell'acqua, valutata inizialmente con un prelievo dal sistema idrico, e solo in fase di realizzazione scelta invece con prelievo da un serbatoio, prevede per la movimentazione una pompa a bassa portata. Viene immessa direttamente sulla base della fiamma per promuovere un incremento della quantità di moto e migliorare le condizioni di stechiometria locale. Tale incremento nasce dalla

vaporizzazione dell'acqua che varia il suo volume grazie all'espansione. Per le misure da effettuare sulla linea si rimanda direttamente al P&ID n°2.

LINEA VAPORE

Questa linea è composta da un gruppo di generazione del vapore (tipicamente utilizzato per sistemi industriali di pulizia) con rivestimento in acciaio INOX e da un ugello a 45 ° che permette l'immissione diretta del vapore sulla base della fiamma. Il controllo elettronico del dispositivo, che dovrà essere comunque collocato in prossimità del banco per evitare perdite di carico eccessive lungo le tubazioni, dovrà prevedere la possibilità di remotamento degli attuatori elettronici. Anche questo sistema, come estrapolato da letteratura, serve a promuovere un incremento della quantità di moto e migliorare quindi le condizioni di stechiometria locale. Analogamente alle altre linee, per le misure da effettuare si rimanda direttamente ai P&ID riportati in seguito.

LINEA CO2

La linea della CO2 è composta da una bombola, un riduttore di pressione e le valvole di regolazione. Tale gas permette di sporcare la combustione del flare gas in modo da osservare le variazioni prodotte sulla miscela incendiata. Anche in questo caso le misure da effettuare sulla linea, come direttamente riportato sul P&ID n°3, saranno di temperatura, pressione e portata.

LINEA N2

La linea dell'azoto è composta da una bombola, un riduttore di pressione e le valvole di regolazione. Tale gas permette di sporcare la combustione del flare gas in modo da osservare le variazioni prodotte sulla miscela incendiata in termini di concentrazioni inquinanti. Anche Analogamente a quanto sopra, come direttamente riportato sul P&ID n°3, le misurazioni da effettuare sulla linea saranno di temperatura, pressione e portata.

LINEA AUSILIARIA PER GAS FORNITI DA TERZI

Viene lasciata una linea libera per eventuali stoccaggi forniti da terze parti. Tale linea è composta da una bombola, un riduttore di pressione e le valvole di regolazione. Tale gas permette di sporcare la combustione del flare gas in modo da osservare le variazioni in termini di concentrazioni inquinanti prodotte sulla miscela incendiata. Le misure da effettuare sulla linea sono le stesse che si è deciso di collocare sulla linea di adduzione primaria del metano e del propano.

2.11 DEFINIZIONE DEI P&ID

Per avere tutti gli elementi necessari alla piena progettazione impiantistica della camera, si è proceduto sviluppando dei P&ID per uniformare le fasi di definizione, generando così a livello di pianificazione e di utilizzo, un sistema facilmente analizzabile e controllabile con blocchi funzionanti autonomamente gli uni dagli altri. E' stata quindi impostata una suddivisione del banco in 4 zone funzionali: zona gas primari, zona ausiliari, stoccaggio gas sporcanti ed inerti, camera e sezione di aspirazione con acquisizione dati sugli inquinanti.

Ciascuno di questi è stato riprogettato opportunamente, definendoci sopra la lista e la posizione operativa di tutti i sensori e le sezioni di misura necessarie per il controllo e la regolazione del funzionamento della camera.

Di seguito sono riportati i singoli P&ID definiti per le linee sopra indicate; per una migliore leggibilità degli schemi impiantistici si rimanda agli allegati:



Figura 28: P&ID complessivo di supervisione del sistema

Lo schema complessivo della camera permette di individuare i macroblocchi nei quali il sistema si dirama, dividendo nettamente le sezioni di controllo da quelle di misura. Essendo un banco di studio da inserire in un contesto pienamente industriale, dovendone quindi facilitare le operazioni di gestione, il sistema è

stato progettato in maniera da poter essere agilmente riadattato alle richieste di eventuali clienti in fase di definizione di nuovi prototipo su commissione. Sono state disposte quindi linee ausiliarie per utilizzare direttamente forniture di tail gas rese disponibili da eventuali committenti di torce.

La visione complessiva dell'oggetto ha permesso di definire delle strategie di attivazione e spegnimento camera e le logiche di intervento in caso di malfunzionamento o di emergenza.

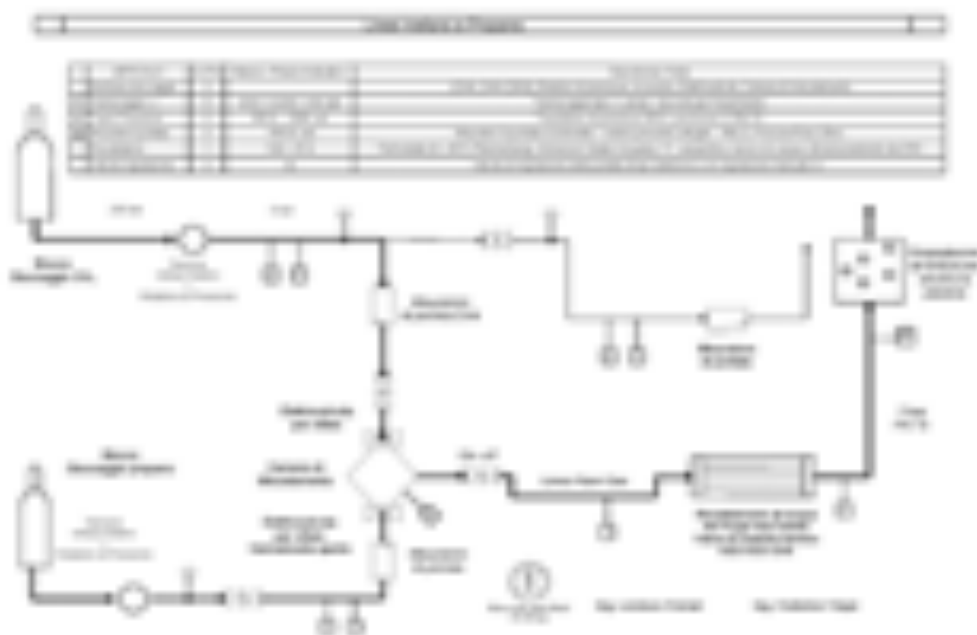


Figura 29: : P&ID n° 1 linea di adduzione del tail gas e linea alimentazione pilota

Il P&ID n°1 (Figura 29) viene mostrato il layout stabilito per le linee di adduzione dei gas combustibili per la generazione della fiamma; in particolare si fa riferimento al canale di adduzione del flare gas, composto da una miscela di metano e propano e a quello di alimentazione delle fiamme pilota necessarie per l'accensione del sistema. Tutte le linee in questione sono state munite di sensori di pressione e di temperatura; in particolare un sensore di pressione aggiuntivo è stato posizionato a valle della camera di miscelamento mentre due termocoppie aggiuntive permettono di monitorizzare le temperature di ingresso e di uscita del flare gas dalla sezione di riscaldamento prima di giungere al gorgogliatore. Le misure di portata verranno effettuate direttamente sulle linee metano e propano a monte della camera di miscelamento; allo stesso modo verrà fatto sulla linea dedicata ai piloti. La misura di portata sulla linea del flare gas è ricavata

direttamente per calcolo indiretto sommando i contributi delle due linee primaria .

Tutte le linee sono state munite di valvole di sicurezza e regolazione alimentate ad aria compressa; tramite queste sarà possibile settare la portata di gas agendo separatamente sulle quantità di ciascuno dei combustibili tecnici . Analogamente saranno presenti degli sfiati normalmente aperti alimentati ad aria compressa che dovranno intervenire in fase di spegnimento del banco ed eventualmente in caso di pericolo per lo svuotamento rapido delle condutture. In assenza di specifiche forniture di tail gas prelevato direttamente da impianti produttivi funzionanti, un apposito sistema di stoccaggio di metano sarà accoppiato al banco; il sistema dovrà provvedere direttamente ad effettuare la riduzione di pressione dal pacco bombole (60 bar) alla linee (6-7 bar).

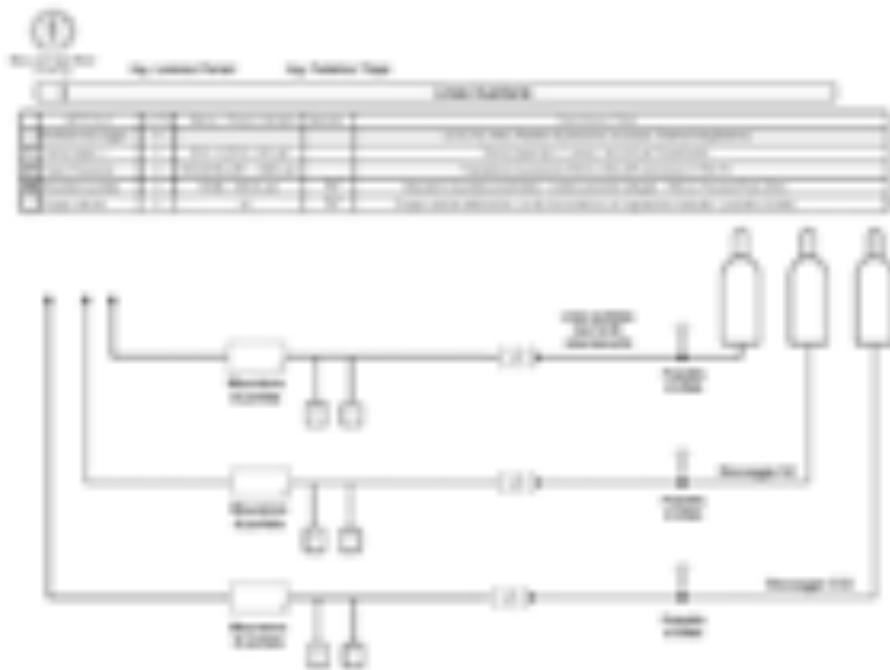


Figura 30: P&ID n°2 gruppo ausiliari e inerti

Le tre linee ausiliare di adduzione dei gas tecnici (CO₂, N₂, stoccaggio) sono munite come le principali di termocoppie, misuratori di pressione, valvole di sicurezza, misuratori di portata e sfiati alimentati pneumaticamente (Figura 30). Queste linee saranno fatte affluire direttamente sulla testa della torcia in maniera da poter simulare gli effetti delle fiamme prodotte da un flare gas più complesso di quello che si può ottenere solamente miscelando propano e metano.

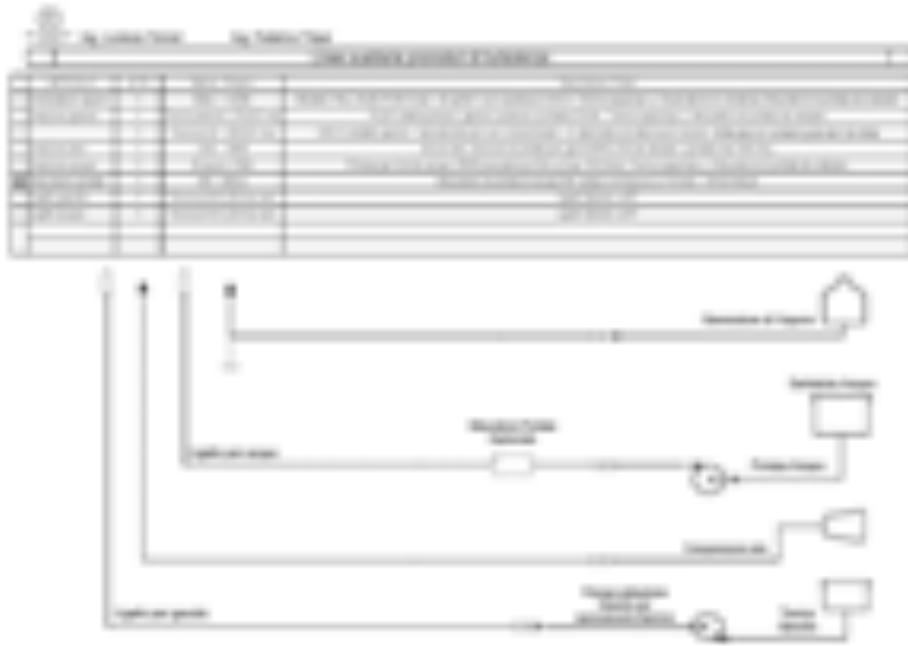


Figura 31: P&ID n°3 gruppo promotori di turbolenza

La camera di test è provvista di 4 linee ausiliarie per promuovere gli effetti di turbolenza e di sporcamento della fiamma. In particolare si sono posizionate le seguenti linee:

- Linea adduzione vapore: il vapore verrà direttamente immesso sulla fiamma in prossimità della testa in modo da promuovere il mixing locale ed avere quindi un miglioramento della combustione in prossimità della testa della torcia.
- Linea adduzione acqua: da letteratura è noto che il medesimo effetto di miscelamento e miglioramento dell'efficienza di combustione che si può ottenere con il vapore, è talvolta effettuato anche con l'immissione di acqua nebulizzata. Per tale motivo si è previsto l'allestimento di questa linea in modo da testare sperimentalmente il suo effetto utile. La linea di adduzione dell'acqua può essere usata anche in condizioni di emergenza per lo spegnimento di incendi localizzati all'interno del banco.
- Linea aria compressa: da questa linea si preleva contemporaneamente l'alimentazione per la gestione delle valvole di regolazione (normalmente chiuse) e degli sfiati posizionati su tutte le altre linee di adduzione dei gas tecnici (normalmente aperti). L'immissione di aria direttamente sulla

fiamma è a sua volta un metodo di promozione del mixing per l'ottenimento di una combustione più pulita.

- Linea gasolio: è stata dedicata una linea per l'immissione diretta di gasolio sulla fiamma, in maniera da sporcala e poter valutarne così gli effetti di formazione di fuliggine/incombusti e il loro abbattimento con le tecniche di mixing sopra presentate.

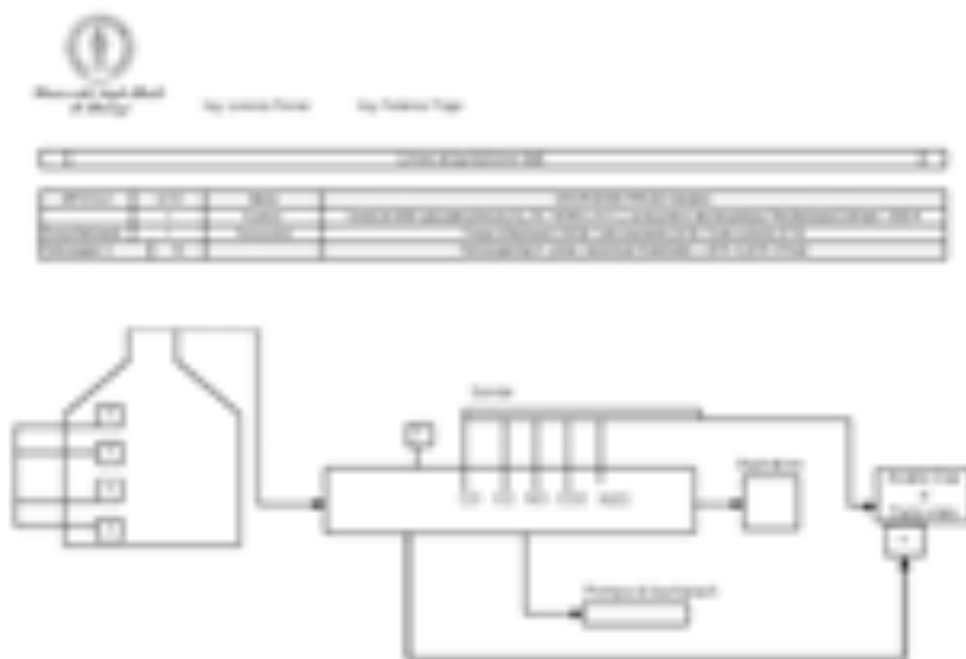


Figura 32: P&ID n°4 Sensoristica di monitoraggio della combustione

Sul corpo della camera è previsto l'inserimento di pozzetti (Figura 34) per il posizionamento delle termocoppie in modo da monitorizzare l'andamento della temperatura al suo interno. Particolare attenzione è stata posta nel determinare il profilo termico del fronte di fiamma lungo la camera e all'imbocco della sezione di scarico.

Lungo il perimetro della camera, su tre livelli sovrapposti (Figura 33), saranno quindi posizionate le termocoppie di tipo K per il rilevamento della temperatura delle sezioni. Le termocoppie saranno montate con un angolo di 120° . I cavi per portare il segnale delle temperature verranno raccolti e fatti passare lungo le travi laterali della camera. I tre anelli sovrapposti devono essere equispaziati.

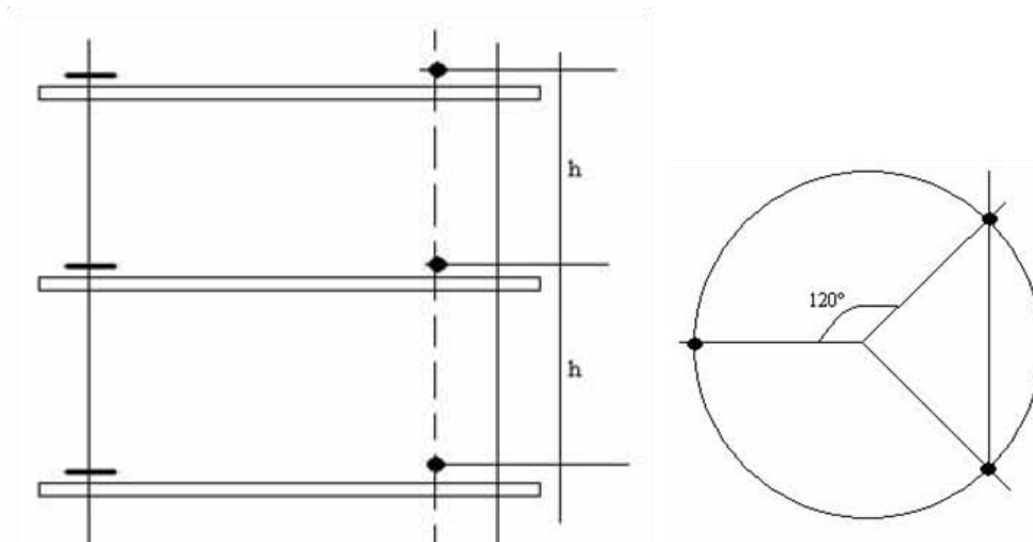


Figura 33: Posizionamento termocoppie su alzata camera

Sulla sommità della camera, a valle della sezione convergente, in corrispondenza del canale di aspirazione dei gas, verrà posizionata una termocoppia di tipo K così da avere una lettura attendibile della temperatura dei gas prodotti dalla combustione (Figura 34).

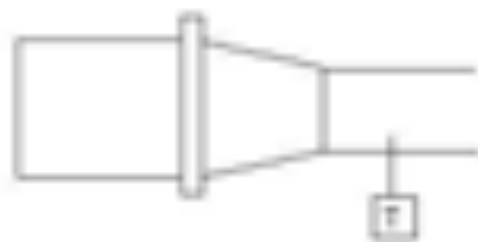


Figura 34: Termocoppia sulla sommità della camera

L'analisi dei campi termici del sistema è anche affidata all'utilizzo di una termocamera di ultima generazione ad elaborazione diretta dell'immagine e trasferimento dati su supporto digitale per lo studio sperimentale del sistema. Per un utilizzo diretto di tale apparecchiatura è stato necessario predisporre la camera con appositi accessi ottici di cui discusso nel paragrafo sottostante.

Finestre (Accessi ottici)

Al fine di posizionare la termocamera in posizione opportuna per acquisire il campo di temperatura sviluppato sulla testa della torcia in prossimità della sezione di attacco della fiamma, è stato previsto l'inserimento di una seconda finestra, posizionata sopra a quella realizzata già nella prima fase di costruzione

del banco. La fornitura della termo camera ha previsto, assieme allo strumento, delle apposite finestre che permettono l'adattamento dello strumento alla lettura dei sorgenti ad alto irraggiamento. A completamento della struttura, in maniera analoga a quanto fatto per la porta di accesso alla camera, in prossimità delle finestrate è stata montata una scala per agevolare le operazioni di ispezione visiva e la registrazione dei dati.

2.12 INDIVIDUAZIONE DEI SENSORI PER IL MONITORAGGIO ED IL CONTROLLO DEL BANCO

La fase di ricerca e di scelta delle tecnologie commerciali disponibili da acquistare e utilizzare sull'impianto ha richiesto un notevole sforzo in termini di risorse e di tempo. I dispositivi scelti infatti vantano caratteristiche all'avanguardia in termini di sensibilità e precisione di lettura delle grandezze analizzate.

Concettualmente è possibile suddividere la scelta della sensoristica in 4 grandi famiglie:

- 1) Sensori per il rilevamento della temperatura e delle fonti di calore:
 - Termocoppie di tipo J
 - Termocoppie di tipo K
 - Termocamera
- 2) Sensori per il rilevamento delle pressioni sulle linee
- 3) Sensori per il rilevamento delle portate sulle linee e dispositivi di controllo
 - Misuratori di portata
 - Valvole di regolazione pneumatiche a controllo manuale
- 4) Sistema di acquisizione degli inquinanti

Per coordinare tutti i segnali ricavati e sviluppare quindi un unico quadro di controllo si è scelto di acquistare un sistema di acquisizione dati della National Instruments. Il rispettivo software di monitoraggio e acquisizione dei dati è stato quindi sviluppato presso il Dipartimento di Energetica dell'università di Firenze nelle fasi di attività legate alla presente tesi di dottorato.

A sua volta, anche il sistema di acquisizione è stato allestito dividendo i canali di acquisizione secondo le seguenti porte di comunicazione:

- 1) Sistema di Acquisizione e condizionamento dei dati
 - PC
 - Schede National Instruments e PC Touch Panel per acquisizione dati.
- 2) Linea acquisizione Inquinanti
 - Sonda aspirante ad alta temperatura per rilevamento inquinanti
 - Analisi delle concentrazioni di O₂ nei fumi

- Analisi delle concentrazioni di CO₂ nei fumi
- Analisi delle concentrazioni di CO nei fumi
- Analisi delle concentrazioni di NO_x nei fumi
- Analisi delle concentrazioni di HC nei fumi
- Analisi del particolato
 - Pompa di Bacharach

3) Linea acquisizione Temperature

- Temperatura dell'aria esterna
- Temperatura parete interna della camera
- Temperatura parete esterna della camera
- Temperatura media dei fumi sulla sezione di aspirazione
- Rilevamento delle temperature su tutte le linee di adduzione
- Rilevamento della temperatura del gas a monte e a valle della vasca di riscaldamento
- Rilevamento della temperatura dell'acqua per il riscaldamento del Flare gas
- Sistema con termocamera IR per acquisizione shape e temperatura di fiamma
- Accesso ottico in zaffiro per alloggiamento termo camera

4) Linea acquisizione Portate

- Portata Metano (mandata verso camera di miscelamento)
- Portata Propano (mandata verso camera di miscelamento)
- Portata Metano (linea piloti)
- Portata Flare Gas
- Portata Vapore (promotori di turbolenza)
- Portata Anidride Carbonica
- Portata Azoto

5) Linea acquisizione Pressioni

- Pressione atmosferica
- Rilevamento delle pressione su ciascuna linea di adduzione
- Riduttori di pressione su ciascuna linea di adduzione
- Pressione di tutte le bombole di stoccaggio
 - Metano
 - Propano
 - Azoto
 - Anidride Carbonica
 - Stoccaggio terze parti
- Pressione linea vapore
- Pressione aria compressa

Per ciascuno dei componenti è stato necessario contattare numerosi fornitori così da individuare, compatibilmente alla disponibilità del mercato, la strumentazione più idonea alle necessità valutate per la realizzazione del banco (Tabella 10).

Strumentazione	Fornitori:
Termocoppie:	TC Direct
Trasduttori di pressione:	CKD, Wika, Keller
Misuratori di portata:	Riels, Precision Fluid, Elkro, Tecnocontrol
Generatore di vapore:	Mibe
Sistema iniezione gasolio:	Tecnoconi
Ugelli:	Steinen
Analizzatori inquinanti:	Deltastrumenti, Testo, Eurotron, Tecnocontrol
Pompa per acqua:	Ecopool
Sistemi di acquisizione:	National Instruments

Tabella 10: Fornitori contattati per la definizione della strumentazione acquistata per l'allestimento del banco

Sono state quindi effettuate anche delle simulazioni di scenario da un punto di vista tecnico economico, in maniera da poter valutare il costo complessivo dell'operazione di acquisto della strumentazione e degli ausiliari necessari al pieno funzionamento del banco prova.

2.12.1 VALUTAZIONE I: SCENARIO CON CONFIGURAZIONE MINIMA

La Tabella 11 riassume tutti i singoli componenti individuati sui P&ID presentati nei paragrafi precedenti e riportati in allegato alla presente relazione. I prezzi riportati sono indicativi in quanto si riferiscono alla data della trattativa, ovvero i mesi tra marzo e ottobre 2008. Il prezzo dei componenti di raccordo quali cavi (circa 60 € per una bobina da 50 m) e connettori è stato stimato sull'ordine del 10% dell'investimento complessivo. La valutazione qui riportata (Tabella 11), prevede indicativamente una spesa di circa 32.359 €. Tuttavia non si è considerato l'inserimento di un misuratore di portata per la stima dei gas aspirati dalla camera. Questo perché in fase di allestimento si è ritenuto più opportuno sostituire tale sistema con un tubo di Pitot munito di appositi

trasduttori di pressione (individuato peraltro nella sonda dello strumento di acquisizione degli inquinanti).

Componente	n.pezzi	Prezzo singolo €	Tot. €
Termocoppie j	12	36	434
Termocoppie k	5	36	181
trasduttori di pressione	8	230	1840
Misuratore portata a turbinetta	4	1500	6000
Misuratori di portata (2)	7	660	4620
Riscaldatore	1	49	49
Generatore vapore	1	1025	1025
Pompa gasolio	1	334	334
Contatore gasolio	1	292	292
Misuratore portata aria	1	600	600
Pompa acqua	1	150	150
Misuratore portata acqua	1	660	660
Ugelli	2	10	20
Analizzatore gas	1	6500	6500
Pompa Bacharach	1	235	235
Misuratore velocità	1		
Notebook per acquisizione	1	1200	1200
Acquisizione	1	5278	5278
Cavetteria e allestimenti	1	10% Tot	2942
Totale: €			32359

Tabella 11: Scenario di acquisto sensoristica; configurazione minima

2.12.2 VALUTAZIONE 2: SCENARIO CON CONFIGURAZIONE OTTIMALE

Rispetto alla configurazione precedente, mantenendo comunque gli stessi criteri di scelta, lo scenario analizzato prevede l'utilizzo di tutti i misuratori di portata più performanti (maggiore precisione), delle termocoppie per il rilevamento della temperatura interne ed esterna della parete della camera, una termocoppia per la temperatura ambiente, il sistema di misura degli inquinati, una termo camera per effettuare le misure di temperatura e di shape della fiamma e una strumentazione di acquisizione dati della National Instruments con un numero di canali adeguato a sopperire eventuali malfunzionamenti del sistema. Il prezzo complessivo stimato per l'acquisto della strumentazione in questa configurazione è approssimativamente di di 81.200 €.

Componente	n.pezzi	Prezzo singolo €	Tot. €
Termocoppie J	13	36	471
Termocoppie K	7	36	253
Trasduttori di pressione	8	230	1840
Misuratore portata a turbinetta	4	1500	6000
Misuratore portata termici	7	1500	10500
Riscaldatore	1	49	49
Generatore vapore	1	1025	1025
Pompa gasolio	1	334	334
Contatore gasolio	1	292	292
Misuratore portata aria	1	600	600
Pompa acqua	1	150	150
Misuratore portata acqua	1	660	660
Ugelli	2	10	20
Analizzatore gas	1	10000	10000
Pompa Bacharach	1	235	235
Misuratore velocità	1	4000	4000
Termocamera	1	31000	31000
Notebook per acquisizione	1	1200	1200
Acquisizione	1	7007	7007
Cavetteria e allestimenti	1	10% Tot	5563
Totale: €			81198

Tabella 12: Scenario di acquisto sensoristica; configurazione ottimale

In entrambe le configurazioni analizzate non sono stati previsti i costi delle tubazioni, delle valvole, dei sistemi di aspirazione e di sicurezza di cui l'impianto deve necessariamente essere munito.

La scelta finale, grazie alla disponibilità economica prevista per la realizzazione del progetto, è ricaduta sulla seconda configurazione, permettendo quindi l'acquisto di tutto il necessario per procedere al meglio nello sviluppo del banco.

2.13 SENSORI SCELTI E DEFINIZIONE COLLEGAMENTI COL SISTEMA DI ACQUISIZIONE

Come sarà meglio esposto nel paragrafo successivo, ogni sensore è stato opportunamente collegato con il sistema di acquisizione (National Instruments CRIO) in maniera da permetterne un adeguato condizionamento del segnale.

Di seguito si riportano quindi le specifiche tecniche delle famiglie di sensori impiegati per la realizzazione del banco di misura per torce industriali.

2.13.1 TERMOCOPPIE

Come esposto nel paragrafo precedente, sono state previste nel sistema due differenti tipologie di termocoppie: quelle di tipo J, operanti tra i -20 e i 300 °C, montate su tutte le linee di adduzione dei gas tecnici e degli ausiliari e quelle di tipo K che invece sono state inserite sul corpo della camera e sulle sezioni di analisi dei fumi (range operativo tra -20 e 1000 °C). La presenza del sistema di condizionamento di segnale garantisce che la corrente massima che può ricevere in ingresso il sistema di acquisizione è di 20 mA.

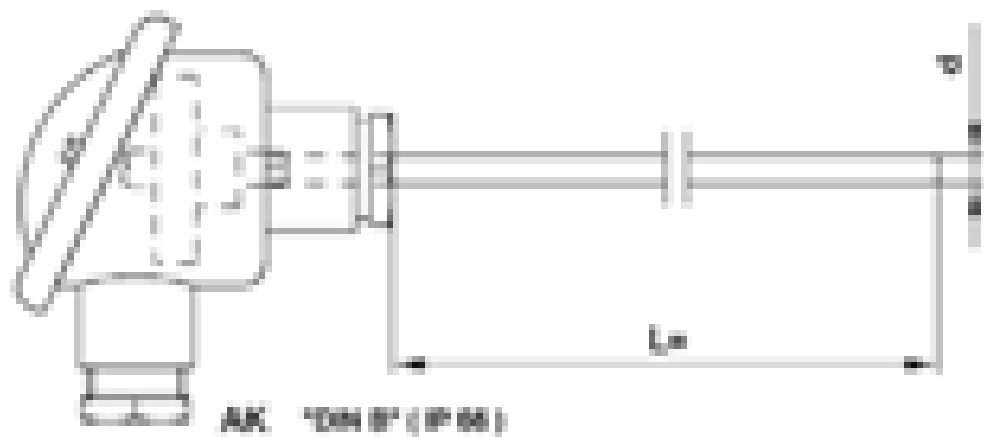


Figura 35: Termocoppia tipo J2IS-6-0150AK0C0X \varnothing 6, L=150 / 400 mm

Le termocoppie utilizzate sono state collegate con un loop di corrente tra l'alimentazione e il sistema di acquisizione. I dispositivi scelti, modello J2IS-6-0150AK0C0X (tipo J) e K2IS-6-0400AK0C0X (tipo K), sono provvisti di un apposito convertitore di segnale che provvede a trasformare la tensione generata dalla termocoppia in un'uscita in corrente 4-20 mA. Per il loro inserimento sulle linee, sono stati acquistati degli appositi pozzetti filettati che ne permettono un facile inserimento.

Dovendo acquisire le temperature interne alla camera con le termocoppie di tipo K, è stato necessario valutare gli effetti prodotti dall'irraggiamento diretto della fiamma sul sensore. Come noto da esperienza sperimentale, gli effetti dell'irraggiamento possono alterare notevolmente il valore di temperatura misurato. Per evitare questo, si è optato per l'inserimento di una testa di schermatura con la quale la termocoppia è libera di percepire la temperatura dell'aria che si muove all'interno della camera, senza risentire degli effetti prodotti dall'irraggiamento diretto. La testa di schermatura è composta fondamentalmente da un tubo metallico forato disposto con l'asse parallelo a quella di estensione della camera così da permettere il passaggio dei gas (Figura 36: Schermatura per termocoppie K per evitare gli effetti dell'irraggiamento diretto). Un grano di serraggio permette di bloccare lo schermo sulla stessa termocoppia in modo da evitarne movimenti.



Figura 36: Schermatura per termocoppie K per evitare gli effetti dell'irraggiamento diretto

Per dimensionare opportunamente tale sistema di protezione dei sensori, è stato necessario definirne la lunghezza e la sezione in maniera adeguata: infatti le

termocoppie disposte nella parte più alta della camera, anche se provviste del sistema di schermatura, a causa della loro quota di installazione rischiano di presentare un angolo di vista in grado di percepire l'irraggiamento diretto prodotto dalla fiamma sulla parte bassa della camera. Con riferimento alla Figura 37, si considera il triangolo rettangolo che ha per vertici la testa della termocoppia e il punto di innesco della fiamma sulla torcia. Nota l'altezza del cateto maggiore (3200 mm), e il raggio della camera (2000 mm); avendo scelto di realizzare la testa schermante con una lunghezza di 120 mm, se ne è valutato il diametro per similitudine tra triangoli rettangoli. Il dimensionamento finale è stato elaborato come scelta bilanciata fra diametro ed altezza del sistema schermante.

$$\frac{3800}{60} = \frac{2000}{X} \rightarrow x = 31.5 \text{ mm } \textit{diametro testa schermatura}$$

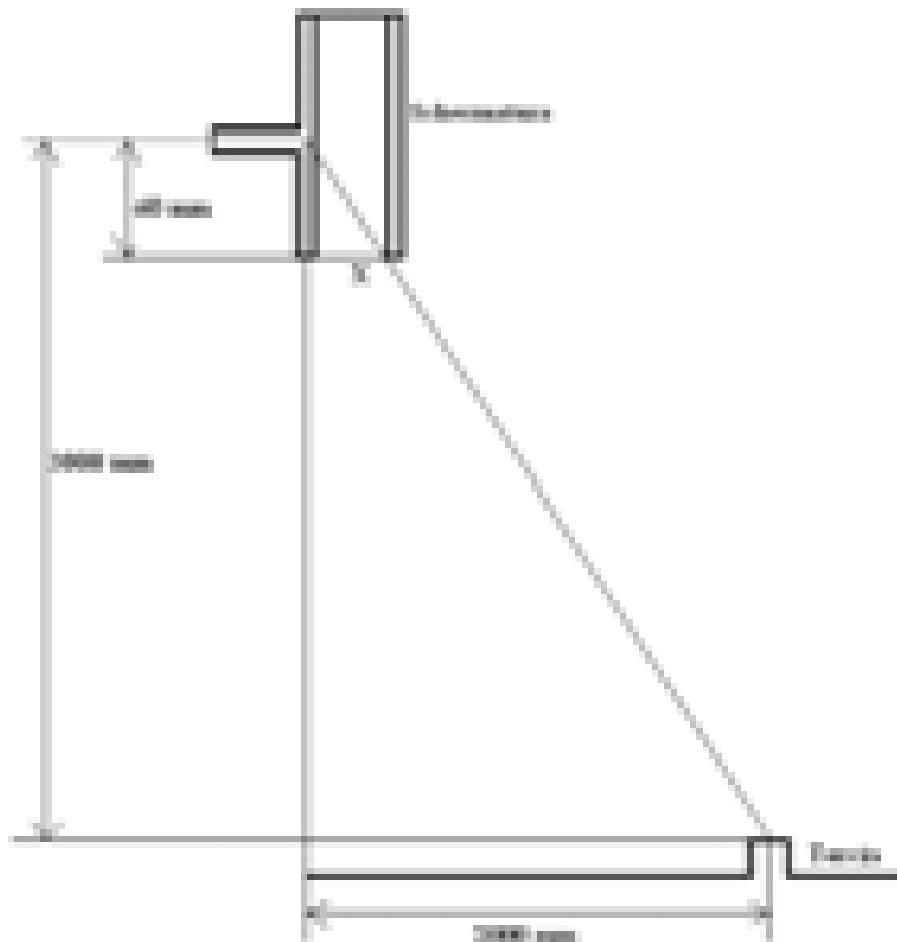


Figura 37: Criterio di valutazione della lunghezza della schermatura delle termocoppie

2.13.2 TRASDUTTORI DI PRESSIONE

I misuratori di pressione scelti (WIKA IS-20-S) sono stati montati su tutte le linee di adduzione dei gas tecnici, su quelle degli ausiliari, sulla camera di miscelamento e sull'uscita del gorgogliatore (*water seal*). Questi dispositivi hanno un range operativo tra 0.1 e 10 bar, restituendo in uscita un segnale in corrente 4-20 mA e sono stati fissati sulle linee tramite una ghiera filettata che ne facilita il montaggio (Figura 39).



Fig. left: Pressure transmitter IS-21-S

Fig. right: Pressure transmitter IS-20-F



Figura 38: Pressostati elettronici Wika

Analogamente alle termocoppie, anche questi sensori richiedono un'alimentazione fornita derivando in parallelo da quella dei sensori di temperatura.



Figura 39: Installazione sensori di pressione lungo linea adduzione gas

I dispositivi scelti chiedono una tensione di alimentazione (U_B) compresa tra 10 e 30 V e sostengono una resistenza massima di carico (R_A) così calcolabile:

$$R_A < \frac{U_B - 10 V}{0.02} - (\text{lunghezza cavo collegamento in mx}0.14 \text{ Ohm})$$

che corrisponde indicativamente a 700 Ohm. Per tale motivo tra l'uscita del sensore e l'ingresso nel sistema di acquisizione non sono state inserite resistenze in maniera che l'unica presentata al sensore fosse quella offerta dal cavo di collegamento. Anche in questo caso la corrente massima che può arrivare all'acquisitore è limitata dal trasmettitore di segnale a 20 mA.

2.13.3 MISURATORI DI PORTATA:

I misuratori di portata utilizzati nell'impianto sono di tipo differente a seconda che si tratti di quelli inseriti sulle linee dei combustibili tecnici rispetto a quelli inseriti sulle linee degli ausiliari.

Per quanto riguarda quindi le linee di adduzione del combustibile sono stati scelti dei misuratori volumetrici di portata a pistoncini rotanti Estler Instrument RVG e RVG-ST. Tali misuratori di portata (Figura 40) sono in grado di generare

impulsi ad alta frequenza in modo da poter valutare la quantità di flusso passante con una precisione adeguata a quelle che sono le regolazioni necessarie del banco. I dispositivi sono anche muniti di display analogico per la lettura della misura incrementale e possono essere anche impiegati come contatori fiscali e rispettano pienamente le normative ATEX.

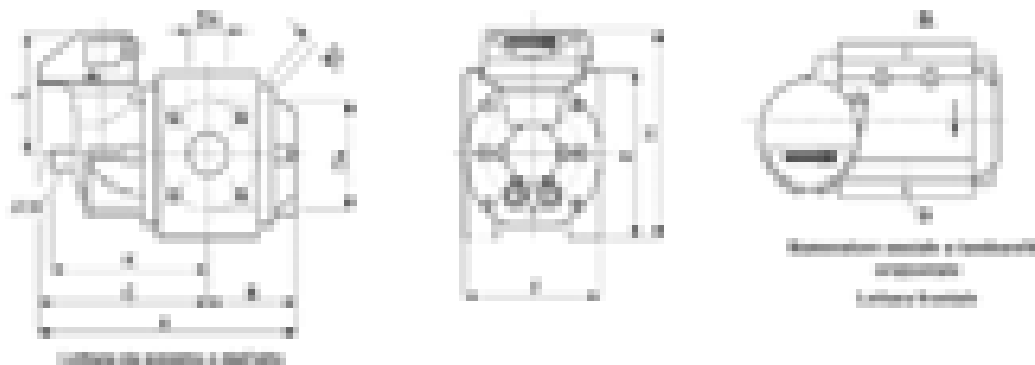


Figura 40: Misuratore di portata per linee di adduzione primaria

La cella di misura è costituita da due giranti a forma di otto che assieme formano internamente al volume di rotazione, quattro camere per giro; al passaggio del gas queste si riempiono e si svuotano alternativamente. Il numero di giri è proporzionale al volume di gas che attraversa le camere. La rotazione viene trasferita ad un numeratore meccanico che indica appunto il volume (Figura 41).

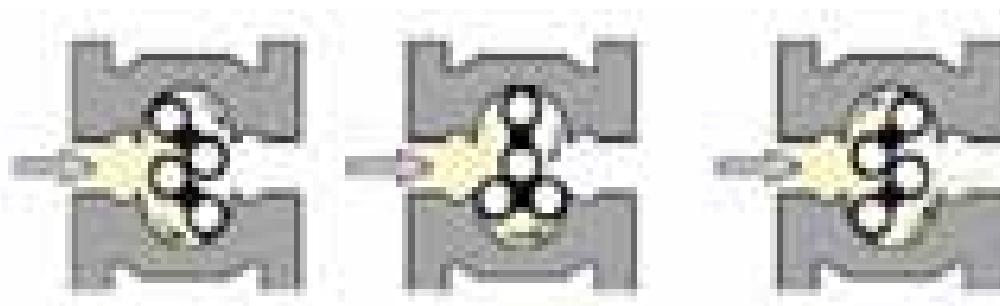


Figura 41: Schema di funzionamento dei misuratori di portata a pistoni rotanti

I dispositivi sono stati muniti di un generatore di impulsi ad alta frequenza in grado di permettere la lettura delle portate dei gas tecnici utilizzati senza commettere errori di risoluzione eccessivi. La tabella sottostante (Tabella 13: Valutazione della risoluzione di lettura delle portate) indica la valutazione numerica effettuata in fase di definizione della strumentazione.

	AF (imp/m3)	m3/h	m3/s	imp/h	imp/s (Hz)	Durata impulso (s)	Errore m3/imp
CH4 primario	14025	40	0.011	561000	156	0.0064	0.000071
G40/DN50 PN16	-	14025	120	0.033	1683000	468	0.000071
Propano primario	2500	10	0.002	25000	7	0.1440	0.000400
G16/DN25 PN16	-	2500	50	0.013	125000	35	0.000400
CH4 pilota	2500	4	0.001	10000	3	0.3600	0.000400
G16/DN25 PN16	-	2500	12	0.003	30000	8	0.000400

Tabella 13: Valutazione della risoluzione di lettura delle portate

Tali strumenti di misura sono stati scelti in funzione delle portate definite in fase di dimensionamento della camera. L'allestimento e l'utilizzo delle linee sullo skid, come spiegato nel paragrafo precedente, è tale che questi dispositivi debbano lavorare in un range di funzionamento variabile in funzione della miscela che si desidera testare sul banco prova. Le caratteristiche di ciascun dispositivo montato sono riportate invece nella Tabella 14:

Linea:	Modello:	Caratteristiche:
Linea metano primaria	P4050P200L1 PIST.ROT.	G40/DN50-PN16-mod:S1- Q=3.2 to 65 m3/h - cs.:ALL-AF
Linea propano primaria	P1025P200LX PIST.ROT.	G16/DN25-PN16-Q=0.5/16mc/h-cs.:ALL-AF
Linea metano secondaria	P1625P200LX PIST.ROT.	G16/DN25-PN16-Q=0.5/16mc/h-cs.:ALL-AF

Tabella 14: Caratteristiche tecniche dei misuratori installati

Il segnale digitale in uscita dal sensore è un treno di impulsi che lavora con lo standard Namur EN 50227 (Figura 42). Il sistema in analisi infatti risponde permettendo un passaggio di corrente $I < 1.2 \text{ mA}$ o $I > 2.1 \text{ mA}$ a secondo della posizione di un disco forato (messo in rotazione dal passaggio del gas) rispetto ad un sensore di prossimità (Figura 42). Tale standard prevede un'alimentazione di 8,2 V DC con un carico di 1 k Ω per garantire il rispetto delle norme ATEX; il sistema è calibrato per rispondere con una corrente di

switch nominale di $1,55\text{mA} \pm 10\%$ attorno alla quale si passa dallo stato alto a quello basso.

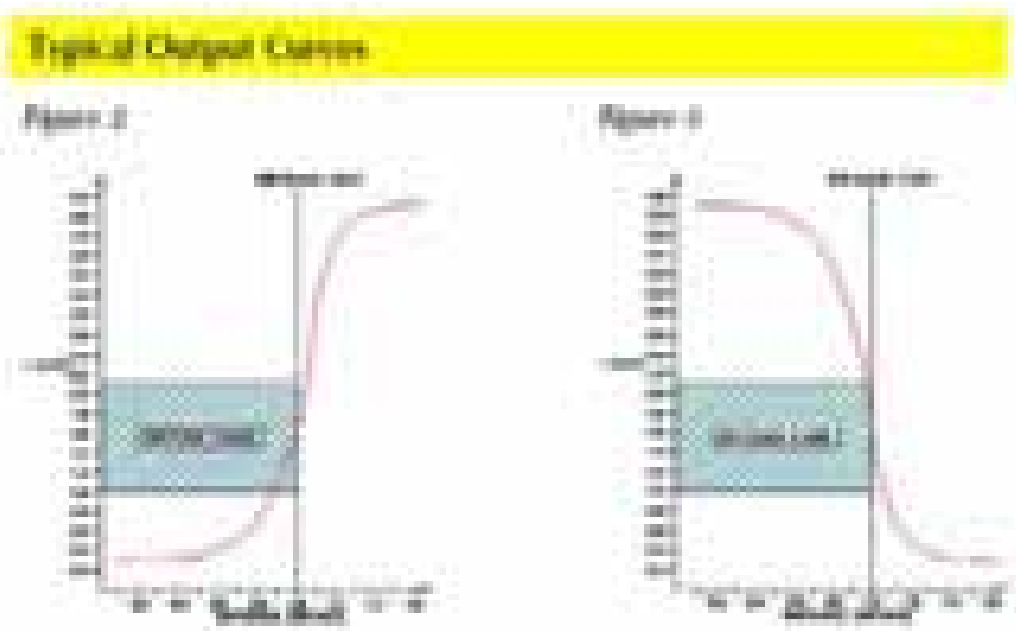
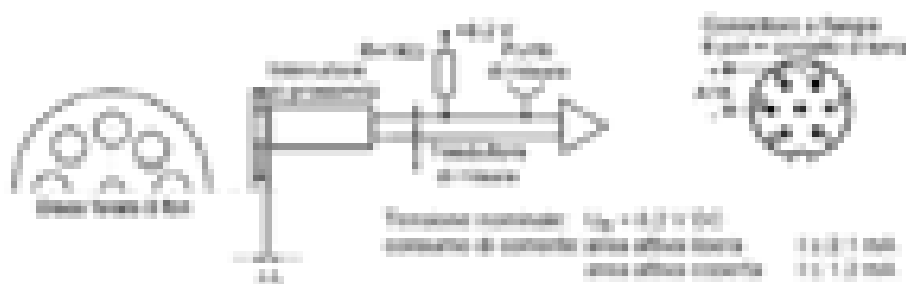


Figura 42: Schema elettrico di collegamento del generatore di impulsi ad alta frequenza

Non disponendo di un acquisitore che permettesse l'analisi di segnali in protocollo NAMUR, nella fase di installazione dei dispositivi e di configurazione del sistema di acquisizione, è stato necessario sviluppare un circuito di adattamento.

Tale circuito sopperisce il fatto che il misuratore di portata non fornisce un segnale adeguato per permettere al contatore digitale a disposizione (che richiede invece un ingresso a 24 V) di vedere un gradino di tensione tale da poter essere conteggiato. Per tale motivo il circuito realizzato (Figura 43), sfruttando l'uscita secondo lo standard Namur fornita dal misuratore di portata, comanda la base di un transistor alimentato a 24V che si comporta così da interruttore elettronico producendo all'ingresso del sistema di acquisizione una

differenza di tensione adeguata a discriminare gli impulsi prodotti per il conteggio della portata fluente.

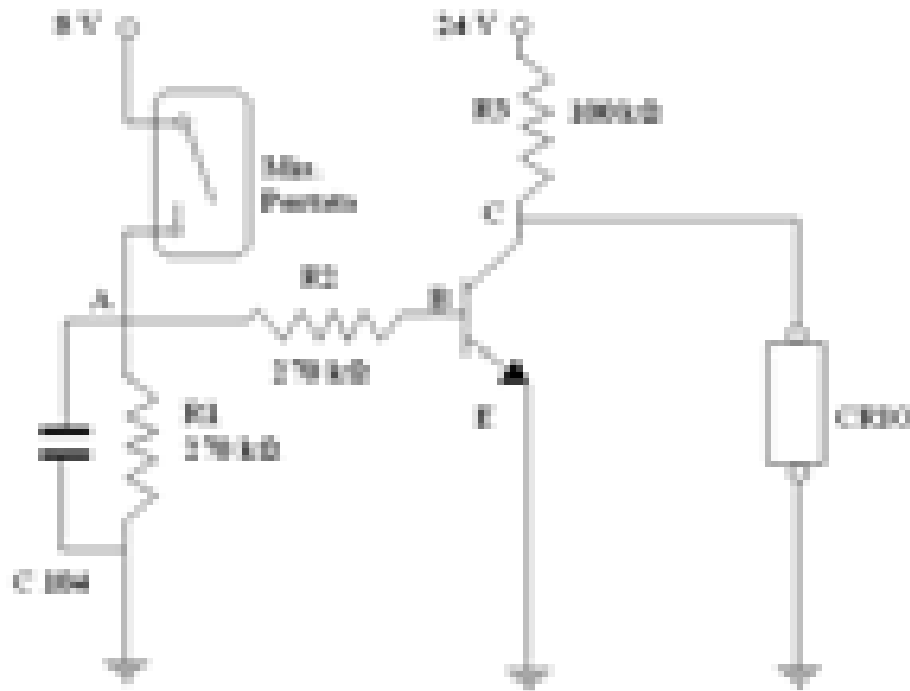


Figura 43: Schema circuitale per condizionamento segnale digitale misuratori di portata

Al momento che il misuratore di portata restituisce un uscita bassa ($I < 1,2 \text{ mA}$), la tensione V_{BE} tende a valori prossimi a 0 e così anche la corrente di base $I_B = 0$ e la $I_C = 0$; il transistor è interdetto, non conduce e si comporta come un circuito aperto. La tensione di uscita sul collettore, letta quindi dal sistema di acquisizione del segnale, assume il massimo valore $V_u = V_{CC}$.

Quando, invece, il misuratore di portata restituisce un uscita alta ($I > 2,3 \text{ mA}$), la base del transistor è polarizzata direttamente, il transistor va in saturazione, la I_C assume il massimo valore, il transistor si comporta da circuito chiuso. La tensione di uscita assume il valore $V_u = 0$ permettendo la commutazione del segnale letto dal sistema di acquisizione. Le resistenze R1 e R2 servono a polarizzare opportunamente la rete della base mentre il condensatore (C 104) stabilizza il segnale di controllo della base.

Così facendo è stato possibile ottenere un dispositivo che avesse due alimentazioni separate (8,2 V per il misuratore e 24 V per il sistema di acquisizione) in grado di modulare il segnale percepito dal contatore in funzione

di quello restituito all'uscita del misuratore, rispettando lo standard Namur impiegato tipicamente per tecnologie ATEX con uscita in alta frequenza.

2.13.4 VALVOLE DI REGOLAZIONE DELLA PORTATA

Per garantire il corretto funzionamento delle linee permettendo il massimo della sicurezza, si è deciso di utilizzare delle valvole di regolazione attuate pneumaticamente.

Una valvola di controllo può essere realizzata in una grande varietà di forme costruttive e funzionali, tuttavia gli attacchi sono in generale flangiati. All'interno del corpo, l'area di passaggio del fluido di processo viene regolata in modo continuo attraverso lo spostamento di un otturatore rispetto ad una sede. Quando l'otturatore appoggia sulla sede la valvola è completamente chiusa, quando invece si trova alla sua massima distanza, la valvola è tutta aperta. I vari componenti costitutivi sono solitamente i seguenti:

- Corpo valvola : costituisce la struttura portante della valvola.
- Premistoppa : isola il processo dall'ambiente tramite opportune tenute.
- Stelo: costituisce l'equipaggio mobile, il cui movimento regola la distanza tra l'otturatore e la sede
- Otturatore
- Sede
- Attuatore (posizionato all'estremità superiore dello stelo).

L'attuatore o servomotore pneumatico è quel dispositivo che permette di trasformare il segnale pneumatico di comando nel movimento lineare ed uniforme di apertura/chiusura dell'otturatore. Gli attuatori pneumatici utilizzati sull'impianto sono servomotori compatti, con diversi campi molla e con 5 misure di membrane che permettono l'azionamento, con movimento lineare, di valvole aventi diverse caratteristiche e condizioni di esercizio. L'attuatore pneumatico è costituito da un piatto con membrana di gomma che riceve nella parte superiore la pressione di comando. La forza generata da tale pressione viene contrastata da una molla sottostante che dà il rapporto di proporzionalità tra la stessa pressione e la corsa della membrana. Lo stelo è vincolato meccanicamente alla membrana: in questo modo si ottiene un sistema sicuro e semplice per il posizionamento relativo otturatore-sede tramite il segnale di comando.

Diaframmi molto sensibili ed opportunamente sagomati, per funzionare in modo ottimale in tutte le posizioni di lavoro, e molle di contrasto, accuratamente progettate e dimensionate, permettono di ottenere una rigorosa proporzionalità tra corsa dell'attuatore e segnale regolante. Questi attuatori nascono tipicamente per azionare valvole a 2 e 3 vie sino a DN 100 (4").

Sulle valvole scelte è stato così montato un attuatore pneumatico ad azione inversa. L'aumento della pressione dell'aria provoca lo spostamento dello stelo verso l'alto, vincendo la forza delle molle di contrasto. In mancanza di aria, le molle spingono lo stelo verso il basso per cui le valvole a due vie e la via diretta delle valvole a 3 vie deviatrici si chiudono mentre si apre la via diretta delle valvole a 3 vie miscelatrici.

In Figura 44 è riportato lo schema tecnico del gruppo valvola/attuatore. Questi sistemi sono stati allestiti, come visibile nei P&ID, sulle linee primarie di adduzione del metano e del propano.

Tab. 4 - Materiali
Servomotori PN3000 - PN4000

N°	Particolare		Materiali
	N°	Denominazione	
1	2	Custodia diaframma	Acciaio C. stampato
2	2	Diaframma	Nitrile rinforzato
3	3	Piatto diaframma	Acciaio C.
4	4	Molle	Acciaio per molle
5	5	Asta	Acciaio inox
6	6	Dado	Acciaio inox
7	7	Rondella	Acciaio zincato
8	8	O'ring	Gomma
9	9	Guida molla	Acciaio zincato
10	10	Rondella	Acciaio zincato
11	11	Bussola	Bronzo
12	12	V'ring	Gomma
13	13	Castello	Ghisa
14	14	Guarnizione	Fibra esente da amianto
15	15	Bullone di fissaggio	Acciaio C.
16	16	Bullone / dado fissaggio coperchio	Acciaio C.
17	17	Nottolino superiore	Acciaio C.
18	18	Dado di fermo	Acciaio C.
19	19	Nottolino inferiore	Acciaio C.
20	20	Giunto "Namur"	Acciaio inox
21	21	Bullone / dado fissaggio giunto	Acciaio inox
22	22	Targhetta corsa	Alluminio
23	23	Tappo sfiato	Ottone nichelato
24	24	Distanziale	Acciaio C.

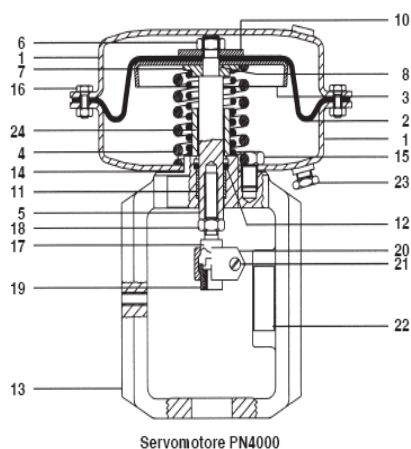
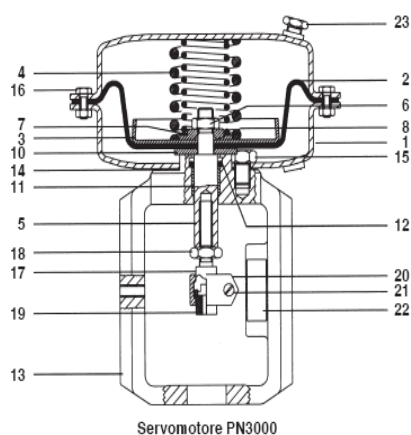


Figura 44: Valvole pneumatiche di sicurezza

2.14 SISTEMA DI ACQUISIZIONE DEGLI INQUINANTI



Figura 45: GreenLine8000 - sistema acquisizione inquinanti

Il sistema scelto per il rilevamento delle concentrazioni delle specie inquinanti prodotte dalla combustione del tail gas è il GreenLine 8000 della ditta Eurotron.

Questo presenta le seguenti caratteristiche :

- Unità principale di analisi gas (MCU) + Unità di controllo remota (RCU).
- Unità RCU con stampante integrata su carta comune, memoria misure e comunicazione con PC.
- Celle di misura per O₂, CO, NO, NO₂, SO₂ o CH₄ con sensori elettrochimici (EC) 2 2 2 X Y
- Conformità con il protocollo EPA (Environmental Protection Agency) o equivalenti (CTM-030 e CTM-034).
- Analizzatore di emissioni portatile più avanzato con misura di velocità fumi nel camino.
- Sonda prelievo fumi e tubo riscaldati con regolazione della temperatura.
- Trappola raffreddata a celle di Peltier e drenaggio automatico della condensa.
- Misura diretta di CO, CO₂, C H₄ con sensori a infrarosso (NDIR).

Alla luce della ricerca effettuata per individuare l'apparecchiatura più idonea alla realizzazione del banco, è risultato che gli analizzatori di gas di combustione GreenLine 6000 & GreenLine 8000 rappresentano alcuni tra i più completi e avanzati strumenti disponibili sul mercato. Il GreenLine 8000 è composto da due unità che possono essere collegate tra loro: l'unità principale di analisi (MCU) e l'unità di controllo remota (RCU). La comunicazione avviene con protocollo seriale industriale RS422 standard o senza fili grazie al trasmettitore wireless. La MCU include delle celle chimiche che permettono la stima delle concentrazioni delle rispettive specie investigate: pompa di aspirazione gas, filtri, trappola anticondensa con raffreddamento a celle di Peltier, pompa peristaltica per il drenaggio della condensa, sensori ed elettronica di controllo. Il GreenLine 8000 dispone anche in aggiunta di sistemi di raffreddamento a celle di Peltier, sensori NDIR e la possibilità di collegare una sonda industriale riscaldata. L' MCU può essere posizionata – come appunto fatto sull'impianto (Figura 46) - in prossimità del camino ed è in grado di operare anche come unità cieca (senza l'RCU collegata). L'operatore può collegare l'RCU all'unità di analisi per controllare a distanza l'analisi. L'RCU è utilizzata per visualizzare le misure effettuate, per memorizzarle nella memoria interna, per stamparli e per trasferirli in qualsiasi momento ad un computer. Il software DBGas 2004 – compreso nell'acquisto del sistema – ha permesso di gestire in modo semplice e completo, tutti i dati e le informazioni delle analisi effettuate.



Figura 46: Allestimento del GreenLine8000 presso lo scarico della camera

2.15 CONDIZIONAMENTO DEI SEGNALI PER LA CATENA DI ACQUISIZIONE DATI

Il sistema di acquisizione è stato concepito in modo tale da poter gestire, nella configurazione finale, fino a 32 ingressi analogici in corrente (4-20 mA), 8 ingressi digitali con segnale 0-24 V; 4 ingressi per termocoppie e 8 ingressi in tensione 0-10V. Il software si basa su un sistema in grado di poter accettare un numero indefinito di canali (a secondo della disponibilità dei moduli inseriti ne National Instruments C-RIO). Ogni canale viene dichiarato in un apposito file di input esterno alla parte compilata del software; questo permette di poter di lasciare la massima compatibilità ed espansibilità futura del sistema.

Per fare ciò, a ogni canale inserito, corrispondente un singolo sensore, sono stati attribuiti due coefficienti – Gain ed Offset – indispensabili per la loro taratura in funzione dei range operativi. Il file d’input, strutturato in formato ASCII su un comune file .txt, si presenta come indicato di seguito:

On/Off	Channel	Grand	Label	Graf	Offset	Gain	Note
	Mod1/ctr0	I	M 10		0	0.256	Linea__CH4_main
	Mod1/ctr1	I	M 20		0	1.44	Linea__Propano
	Mod1/ctr2	I	M 30		0	1.44	Linea__CH4 pilot
	Mod2/ai0	A	T 10	G1	-100	20000	Linea__CH4_main
	Mod2/ai1	A	T 20		-100	20000	Linea__CH4_main
	Mod2/ai2	A	T 30		-100	20000	Linea__Propano
	Mod2/ai3	A	T 50		-100	20000	Linea__Flare gas
	Mod2/ai4	A	T 60	G1	-100	20000	Linea__Flare gas
	Mod2/ai5	A	T 70		-100	20000	Linea__Vapore
	Mod2/ai6	A	T 80		-100	20000	Linea__CO2
	Mod2/ai7	A	T 90		-100	20000	Linea__N2
	Mod3/ai0	A	T 100		-100	20000	Linea__Aria
	Mod3/ai1	A	T 110		-300	70000	Corpo__Camera
	Mod3/ai2	A	T 111		-300	70000	Corpo__Camera
	Mod3/ai3	A	T 112		-300	70000	Corpo__Camera
	Mod3/ai4	A	T 120		-300	70000	Corpo__Camera
	Mod3/ai5	A	T 121		-300	70000	Corpo__Camera
	Mod3/ai6	A	T 122		-300	70000	Corpo__Camera
	Mod4/ai7	A	T 130		-300	70000	Corpo__Camera
	Mod4/ai0	A	T 131		-300	70000	Corpo__Camera
	Mod4/ai1	A	T 132		-300	70000	Corpo__Camera
	Mod4/ai2	A	T 140		-300	70000	Uscita__Camera
	Mod4/ai3	A	P 10	G2	-2.5	625	Linea__CH4_main
	Mod4/ai4	A	P 20		-2.5	625	Linea__Propano
	Mod4/ai5	A	P 30		-2.5	625	Linea__CH4 pilot
	Mod4/ai6	A	P 40		-2.5	625	Camera__mixing
	Mod4/ai7	A	P 80	G2	-2.5	625	Linea__CO2
	Mod5/ai0	A	P 90		-2.5	625	Linea__N2
	Mod5/ai1	A	P 100		-2.5	625	Linea__Aria
	Mod5/ai2	A	M 80		0	1	Linea__CO2
	Mod5/ai3	A	M 90		0	1	Linea__N2
	Mod5/ai4	A	M 100		0	1	Linea__Aria

I campi di settaggio del file si presentano con i seguenti parametri: attivazione del canale, linea di acquisizione, tipo di grandezza misurata, etichetta associata alla linea, visualizzazione grafica, Offset, Gain, note aggiuntive. In questo modo è stato possibile generare un codice che, nell'eventualità futura di inserire altri sensori rispetto agli attuali, fosse già in grado tramite una semplice reimplementazione, di gestire un maggior numero di segnali in ingresso. Ovviamente tale operazione comporterebbe anche un adeguamento hardware per quanto riguarda il sistema di acquisizione che verrà descritto nel dettaglio in seguito.

I paragrafi successivi illustrano le tecniche di valutazione adoperate per la stima dei vari coefficienti di taratura, a secondo delle classi di strumento impiegate all'interno del banco prova; tale condizionamento fondamentale è servito per i segnali analogici delle termocoppie e dei pressostati, e per quelli digitali provenienti dai misuratori di portata.

2.15.1 COEFFICIENTE TARATURA TERMOCOPPIE

Sono stati calcolati i coefficienti (Gain e Offset) sia per le termocoppie di tipo K che per quelle di tipo J. Le prime lavorano in un intervallo compreso tra i -20°C e i 1100°C, mentre le seconde tra i -20°C e i 300°C.

Per individuare la corretta lettura della temperatura si assume una legge del tipo:

$$y = Gx + O_f$$

Dove y è il valore di temperatura letto in [°C], G è il guadagno (espresso in [°C/mA]), x è il valore di corrente registrato [mA] e O_f è l'offset introdotto dal range operativo (espresso in °C).

Per quanto riguarda le termocoppie di tipo J:

$$\Delta A = 20-4 \text{ [mA]} = 16 \text{ [mA]}$$

$$\Delta T = 300-(-20) \text{ [°C]} = 320 \text{ [°C]}$$

$$\frac{\Delta T}{\Delta A} = \frac{320}{0,016} = 20.000$$

Imponendo la tensione corrispondente al fondo scala (4mA \rightarrow -20°C) ne segue che:

$$x = 4 \text{ mA}$$

$$-20 = 20.000 * 0,004 + Of$$

$$Of = -300$$

Analogamente per le termocoppie di tipo K:

$$\Delta A = 20 - 4 \text{ [mA]} = 16 \text{ [mA]}$$

$$\Delta T = 1100 - (-20) \text{ [}^\circ\text{C]} = 1020 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$G = \frac{\Delta T}{\Delta A} = \frac{1120}{0,016} = 70.000$$

Imponendo la tensione corrispondente al fondo scala (4mA \rightarrow -20°C) ne segue che:

$$x = 4 \text{ mA}$$

$$-20 = 70.000 * 0,004 + Of$$

$$Of = - 300$$

Quindi, ricapitolando per le termocoppie scelte sono stati utilizzati i seguenti coefficienti di taratura:

Termocoppie	Offset	Gain
K	-100	20.000
J	-300	70.000

2.15.2 COEFFICIENTE TARATURA MISURATORI DI PRESSIONE

Analogamente sono stati calcolati anche i coefficienti (Gain e Offset) per la calibrazione dei sensori di pressione. Queste sono operanti in un intervallo compreso tra 0 e 10 bar.

Per individuare la corretta lettura della pressione relativa sulle linee si assume una legge del tipo:

$$y = Gx + Of$$

Dove y è il valore di pressione relativa letto in [bar], G è il guadagno (espresso in [bar/mA]), x è il valore di corrente registrato [mA] e Of è l'offset introdotto dal range operativo (espresso in bar).

Per quanto riguarda le trattazioni matematiche utilizzate:

$$\Delta A = 20 - 4 \text{ [mA]} = 16 \text{ [mA]}$$

$$\Delta P = 10 - (0) \text{ [bar]} = 10 \text{ [bar]}$$

$$G = \frac{\Delta P}{\Delta A} = \frac{10}{0,016} = 625$$

Imponendo la tensione corrispondente al fondo scala (4mA \rightarrow 0 bar) ne segue che:

$$x = 4 \text{ mA}$$

$$0 = 625 * 0,004 + Of$$

$$Of = -2,5$$

Pertanto per i misuratori di pressione delle linee primarie scelte sono stati utilizzati i seguenti coefficienti di taratura:

Mis.Pressione	Offset	Gain
0-10 bar	-2,5	625

2.15.3 MISURATORI DI PORTATA

Sono stati quindi calcolati Gain e Offset anche per il rilevamento della misura di portata. Per la linea primaria del metano è stato utilizzato un sensore in grado di fornire un'uscita con una risoluzione di 14025 imp/m³, mentre per quella del propano e dei piloti sono stati inseriti dispositivi da 2500 imp/m³ – dovendo questi elaborare portate meno impegnative.

Per individuare la corretta lettura della portata, analogamente a quanto fatto in precedenza, si assume una legge del tipo:

$$y = Gx$$

Dove y è il valore di portata letto in [m³/h], x è il valore di impulsi letti dal contatore e G è il guadagno riferito al numero di impulsi contati in un secondo.

Quindi per quanto riguarda il misuratore da 14025 imp/m³:

$$G = \frac{s/h}{imp/m^3} = \frac{3600}{14025} = 0.256$$

da cui:

$$y = 0,256 x \text{ [m}^3\text{/h]}$$

Analogamente per i misuratori da 2500 imp/m³ risulterà:

$$G = \frac{s/h}{imp/m^3} = \frac{3600}{2500} = 1,44$$

da cui:

$$y = 0,144 x \text{ [m}^3\text{/h]}$$

Ricapitolando per i misuratori di portata delle linee di adduzione dei combustibili tecnici sono stati utilizzati i seguenti coefficienti di taratura:

Termocoppie	Offset	Gain
CH4 primario	0	0,256
Propano e piloti	0	1,44

2.16 SISTEMA DI ACQUISIZIONE DEI SEGNALI

Per poter gestire al meglio l'intero funzionamento del sistema, si è previsto così l'inserimento di sensori per la misurazione della pressione, della temperatura e della portata su ciascuna linea di adduzione dei gas di combustione e degli ausiliari. E' stato quindi progettato e realizzato un quadro elettrico (Figura 47) di controllo opportunamente dimensionato per contenere i seguenti dispositivi:

- Schermo Touch-screen National Instruments per letture sulla camera con processore e memoria;
- Trasformatore
- Alimentazione 12-24 V
- Morsettiera per gestione dei canali in ingresso
- Sistema di acquisizione con FPGA e Real-time National Instruments CRio



Figura 47: Schema funzionale del quadro elettrico per l'acquisizione dei dati

2.16.1 COMPONENTI CATENA DI ACQUISIZIONE

La catena di acquisizione si compone principalmente di tre gruppi funzionali: il pc di acquisizione dati (che nel caso specifico è stato scelto con uno chassis da quadro e interfaccia touch screen), il gruppo di acquisizione e indirizzamento dati dove vengono alloggiati i singoli moduli, ed infine i terminali dedicati all'inserimento dei sensori che provvedono fisicamente a recuperare e condizionare opportunamente il segnale proveniente dal rispettivo trasduttore. La casa produttrice di tale attrezzatura è la National Instruments, internazionalmente riconosciuta come leader nel settore misure.

Il panel PC (PPC) touch screen di National Instruments (Figura 48) è realizzato fisicamente su un pannello industriale per la distribuzione di NI LabVIEW human machine interface (HMI) e monta come sistema operativo Windows XP. Il modulo LabVIEW Datalogging and Supervisory Control (DSC) aggiunge funzioni HMI inclusi allarmi, registrazione dati, grafiche industriali e OPC a LabVIEW ed è comunemente distribuito a panel PC. A livello di configurazione hardware il PPC presenta uno schermo da 15 pollici - NI PPC-2015 dotato di uno slot PCI e di 2 porte USB per la connessione di periferiche esterne. Il processore è un Pentium 4 da 2.0 GHz con 2 Gb di RAM e 160 Gb di Hd.



- LCD XGA TFT a colori a 15 pollici
- Pannello frontale conforme NEMA4/IP65
- Processori 1.0 GHz (PPC-2115) oppure 2.0 GHz (PPC-2015)
- Sistema operativo Windows XP
- Gamma completa di opzioni I/O di espansione

Figura 48: PPC Touch screen NI

Il secondo elemento della catena di acquisizione dei dati è il modulo NI CRIO - Controller real-time integrato da 266 MHz e 2M Gate FPGA (Figura 49).



Figura 49: Modulo NI CRIO

Quest'acquisitore è configurabile con numerosi tipi di moduli in grado di gestire segnali di I/O di diversa natura; dall'analisi di mercato effettuata è risultato uno tra i più performanti sistemi avanzati per il monitoraggio ed il controllo dei

dispositivi embedded. A livello hardware è munito di un processore industriale real-time a 266 MHz per il controllo, il data-logging e l'analisi. Lo chassis FPGA a 8 slot monta gate dedicati a funzioni personalizzate di temporizzazione, controllo ed elaborazione I/O. La comunicazione con il Touch Pannel avviene tramite Porta Ethernet 10/100 BaseT; in alternativa è munito di porta seriale RS232 per il collegamento alle periferiche. La temperatura operativa di funzionamento è compresa tra -20 e i 55 °C e per funzionare richiede un singolo input di alimentazione da 19 a 30 VDC

Per quanto riguarda invece i moduli di acquisizione (Figura 50), utilizzando il gruppo di cui sopra è possibile disporre di sistemi a slot intercambiabili espressamente adibiti alla ricezione dei segnali analogici (in corrente 4-20 mA o in tensione $\pm 10V$) o di segnali digitali. Questi ultimi necessitano di un contatore che è direttamente implementabile sull'FPGA del C-Rio. Avendo ben definito tutti i sensori necessari per l'allestimento del banco prova, inizialmente tramite i P&ID e successivamente con la ricerca di mercato effettuata, è stato quindi possibile definire la configurazione finale e il numero di moduli da acquistare. Tale configurazione prevede quindi quattro moduli NI9203 per l'ingresso di segnali in corrente 4-20 mA, un modulo NI9201 per ingressi in tensione 0-10 V, un modulo NI9421 dedicato per ingressi digitali impulsivi 24V Sink ed infine un modulo NI9211 con ingresso differenziale specifico per termocoppie per segnali tra 0 e 80mV.



Figura 50: Moduli di acquisizione NI

2.16.2 REALIZZAZIONE CIRCUITALE DEL SISTEMA DI ACQUISIZIONE

I componenti presentati nel paragrafo precedente, necessari per la realizzazione della catena di acquisizione dei dati provenienti dal banco prova hanno portato alla allestimento raffigurato in Figura 51.

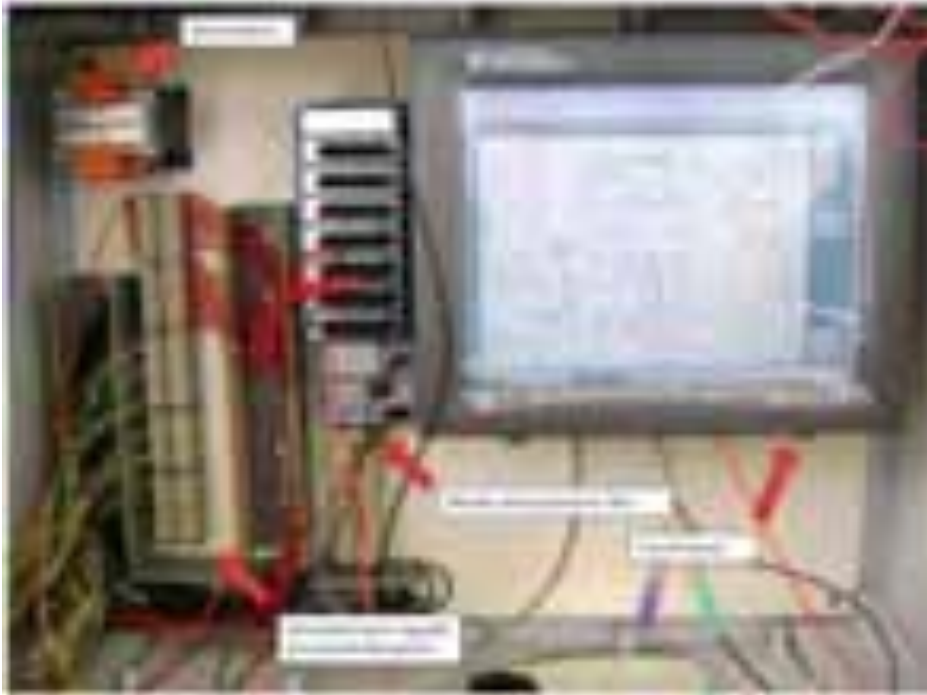


Figura 51: Quadro elettrico di controllo dei sensori realizzato

Dovendo lavorare con sensori che presentano uscite del segnale differenti (sensori di pressione e termocoppie uscita in corrente 4-20 mA; misuratori di portata uscita digitale), è stato necessario concepire i collegamenti elettrici in maniera opportuna da generare il corretto adattamento dei sensori con il sistema di acquisizione. E' stato quindi necessario generare un layout circuitale che permettesse sia l'alimentazione dei singoli sensori che l'opportuna ricezione da parte del sistema di acquisizione del segnale da loro prodotto.

Nota la resistenza interna offerta dai singoli sensori, è stato possibile stimare, conoscendo le tensioni di alimentazione, le rispettive correnti. Una volta ricavate queste sono state inserite, dove necessario, apposite resistenze di protezione che ne limitassero la circolazione così da non danneggiare i sensori.

In Tabella 15 sono riportati i valori delle tensioni di alimentazione e le rispettive impedenze caratteristiche, dichiarate nei singoli datasheet per le varie classi di sensori utilizzati sulla camera.

Sensore	Segnale	Tensione nominale d'alimentazione	Resistenza interna	Corrente massima
Termocoppie	Analogico 4-20 mA	24 V	NA	20 mA
Sensore di pressione	Analogico 4-20 mA	10 V <U< 30 V	$R_{max} = (U - 10)/0.02 - (0.14 * \text{lunghezza cavi m})$	20 mA
Misuratori di portata	Digitale	8,2 V	100 $\Omega \pm 20\%$	50 mA

Tabella 15: Dati tecnici sulle tensioni di alimentazione e sulle impedenze dei trasduttori

Per i sensori che escono con segnali analogici 4-20 mA si è creato quindi un “loop di corrente” che ne permettesse contemporaneamente sia l'alimentazione che il prelievo del segnale acquisito, mentre per quelli con uscita digitale è stato necessario progettare e realizzare un circuito di adattamento in grado di restituire la grandezza in analisi. Maggiori dettagli su tale collegamento sono riportati nei paragrafi successivi. Lo schema circuitale sotto riportato (Figura 52: Schema circuitale dei collegamenti tra i sensori e il sistema di) illustra i collegamenti e gli accorgimenti tecnici che sono stati progettati e realizzati tra singoli componenti del sistema durante questa fase dello sviluppo del progetto, al fine di ottenerne il corretto funzionamento.

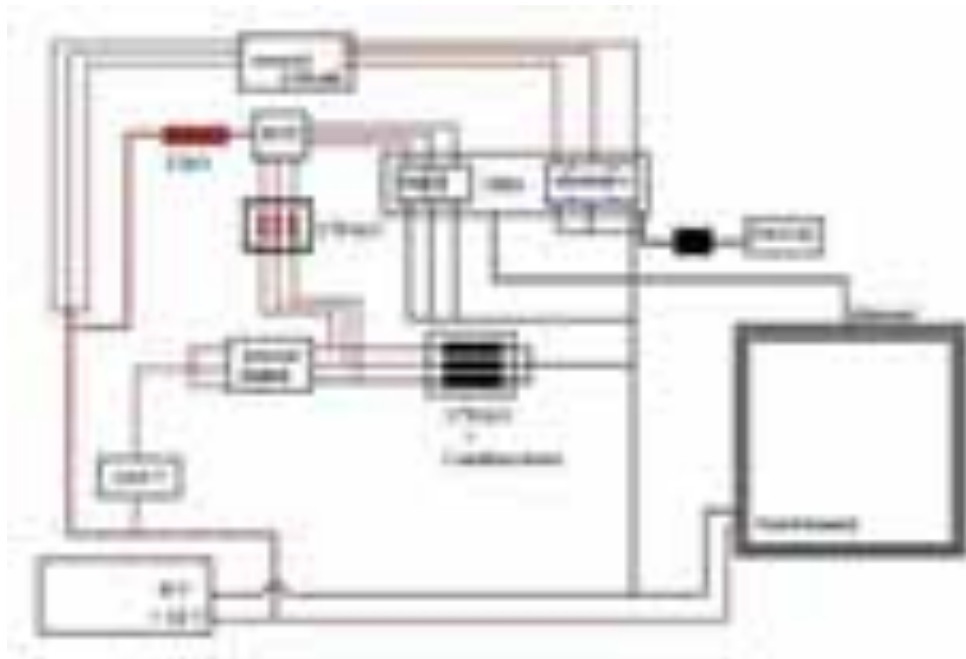


Figura 52: Schema circuitale dei collegamenti tra i sensori e il sistema di acquisizione.

Al fine di gestire in modo sistematico e soprattutto efficiente tutti i sensori disposti sulla camera, è stato necessario definire univocamente la nomenclatura necessaria per l'individuazione di ciascuno dei sensori installati. E' stato quindi

necessario definire i nomi e conseguentemente collegare ciascuno di questi al rispettivo trasduttore installato sul banco prova; fatto ciò, per farli riconoscere al software sviluppato in Labview è stato necessario collegare il tutto al relativo canale di acquisizione dedicato sul modulo National Instruments Compact RIO.

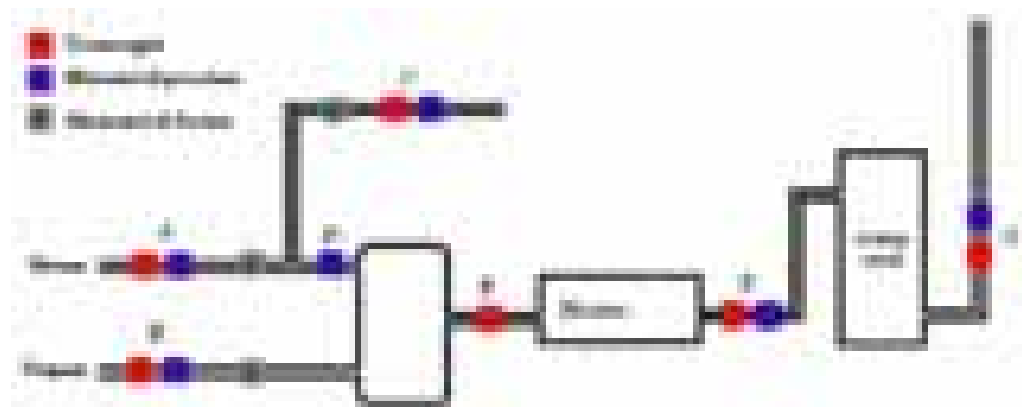


Figura 53: Sensori disposti sulla linea di adduzione dei combustibili tecnici

Le Tabella 16, Tabella 17 e Tabella 18 presentano quanto sopra detto con riferimento alla Figura 53.

Sensori di Temperature			
Fig.16	GAM	Mod. Labview	Compact RIO
A	TC2	T10	M2/ai0
B	TC1	T20	M2/ai1
C	TC3	T30	M2/ai2
D	-	-	-
E	TC5	T50	M2/ai3
F	TC4	T60	M2/ai4
G	TC6	T65	Mod2/ai5

Tabella 16: Definizione sensori di Temperatura

Sensori di Pressione			
Fig.16	GAM	Mod.Labview	Compact Rio
A	TM2	P10	M4/ai4
B	TM1	P20	M4/ai5
C	TM3	P30	M5/ai6
D	TM5	P40	M5/ai7
E	-	-	-
F	TM6	P60	Mod5/ai0
G	TM4	P65	Mod5/ai1

Tabella 17: Definizione sensori di Pressione

Sensori di Portata			
Fig.16	GAM	Mod.Labview	Compact Rio
A	TM2	P10	M1/ctr0
B	TM1	P20	M1/ctr1
C	TM3	P30	M1/ctr2

Tabella 18: Definizione sensori di Portata

E' stato quindi necessario realizzare un diagramma funzionale che permettesse la visualizzazione della sezione di misura e la rispettiva nomenclatura; il passaggio dopo è stato unire tale mappa concettuale con gli indirizzi dei canali effettivamente messi a disposizione dal sistema di acquisizione della National Instruments

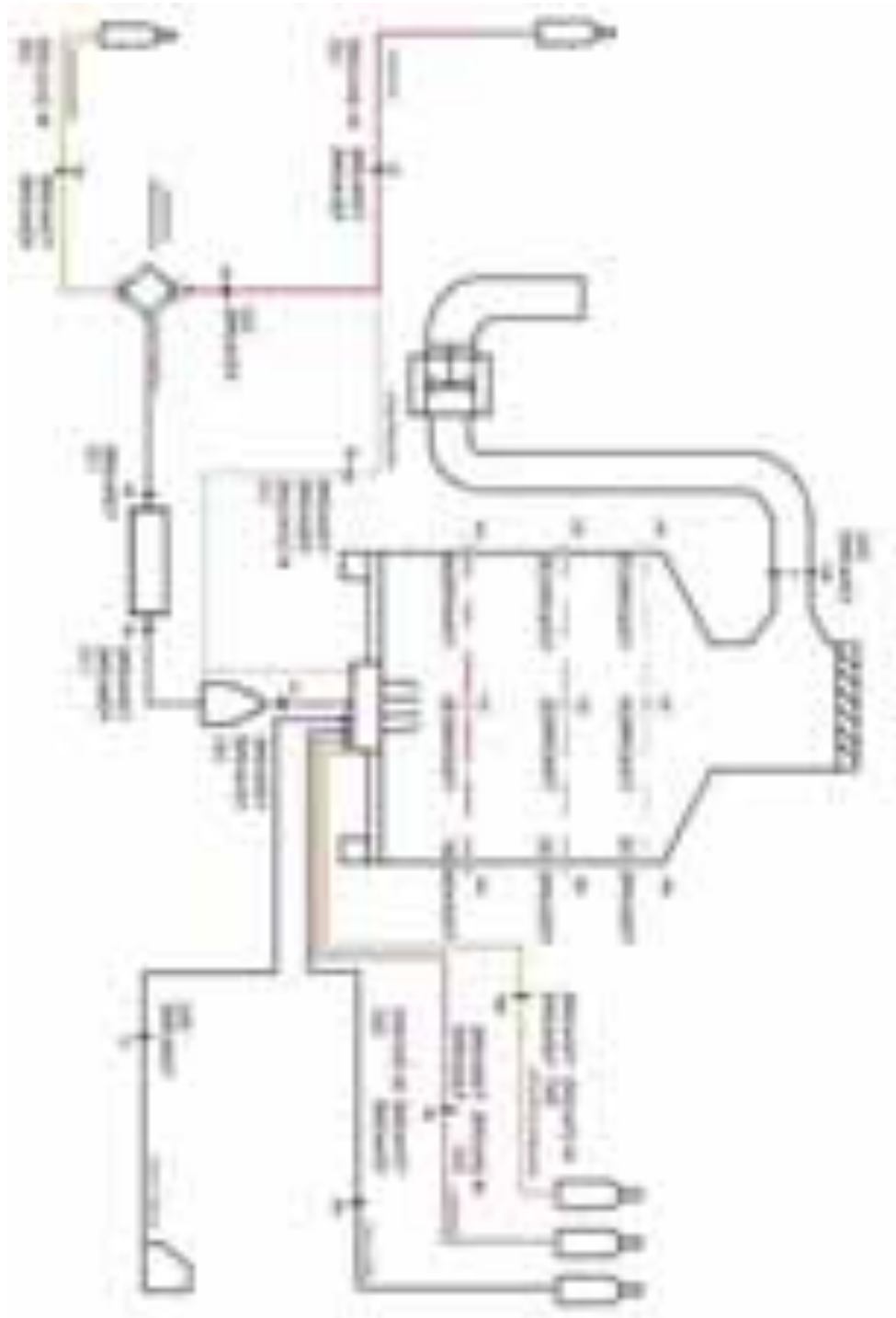


Figura 54: Indice dei canali riferiti ai sensori montati sull'intero banco prova

La Tabella 19 si riferisce quindi alla Figura 54 che mostra il layout complessivo della disposizione dei sensori sulla camera di test e lungo le linee di adduzione dei gas utilizzati per il test di torce industriali.

	Sensore	Canale	Labview	Note:
A	Portata	Mod1/ctr0	M 10	Linea__CH4 main
B	Portata	Mod1/ctr1	M 20	Linea__Propano
C	Portata	Mod1/ctr2	M 30	Linea__CH4 pilot
A	Termocoppia	Mod2/ai0	T 10	Linea__CH4 main
B	Termocoppia	Mod2/ai1	T 20	Linea__Propano
C	Termocoppia	Mod2/ai2	T 30	Linea__CH4 pilot
E	Termocoppia	Mod2/ai3	T 50	Linea Flare__In Heater
F	Termocoppia	Mod2/ai4	T 60	Linea Flare__Out Heater
G	Termocoppia	Mod2/ai5	T 65	Linea__Flare gas
[13]	Termocoppia	Mod2/ai6	T 70	Linea____Vapore
[12]	Termocoppia	Mod2/ai7	T 80	Linea____CO2
[11]	Termocoppia	Mod3/ai0	T 90	Linea____N2
[10]	Termocoppia	Mod3/ai1	T 100	Linea____Air
[3]	Termocoppia	Mod3/ai2	T 110	Corpo____Camera
[6]	Termocoppia	Mod3/ai3	T 111	Corpo____Camera
[9]	Termocoppia	Mod3/ai4	T 112	Corpo____Camera
[2]	Termocoppia	Mod3/ai5	T 120	Corpo____Camera
[5]	Termocoppia	Mod3/ai6	T 121	Corpo____Camera
[8]	Termocoppia	Mod3/ai7	T 122	Corpo____Camera
[1]	Termocoppia	Mod4/ai0	T 130	Corpo____Camera
[4]	Termocoppia	Mod4/ai1	T 131	Corpo____Camera
[7]	Termocoppia	Mod4/ai2	T 132	Corpo____Camera
[14]	Termocoppia	Mod4/ai3	T 140	Uscita__Camera
A	Mis.Pressione	Mod4/ai4	P 10	Linea__CH4 main
B	Mis.Pressione	Mod4/ai5	P 20	Linea__Propano
C	Mis.Pressione	Mod4/ai6	P 30	Linea__CH4 pilot
D	Mis.Pressione	Mod4/ai7	P 40	Camera__mixing
F	Mis.Pressione	Mod5/ai0	P 60	Uscita__riscald
G	Mis.Pressione	Mod5/ai1	P 65	Uscita__waterseal
[12]	Mis.Pressione	Mod5/ai2	P 80	Linea____CO2
[11]	Mis.Pressione	Mod5/ai3	P 90	Linea____N2
[10]	Mis.Pressione	Mod5/ai4	P 100	Linea____Air
[12]	Portata	Mod5/ai5	M 80	Linea____CO2
[11]	Portata	Mod5/ai6	M 90	Linea____N2
[10]	Portata	Mod5/ai7	M 100	Linea____Air

Tabella 19: Lista sensori montati sul sistema

Il sistema di acquisizione realizzato permette quindi l'acquisizione di:

- 4 segnali analogici 0/10 V
- 4 termocoppie con ingresso differenziale 80 mV
- 8 canali digitali con un contatore di impulsi
- 32 canali analogici in corrente 4-20 mA

per un totale complessivo di 48 ingressi sfruttabili. La ripartizione delle porte di comunicazione I/O e dei canali rispettivamente ai sensori scelti è quindi la seguente:

- Termocoppie di tipo K: 10 (Output 4-20 mA)
- Termocoppie di tipo J: 8 (Output 4-20 mA)
- Sensori di pressione: 8 (Output 4-20 mA)
- Sensori di portata: 7 (di cui)
 - 3 gas primari (Impulsi)
 - 3 per gas secondari (Output 4-20 mA)

Avendo concepito la catena di acquisizione dati con la strumentazione di cui sopra, è possibile, sostituendo i moduli, variare tale configurazione lasciando nuove possibilità implementative per il futuro. Sinteticamente, la Tabella 20: Tabella riassuntiva della strumentazione di misura. illustra il piano riassuntivo della strumentazione acquisita per il monitoraggio della camera.

Oggetto	Caratteristiche	Contatto	Quantità
Termocoppie J	- 15 termocoppie tipo J con ogiva - Pozzetto inserimento (uno per termocoppia - 15) - convertitore (-20/300 °C) - riferimento a preventivo 2038 del 29/08	ITALCOPPIE	15
Termocoppie K	- 15 termocoppie tipo K con ogiva - Pozzetto inserimento (uno per termocoppia - 15) - convertitore (-20/1100 °C) - riferimento a preventivo 2038 del 29/08	ITALCOPPIE	15
Trasduttori di pressione	- Modello IS-20 - 1/4" o più piccolo - 0-10 bar , PN10 - Uscita analogica - Antidefragrazione, filettati	Wika	10
Eurotron GreenLine 8000	- Celle elettrochimiche (O ₂ , CO, NO/NO _x , HxCx), sonda prelievo alta temperatura, Pitot, Pompa di Bacharach, Acquisizione dati Atmosferici, Software. - GreenLine8000 - Unità di controllo remota - Software DBGas 2004 Standard - cavo di collegamento RS232 - Certificato di taratura - Cella elettrochimica misura NO ₂ (0-1000 ppm) sensore n° 4 - Cella elettrochimica misura C _x H _y (0-5%) sensore n° 5 in alternativa alla pos. 04. oppure sensore n.6 - Opzione LBH per la misura massica delle emissioni con l'utilizzo di tubo di Pitot di tipo " S " L = 750 mm max 800°C - Sonda prelievo gas a puntale sostituibile + tiraggio (doppio tubo) Ø 10 / L = 750 mm - Cavo di prolunga sonda fumi 6 mt - Pompa manuale per misura nerofumo completa di tabella di comparazione indice di nerofumo e n°. 40 cartine filtro. - Borsa in Vipla per sonda BB880050	EUROTRON	1

Misuratori di portata (linee primarie)	- P4050P200L1 PIST.ROT.: G40/DN50 - PN16-mod:S1-Q=3.2/65mc/h-cs.:ALL-SF Linea metano primaria - P1025P200LX PIST.ROT.: G16IDN25 -PN16-Q=0.5/16mc/h-cs.:ALL-BF Vers.Minl Linea propano primaria -P1625P200LX PIST.ROT.: -G16IDN25·PN16-Q=0.5/16mc/h-cs.:ALL-BF Vers.Minl Linea metano secondaria	ELKRO	3
Valvole regolazione	- portata variabile nel range 40-120 Nm ³ /h; kvs=6,3 (valvola con corpo e attacchi PN16 DN20=790,00€/cad netto) Linea metano primaria - portata variabile nel range 10-50 Nm ³ /h; kvs=4,0 trim a passaggio pieno (valvola con corpo e attacchi PN16 DN15=700,00€/cad netto) Linea propano primaria - portata variabile nel range 4-12 Nm ³ /h; kvs=0,5 (otturatore microflusso) (valvola con corpo e attacchi PN16 DN15=700,00€/cad netto) Linea metano secondaria - controllo a distanza confiltro riduttore Mod. FR20M + n°03 pannellini di comando Mod.354	SPIRAX SARCO	3
Misuratori di portata (linee secondarie) E Valvole regolazione	Misuratori 1. Per CO2 FSM2-PAF101-S08C23B 2. N2 FSM2-PAF101-S083B 3. Aria FSM2-PAF101-S083B Valvole regolazione 1. SCI-8G (x3)	CKD	
Misuratori di portata (uso liquido)	Misuratore di portata di acqua RR campo di misura 0,1-1,5 l/min (RRI -020)	VALCO	1
Sistema per iniezione vapore	Mibe - Modello "HILL INJECTION 8 bar -62 g/min" con copertura in INOX;	MIBE	1
Sistema per iniezione gasolio	Tecnocontrol - Po241 elettropompa x gasolio a pistone oscillante 30 lt/h	TECNOCORI	1
Ugelli per acqua e gasolio	Ugelli Stein - Tecnocori -	TECNOCORI	4
Termocamera	Termocamera nec-avio mod. Advancedthermo tvs-500ex Con sensore microbolometrico vox non raffreddato di ultima generazione e Telecamera nel visibile integrata con funzioni	LMR	1

<p>Sistema Acquisizione</p>	<p>di video mixer. -Range di temperatura : -40°C ÷ +500°C (÷ 2000°C con filtro) Campo spettrale : 8 ÷ 14 µm Risoluzione di temperatura : < 0,05°C - Filtro 2000° - Software Analyser Online - 01NI 9201 8-Channel, 12-Bit, +/-10 VDC, 500 kS/s, Analog Input Module, - 01NI 9211 4-Ch ±80 mV, 14 S/s, 24-Bit Thermocouple Differential Analog Input Module, - 01NI 9421 8-Channel 24 V, 100 us, Sinking Digital Input Module, - 01NI 9203 8-Channel +/-20 mA, 200 kS/s, 16-Bit Analog Input Module , - 04cDAQ-9172 8-slot USB 2.0 Chassis for CompactDAQ, Europe (240 VAC) - 01NI 9915 DIN Rail Kit for 8-slot Chassis, - 01NI 9977 C Series Filler Module. This is a non-functional module to cover empty slots in CompactRIO and CompactDAQ - 01PPC-2115 15" Panel PC with XGA/TFT color touch screen LCD, Windows XP, 1.0 GHz Celeron M 512 MB RAM, and 40 GB HD</p>	<p>National Instruments</p>
--	---	--

Tabella 20: Tabella riassuntiva della strumentazione di misura.

2.17 SVILUPPO DEL SOFTWARE DI ACQUISIZIONE DELLA CAMERA.

Nel presente lavoro di tesi è stato anche sviluppato il software per la lettura in tempo reale dei valori rilevati dai sensori dalla camera. Come strumento di sviluppo del codice, si è scelto di impiegare il linguaggio di programmazione ad interfaccia grafica National Instruments – Labview 7. Tale sistema è in grado di dialogare facilmente con tutti i dispositivi scelti per l'acquisizione del segnale e permette perlopiù un rapido controllo della catena di acquisizione, garantendo pertanto il pieno condizionamento dei segnali in ingresso.

Il software è stato sviluppato seguendo i concetti d'implementabilità indefinita dei canali: questo significa che il programma è predisposto per accogliere in futuro altri punti di misura senza dover alterarne la struttura.

L'interfaccia grafica si divide in 3 schermate di facile accesso che consentono rispettivamente l'importazione del file di input (Figura 55: Schermata di impostazione) e le destinazioni dei salvataggi (singola schermata e storico), la visione del sinottico di tutto il sistema ed infine l'andamento nel tempo delle grandezze monitorizzate.



Figura 55: Schermata di impostazione

Il file di input, la cui struttura è già stata presentata nel paragrafo precedente, è implementabile da editor di testo e tiene in memoria i canali accesi e spenti, i valori del gain e di offset necessari per la taratura dei singoli sensori oltre all'abilitazione della visualizzazione dei grafici in fase di esecuzione del software. Tale architettura logica permette di aggiungere canali – quindi sensori – semplicemente modificando il file d'input piuttosto che riconfigurando a livello di codice l'intero software, richiedendo quindi consistenti modifiche. La peculiarità del software sviluppato è quindi quella di essere un sistema all'interno del quale i singoli sensori risultano attivabili e configurabili (in termini di gain e off set) da un file di configurazione esterno, che in quanto tale è facilmente riconfigurabile. Questo permette l'eventuale sostituzione di uno dei 32 trasduttori installati, con eventuale cambio di tecnologia, senza dover necessariamente riprogettare nessuna parte del codice del software. La sostituzione di due componenti che si sono rotti durante le attività di prima sperimentazione, ha fatto sì che tale peculiarità fosse sfruttata operativamente, garantendo un notevole risparmio di tempo.

Il quadro sinottico si presenta come in

Figura 56: Schermata del quadro sinottico del banco e permette di visualizzare contemporaneamente tutte le grandezze significative della camera di test.

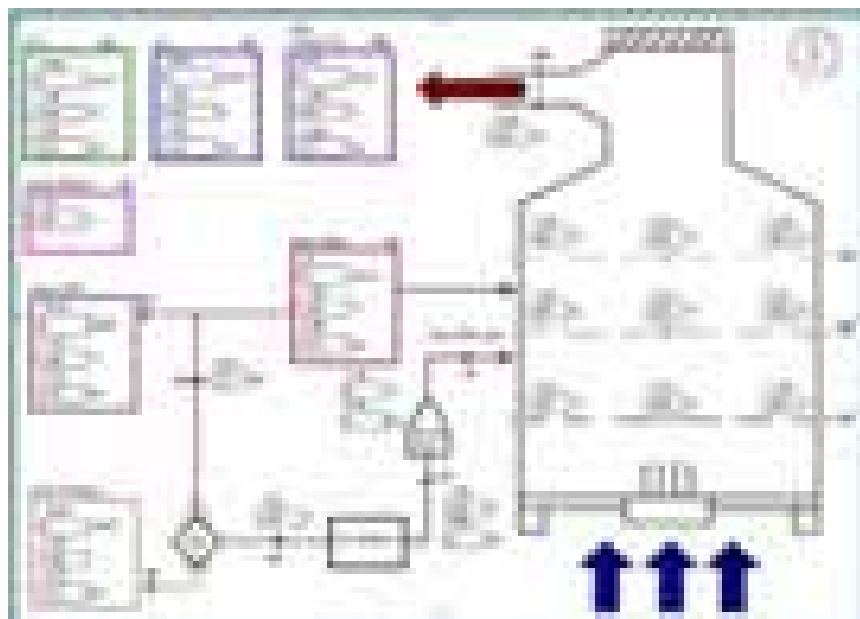


Figura 56: Schermata del quadro sinottico del banco



Figura 57: Schermata per la visualizzazione delle grandezze misurate

In Figura 57 invece sono riportati i piani cartesiani sui quali è possibile registrare e visualizzare l'andamento registrato durante l'intera fase di funzionamento del banco di alcune grandezze tra quelli disponibili. La selezione delle grandezze da monitorizzare avviene tramite il file di configurazione iniziale. In output il sistema permette di salvare su file di testo con formattazione precompilata, sia delle istantanee con tutti i valori visibili sul sinottico al momento della richiesta di salvataggio, sia lo storico delle grandezze che si è precedentemente imposto di visualizzare sui grafici di Figura 57.

Il PPC National Instruments permette quindi di salvataggio dei file registrati durante il funzionamento del banco sulla propria memoria interna; questi possono essere posteramente esportati tramite memorie removibili via USB o con trasferimento dati telematica sfruttando la porta Ethernet.

Infine, a chiusura delle attività di messa a punto del software di controllo e registrazione dei dati sulla camera e sullo skid, sono state apportate alcune modifiche funzionali all'interfaccia del sistema, permettendone una migliore fruibilità e utilizzabilità dello stesso. In particolare sono state risolte alcune criticità legate alla corretta registrazione e allocazione dei dati misurati all'interno dei file di archiviazione che si presentano con delle architetture standard in grado di facilitare la fase di post processo e analisi. L'interfaccia

finale del sinottico si presenta quindi con una zona di registrazione dei valori acquisiti esternamente (Figura 58) e con un quadro di visualizzazione di tutti i punti di misura attivi.



Figura 58: Interfaccia di impostazione e registrazione dati del sinottico

Sul quadro sinottico e quindi anche nel file di output, sono stati predisposti degli spazi da compilare a valle della lettura effettuata con la strumentazione portatile per la registrazione dei valori della temperatura e della pressione ambiente, nonché dei valori delle concentrazioni delle specie inquinanti. I campi dedicati agli inquinanti vanno inseriti manualmente in funzione delle registrazioni effettuate con il sistema di rilevamento appositamente acquistato per l'attività previste nel progetto.

Tra le funzioni aggiuntive del software implementate in questa fase del progetto, c'è anche un sistema automatico di conteggio del combustibile consumato. Sfruttando l'input dei misuratori di portata, nel programma è stato implementato anche un contatore che permette la valutazione del volume complessivo di metano asportato dal sistema di stoccaggio e consumato in torcia, così da garantire sempre la stima dei quantitativi di gas ancora disponibili.

Questa funzione permette agli operatori di avere una valutazione quantificabile della durata del test, in funzione del combustibile ancora disponibile all'interno dei serbatoi di stoccaggio.

Il sinottico, per quanto sviluppato principalmente per la camera di prova a terra, è utilizzabile anche per il monitoraggio del Derrick in aria libera, in quanto si appoggia agli stessi sensori montati sullo Skid di controllo.

2.18 ALLESTIMENTO DELLO SKID PER IL CONTROLLO DELLE LINEE

A compendio dei due banchi realizzati, al fine di garantirne una facile gestione, il progetto ha previsto la realizzazione di un punto di raccordo impiantistico che permettesse il raggruppamento di tutte le sezioni di misura e di regolazione delle portate dei gas immessi sulla torcia. Tale sistema prende il nome tecnico di “Skid”; la struttura prevede un telaio metallico di supporto per le tubazioni, che permetta in uno spazio contenuto di contenere e controllare agilmente tutte le linee principali di adduzione dei combustibili necessari per l'accensione della camera. Assieme a questo, dovendo allestire un ambiente operativo e riparato per protezione alla strumentazione inserita, è stata allestita una gabbia di protezione con copertura. In questo modo è stato possibile ottenere un piccolo locale attrezzato per l'ispezione delle linee e al contempo permetterne la regolazione dei flussi tramite azione diretta sulle valvole.

All'interno dello skid è stato scelto di posizionare sia i quadri di controllo delle valvole pneumatiche, gli azionamenti dei dispositivi come il generatore di vapore o l'iniettore di gasolio. L'unico blocco che non è stato previsto con inserimento diretto dentro a tale struttura è l'intero sistema di acquisizione dei sensori montati sulla camera e il Touch Panel per il monitoraggio delle grandezze e il prelievo dei dati. Tale scelta, come previsto dalla normativa ATEX per la sicurezza, nasce dalla necessità di separare i dispositivi che prevedono collegamenti elettrici dalle zone di passaggio dei gas tecnici, così da evitare potenziali rischi di deflagrazione a causa di possibili scintille accidentali.

Il progetto ha previsto quindi di dislocare la strumentazione per la catena di acquisizione direttamente all'interno di un piccolo ambiente in muratura, così da generare un riparo sia per la componentistica elettronica avanzata che per gli operatori che lavorano sul banco.

La struttura dello Skid permette l'alloggiamento dei seguenti componenti:

- Linea metano con derivazione per i piloti e allacciamento, previsto di gruppo riduzione, da bombola di stoccaggio standard (8 l a 200bar).
- Linea propano con allacciamento, previsto di gruppo riduzione, da serbatoio interrato. La linea serve sia il banco prova scalato che il derrick da 22m.

- Linea di derivazione per il combustibile della fiamma pilota.
- Accesso ai sensori disposti lungo le linee: termocoppie, misuratori pressione, misuratori di portata.
- Scatola elettrica di raccordo e alimentazione della sensoristica installata
- Camera di miscelamento a due componenti.
- Scambiatore acqua/gas a fasci tubieri per il preriscaldamento dei gas.
- Alloggiamento della caldaietta per il riscaldamento dell'acqua da inserire nello scambiatore acqua/gas di condizionamento del tail gas.
- Pompa di iniezione del gasolio.

In Figura 59 sono riportati i disegni costruttivi preliminari dell'allestimento realizzato.

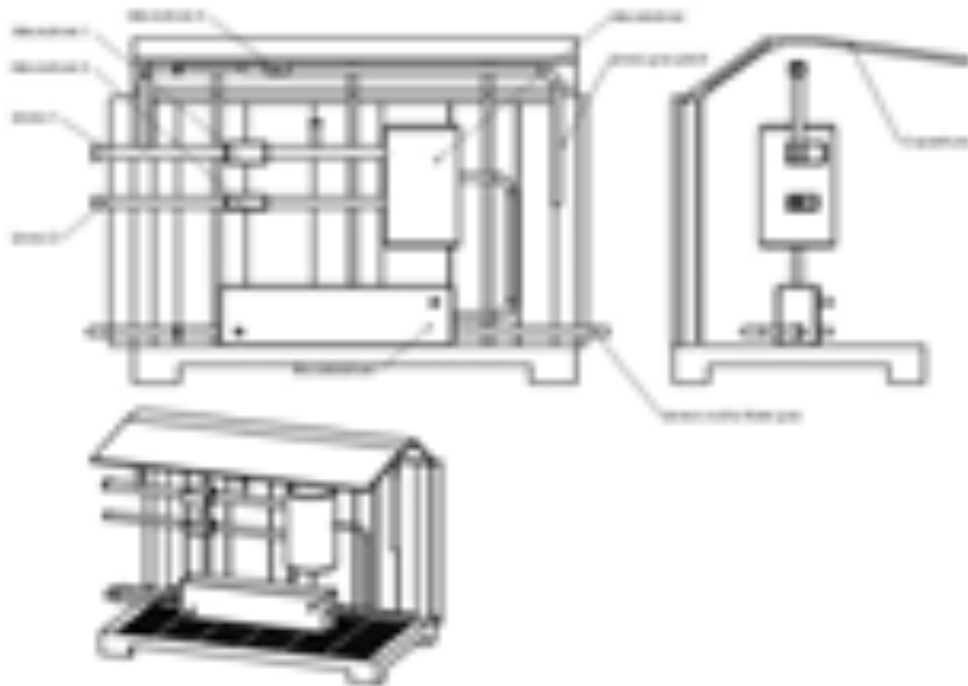


Figura 59: Immagine illustrativa dello Skid e dei componenti inseriti su di esso.

La Figura 60 illustra fotograficamente invece il primo allestimento dello Skid e dei componenti su di esso inseriti realizzato durante questa fase del lavoro.

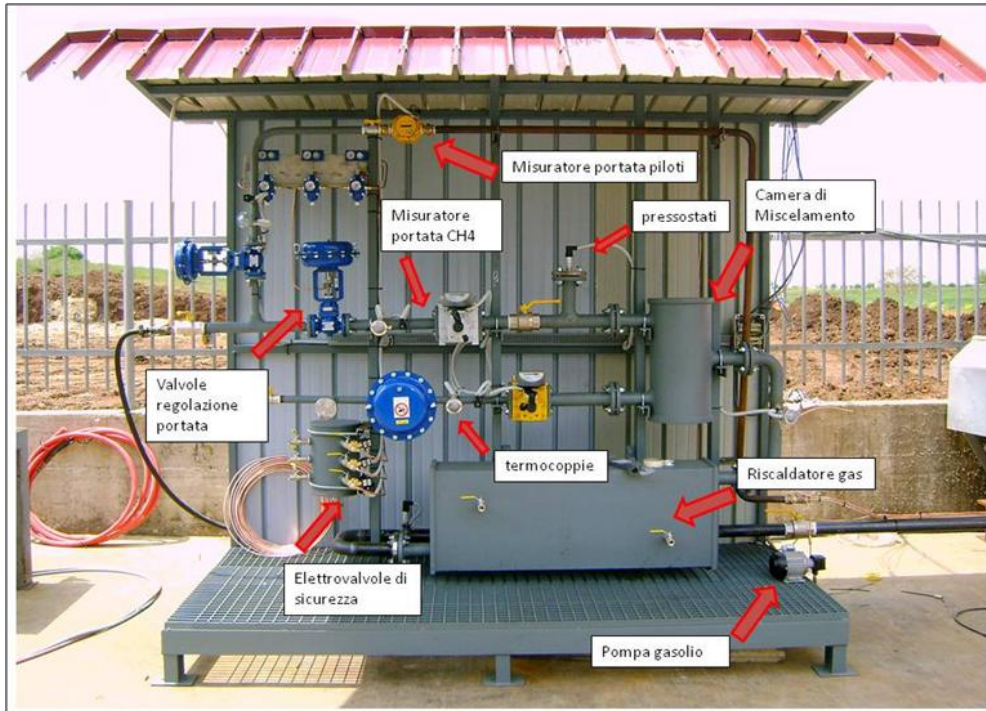


Figura 60: Primo allestimento dello skid per la gestione dei banchi prova

Come facilmente visibile dalla figura sopra riportata, tale struttura presenta un ingombro indicativo di 3x1,5x2,5m, permettendo quindi un raggruppamento funzionale di tutti i sensori dislocati sulle linee primarie e garantendo peraltro una facile accessibilità. Le linee sono provviste di attacchi per gli stoccaggi del metano e del propano. La configurazione con la quale i gas tecnici vengono condotti prima al sistema di miscelamento e poi al riscaldatore è quella riportata in Figura 62.

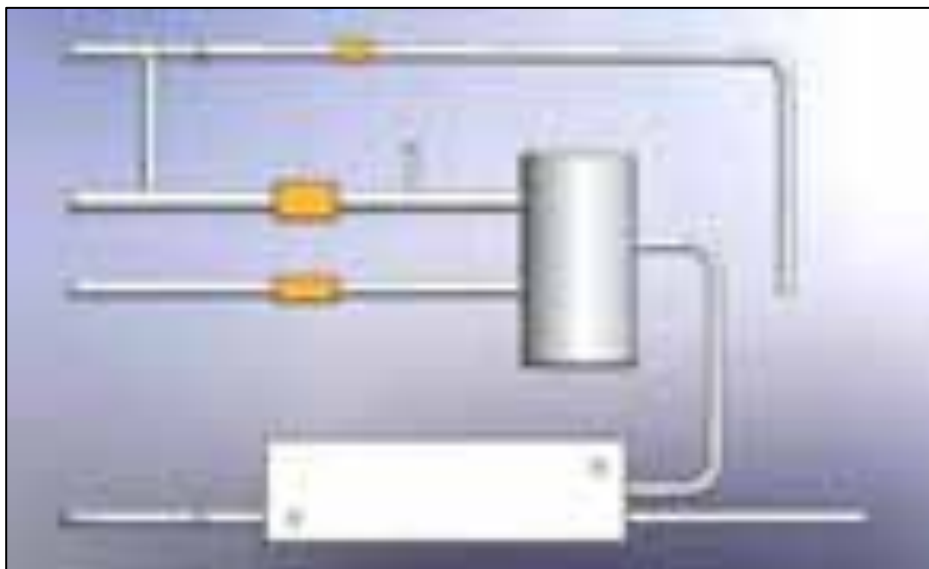


Figura 61: Modello CAD delle linee di adduzione dei gas tecnici

Si è ritenuto quindi necessario definire le logiche di attuazione del sistema di azionamento e accensione della camera. Per una migliore descrizione della gestione delle linee, si fa riferimento allo schema riportato in Figura 62.

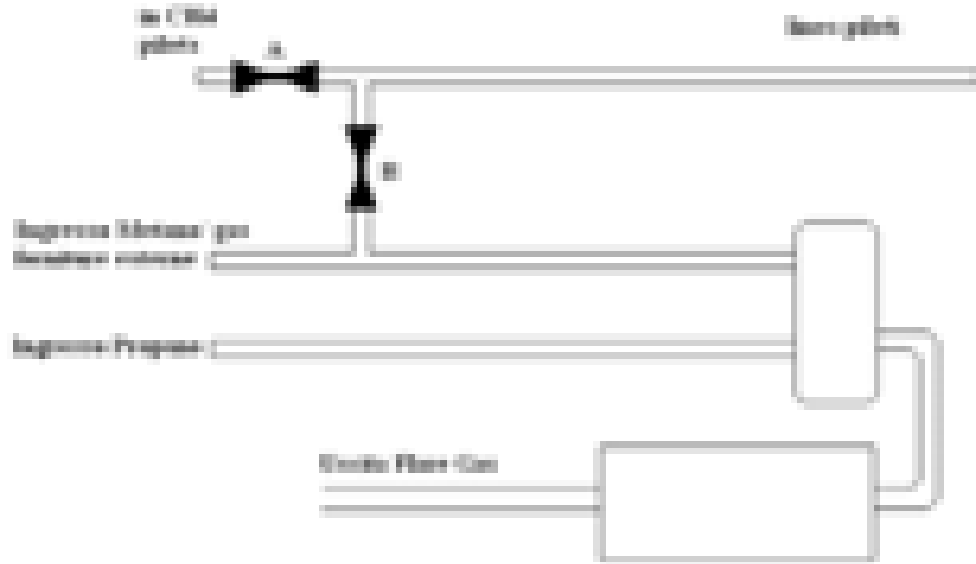


Figura 62: Schema concettuale della distribuzione delle linee di adduzione dei gas tecnici.

Al fine di sfruttare operativamente le linee predisposte per differenti tipi di impiego della camera, sono state così definite due condizioni di funzionamento:

Configurazione 1: Utilizzo di gas metano sulla linea primaria miscelato con propano sulla linea secondaria.

Configurazione 2: Utilizzo di gas tecnici forniti esternamente sulla linea primaria, propano sulla linea secondaria e metano per l'alimentazione dei piloti.

La configurazione 1 (Figura 63) utilizza contemporaneamente il gas metano che viene immesso nella linea primaria al fine di generare il Flare gas anche per alimentare i piloti di accensione e sostentamento della fiamma. Tale schema di funzionamento prevede che la valvola A sia chiusa mentre la B permetta il flusso del CH₄ contemporaneamente su entrambe le linee. Tale configurazione verrà usata nel caso non si disponga di miscele di gas da torcia specifici (che come già detto dovranno essere forniti da possibili clienti che abbiano delle attività industriali con produzione di efflussi gassosi da smaltire) e si voglia

comunque utilizzare il sistema per effettuare delle prove sperimentali di dimensionamento su teste per torce industriali.

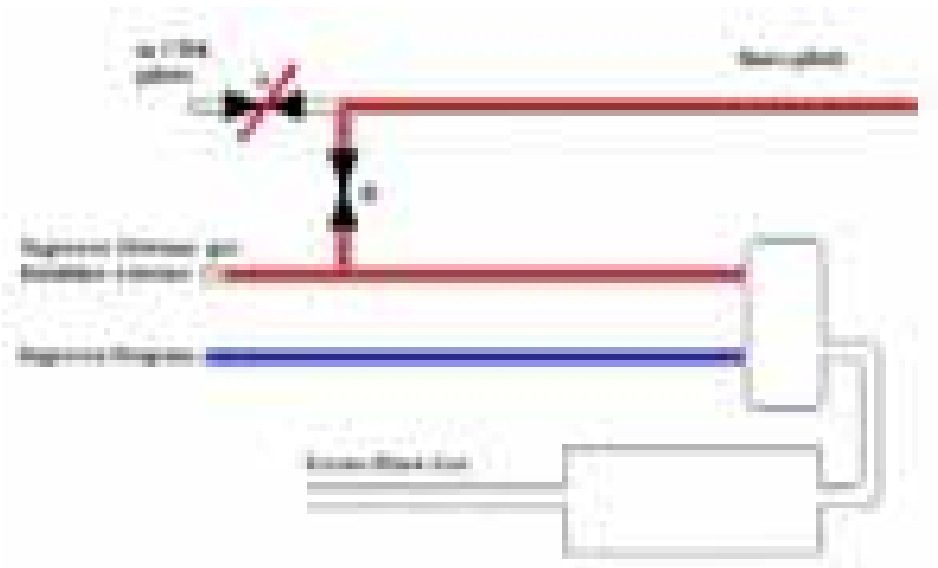


Figura 63: Configurazione 2 di funzionamento con alimentazione a metano e propano

Il dimensionamento del banco è stato fatto considerando il metano come componente fondamentale della miscela del Flaregas. I misuratori di portata inseriti sulle linee in questione sono stati scelti in maniera tale da avere capacità di lettura diversa a seconda dell'importanza delle linee: quello disposto sulla linea primaria – ingresso metano/gas forniture esterne – presenta un range operativo compreso tra i 3.2 e 65 m³/h, mentre quelli della linea propano e dei piloti vanno da 0.5 a 16 m³/h. Una trattazione più approfondita di tali dispositivi verrà effettuata nei paragrafi successivi.

La seconda configurazione prevede invece il caso in cui sia disponibile del gas di processo che deve essere bruciato in torcia (proveniente da altiforni per la produzione dell'acciaio o da processi di raffinazione chimica) sul quale si vogliono effettuare degli studi al fine di realizzare una torcia ottimizzata; tramite l'allestimento dello skid secondo lo schema di progetto sopra riportato, il banco è predisposto per poter gestire anche tale eventualità. In maniera diversa a quanto presentato nel caso precedente, con riferimento alla Figura 64, il sistema può quindi essere alimentato contemporaneamente con tre forniture distinte di combustibile tecnico.

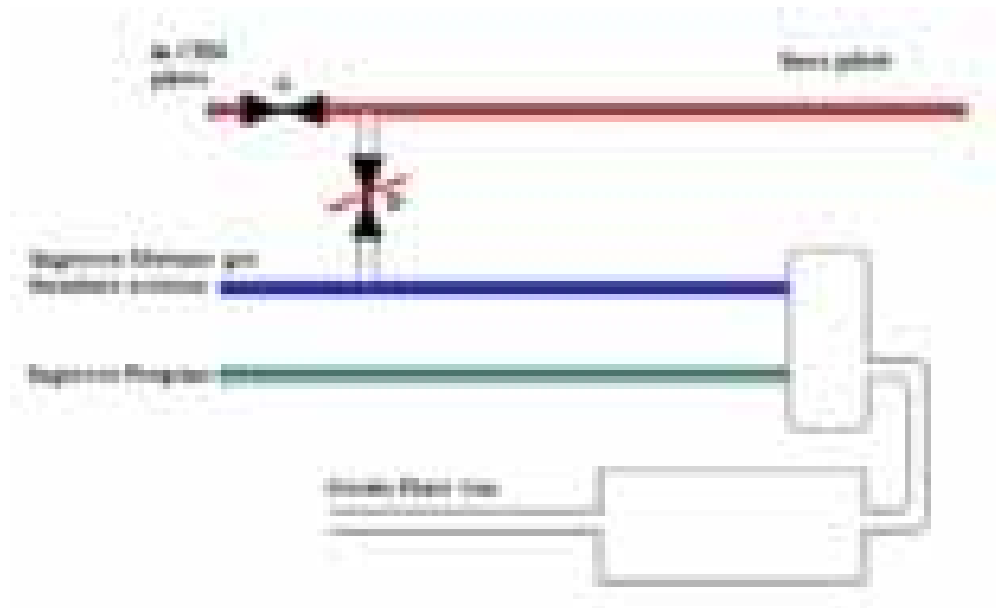
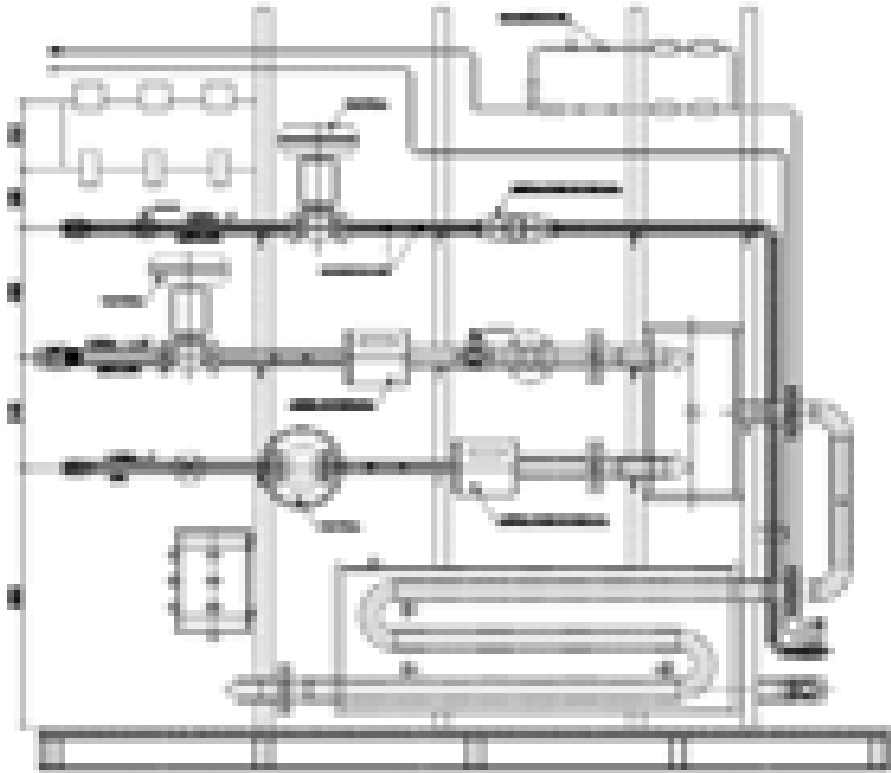


Figura 64: Condizione di funzionamento con alimentazione a Flare gas

Come dallo schema di cui sopra, chiudendo la valvola B e aprendo quella A, si ottengono tre linee separate che dovranno essere alimentate indipendentemente: quella dei piloti prevedrà un aggancio per lo stoccaggio del metano, la primaria verrà alimentata con il gas di processo fornito che verrà eventualmente miscelato con un secondo componente inserito lungo la linea adibita inizialmente al propano.

Al fine di ottenere una buona sperimentazione per la produzione di torce innovative, si è previsto che il banco, almeno nella fase iniziale di progettazione delle geometrie scalate, fosse in grado di lavorare fondamentalmente con la configurazione illustrata nella condizione 1. Quanto invece predisposto nella condizione 2 risulterà importante in un secondo momento, ovvero quando l'azienda sarà in grado di utilizzare il banco fornendo progettazione su misura di fronte a specifiche richieste del cliente; con tale configurazione il sistema permetterà tipicamente di validare il funzionamento dei bruciatori messi utilizzando direttamente i combustibili che devono essere smaltiti, provenienti direttamente dalle lavorazioni industriali di processo.

Complessivamente, per quanto riguarda quindi l'allestimento dei sistemi di regolazione allocati direttamente sullo skid, la configurazione impiantistica definitiva è quella presentata in Figura 65.



Quadro di controllo delle valvole di regolazione della portata

Figura 65: Schema progettuale e realizzazione dello Skid

La struttura esterna dello skid, anch'essa realizzata durante lo svolgimento del progetto, presenta delle paratie apribili con serratura di sicurezza, in lamiera ondulata così da ricavare una protezione per il sistema di regolazione delle linee. Nello specifico, come riportato nell'immagine di cui sopra, le linee azionate direttamente tramite le valvole a controllo pneumatico sono quelle di adduzione del metano per la linea primaria, per il pilota, e quella di adduzione del GPL.

Il layout della sensoristica installata sullo skid, che verrà discussa nel dettaglio nei paragrafi successivi, in accordo con quanto predisposto sui P&ID è mostrata nel dettaglio in Figura 66.

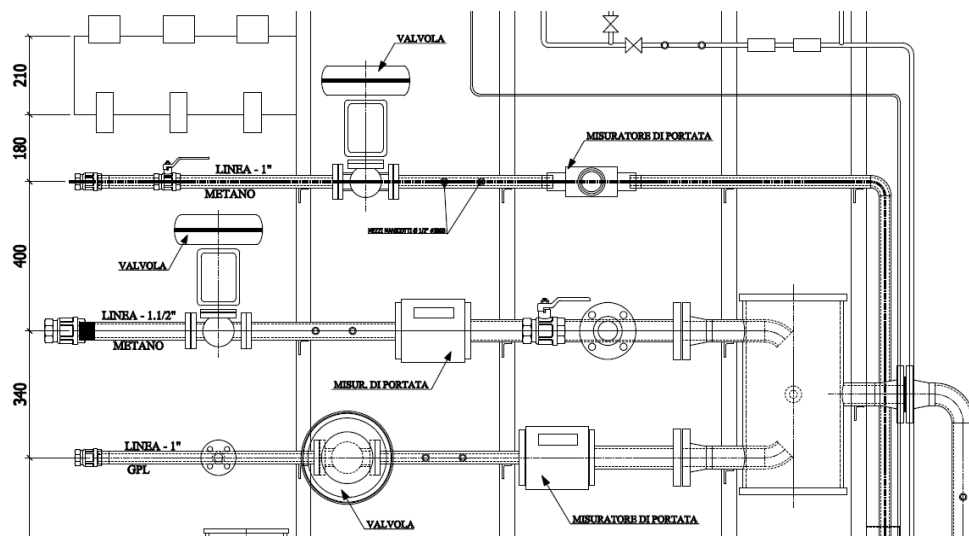


Figura 66: Layout della sensoristica installata sullo Skid

2.19 REALIZZAZIONE DEI SISTEMI DI ALLOGGIAMENTO DELLE TORCE SCALATE

Al fine di poter effettuare simulazioni utilizzando prototipi di teste di torcia con differenti geometrie, è stato pensato di sviluppare un sistema che fosse facilmente removibile; in virtù di questo si è optato di utilizzare componenti flangiati che permettessero un rapido smontaggio. Il basamento del tronco centrale dal quale emerge la torcia è fatto in cemento così da non esporre direttamente le tubazioni di adduzione dei combustibili e degli ausiliari all'irraggiamento della fiamma stessa, evitando rischi di surriscaldamento.

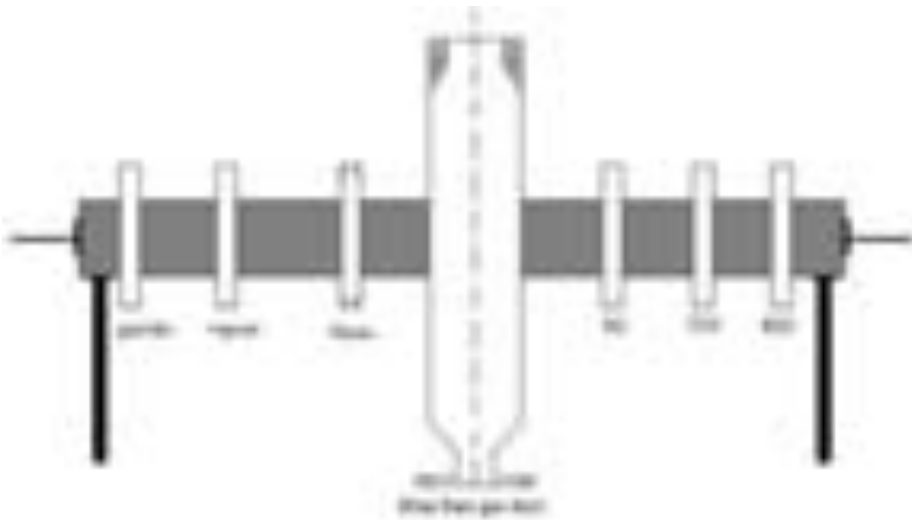


Figura 67: Blocco di fissaggio della torcia

Il blocco di fissaggio della torcia (Figura 68) è basato su un corpo centrale in cui è ricavato un canale principale nel quale viene alimentata una miscela di metano, propano e altri gas combustibili in proporzioni regolabili a seconda del tipo di tail gas del quale si intende studiare la combustione. Il sistema prevede anche una serie di canali secondari ai quali vengono collegate tramite flange di raccordo le linee di adduzione dei gas inerti, del vapore e delle altre sostanze non combustibili necessarie a riprodurre l'esatta composizione dei vari tipi di tail gas. Per l'innescio del sistema pilota, sul traliccio è stato previsto anche un sistema di accensione ad arco voltaico dotato di rilevatore di fiamma con sensore ad infrarossi. Quest'ultimo dispositivo interrompe l'alimentazione elettrica all'arco qualora rilevi l'accensione della fiamma.

Al centro della camera del banco di studio a dimensioni ridotte è stata prevista una struttura in tralicci metallici ad incrocio quadrato atta a sostenere il

basamento di alloggio della testa e dei relativi canali secondari. Le sezioni di tubo presenti nel basamento sono state flangiate su entrambe le estremità in modo da permettere un montaggio/smontaggio facile delle teste e delle mandate delle singole linee (Figura 68/Figura 67).

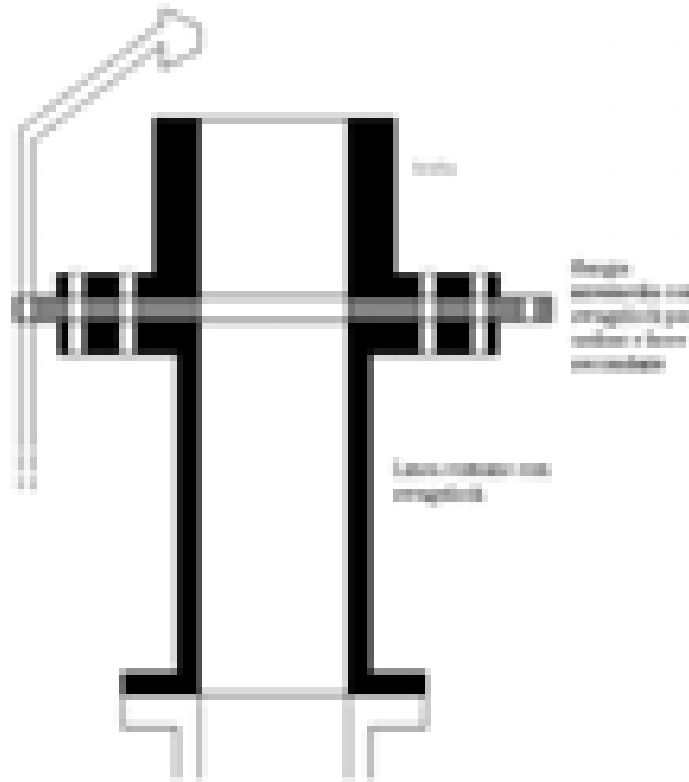


Figura 68: Flangia di montaggio delle teste

In prossimità delle travi strutturali poste esternamente alla camera, si è pensato di creare dei punti raggruppati di aggancio delle linee. Dalla parte centrale della camera fino ai punti di aggancio, le tubature (che passeranno sotto la camera a livello del suolo) sono state coibentate in modo analogo a quanto già è stato fatto nel rivestimento delle pareti della camera. Le tubature sottostanti non sono state completamente rivestite col coibentante, ma si è pensato di lasciare un passaggio per l'aria (sfiato)- sulla zona inferiore – in modo da evitare rischi di deflagrazione dati da possibili accumuli generati da eventuali perdite lungo le linee.

Il basamento progettato prevede una disposizione radiale rispetto allo sbocco del flare gas delle linee dei gas inerti, del vapore, dell'acqua e del gasolio; queste vengono quindi collegate, tramite una flangia filettata, con le tubazioni

provenienti dai singoli serbatoi di stoccaggio o dalle condotte di alimentazione. In Figura 69 viene riportata la vista in pianta di tale disposizione sul basamento.

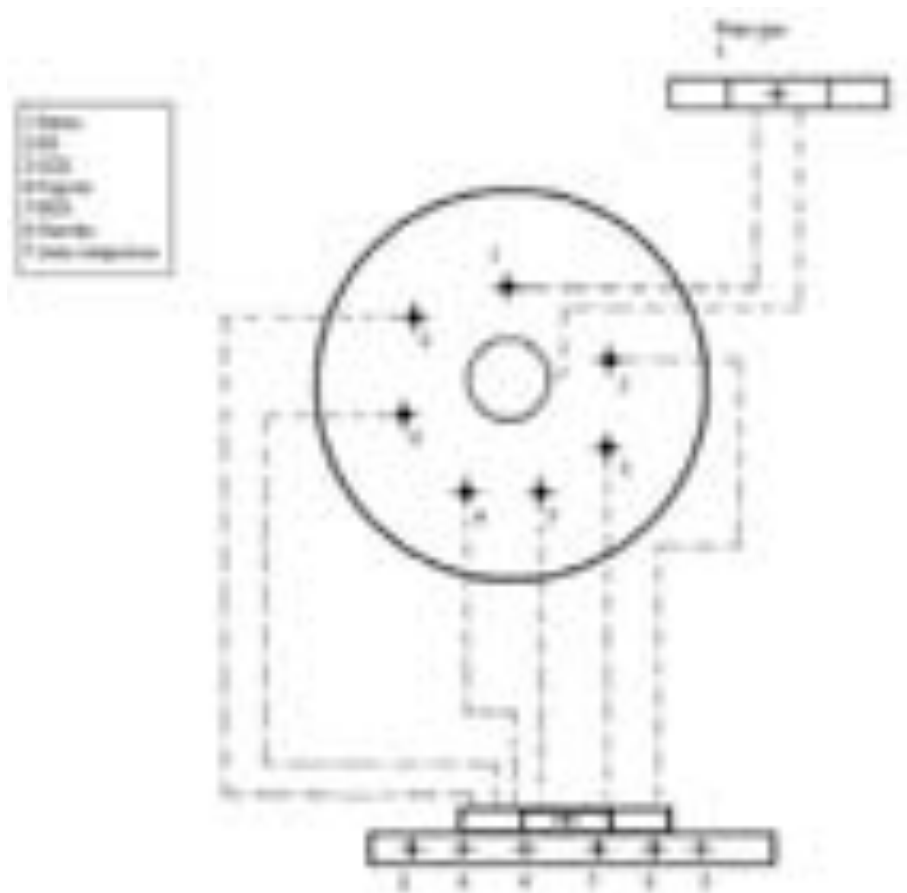


Figura 69: Disposizione della testa principale e delle uscite secondarie

Alla luce delle prove di prima accensione, comparando i risultati sperimentali ottenuti con gli strumenti di analisi computazionali messi a punto, è stato necessario ottimizzare la configurazione del punto di aggancio delle teste all'interno del banco prova. In particolare è stata riprogettata la piastra di ancoraggio, opportunamente predisposta per il raggruppamento e l'uscita dei canali di adduzione degli ausiliari.

Le prove sperimentali effettuate durante la prima accensione hanno mostrato come il primo prototipo di pilota presentasse alcune inadeguatezze rispetto alla torcia stessa: in particolare la fiamma da esso generata, essendo di natura diffusiva, oltre a produrre un allungamento eccessivo di quella prodotta dalla testa, non avrebbe permesso nemmeno una riduzione di alcune specie inquinanti come previsto dal progetto. Con la riprogettazione del pilota, garantendo così un

fenomeno di combustione fondamentalmente premiscelato, avvalendosi dell'utilizzo dei modelli di simulazione numerica sviluppati presso il Dipartimento di Energetica, sono state ottimizzate le distanze tra il punto di applicazione del pilota e la sezione di ancoraggio della fiamma prodotta dal flare gas.



Figura 70: Disegno realizzativo finale della piastra di ancoraggio delle teste scalate

Gli schemi di Figura 70 mostrano i disegni esecutivi sia della piastra finale di supporto inserita all'interno della camera di test, mentre quelli di Figura 71, i costruttivi realizzati per la fase di accoppiamento testa/pilota.

La distanza di interasse ottimale stimata tra la bocca del pilota e la testa scalata della torcia è di 270mm. L'angolo di inclinazione ottimale del pilota è risultato invece di 50° rispetto alla piastra di ancoraggio. Tra la linea di adduzione e la testa della torcia, è stata realizzata una sezione di raccordo flangiata che permette l'ancoraggio sulla piastra.

La foto riportata in Figura 72 illustra il gruppo pilota/testa fisicamente montati nella configurazione definitiva sulla piastra di supporto.

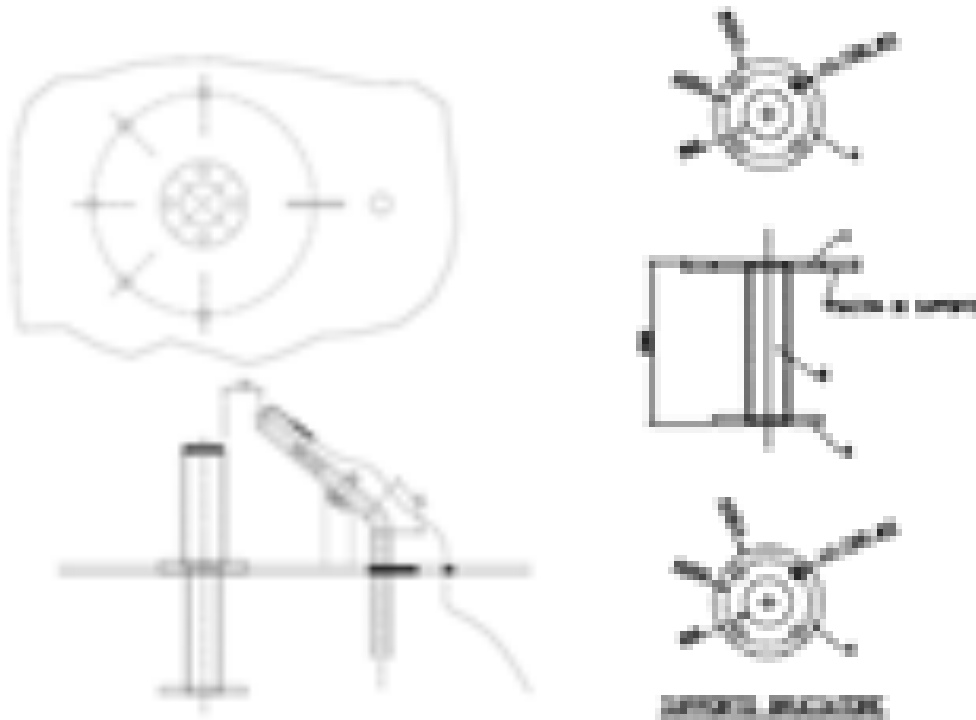


Figura 71: Disegni costruttivi piastra, flangia di raccordo e accoppiamento pilota/testa



Figura 72: Verifica della corretta installazione secondo le specifiche imposte.

Particolare attenzione è stata posta anche alla disposizione delle linee sulla parte inferiore della piastra in maniera da garantire il massimo della schermatura per evitare problemi di surriscaldamento causati dall'irraggiamento diretto e facilità di allestimento per le operazioni di manutenzione. In Figura 73 sono visibili le linee di adduzione del flare gas, degli ausiliari e dell'alimentazione necessaria a generare la scintilla per l'innesco del pilota.



Figura 73: Particolare delle terminazioni delle linee di adduzione dei gas e del supporto di collegamento piastra

In Figura 74 si riporta un'immagine delle fasi di montaggio di una testa per flare gas e delle tubazioni di adduzione dei gas inerti, del vapore e del gasolio.



Figura 74: Montaggio di un prototipo di testa sulla piastra

2.20 PROGETTAZIONE DEL SISTEMA DI MISCELAMENTO E DEL WATERSEAL

Il flare gas, come descritto in precedenza, è assimilabile come composizione a una miscela di metano e propano in misura variabile. Per effettuare la sperimentazione sulle teste delle torce, è stato pertanto necessario realizzare un dispositivo permettesse il miscelamento dei combustibili tecnici provenienti dalle di adduzione. I criteri sui quali è stata quindi realizzata tale camera di mixing sono stati i seguenti:

- ottenere una miscelazione ottimale delle concentrazioni dei componenti che partecipano alla formazione del flare gas;
- contenere il tempo di risposta del sistema alle variazioni delle singole portate nell'ottica di evitare, durante le fasi sperimentali, periodi di accensione lunghi necessari a garantire l'uniformità del flusso del flare gas in seguito alla regolazione del sistema. Tale accorgimento permette di evitare che dal momento nel quale viene effettuata una variazione di portata attraverso il sistema di regolazione a quando questa è effettivamente vista dalla torcia, non passi un periodo di tempo eccessivamente lungo.

Inizialmente sono stati valutati tre differenti tipi di miscelatore, di cui si è in conclusione deciso di svilupparne solamente il terzo in fase di realizzazione del banco. Il primo avrebbe previsto un volume cilindrico con dei setti di separazione traforati che migliorassero gli effetti di mixing tra i due gas che compongono la miscela per il flare gas. Un suo schema è riportato in Figura 75: Schema di concetto del primo dispositivo di miscelamento.

In seconda battuta si è pensato quindi di utilizzare un volume cilindrico al cui interno i due getti di combustibile entranti risultassero posizionati opportunamente (con immissione semi tangenziale ad Y) per favorire lo spontaneo miscelamento delle composizioni, diminuendo così la complessità realizzativa del componente. Il volume dimensionato è stato quindi calcolato di dimensioni sufficienti a permettere un buon livello di miscelamento dei due combustibili senza dover complicare eccessivamente le geometrie interne da realizzare. Per ridurre gli effetti gravitazionali, evitando il depositarsi sulla base della camera del gas più pesante, si è pensato di disporre la camera di

miscelamento per orizzontale. Le linee di ingresso sono state munite di valvola di non ritorno e riduttore di pressione. La linea di uscita invece è stata provvista di un misuratore di pressione. Un altro accorgimento costruttivo valutato in fase di progettazione, ha previsto che le zone laterali della camera fossero leggermente bombate per evitare eventuali punti di accumulo delle tensioni.

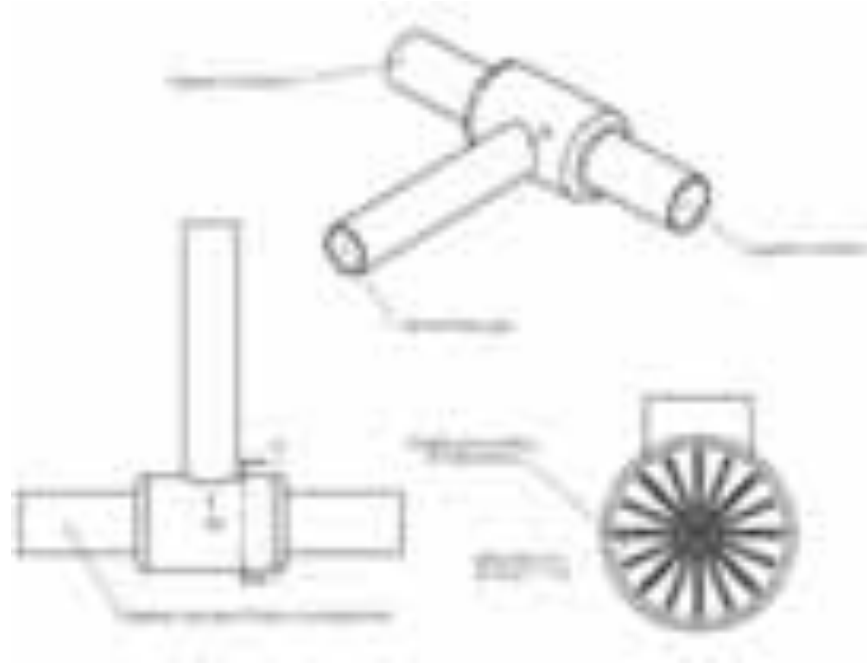


Figura 75: Schema di concetto del primo dispositivo di miscelamento

Nella Figura 76 si riporta invece, delle tre soluzioni studiate, lo schema del secondo dispositivo di miscelamento valutato.

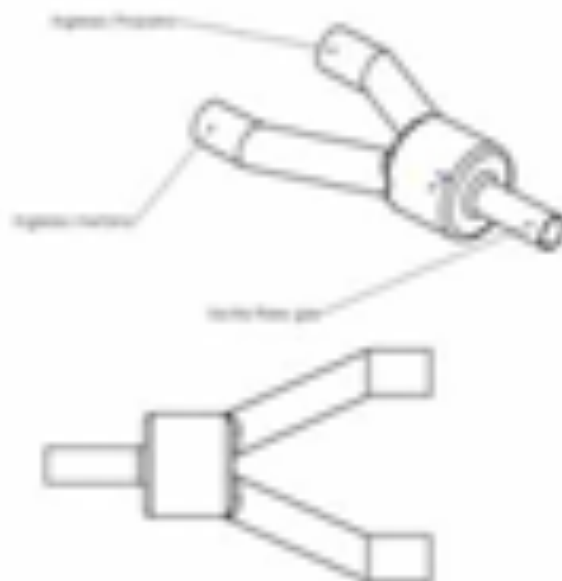


Figura 76: Schema di concetto del secondo dispositivo di miscelamento studiato

Il terzo livello di progettazione del dispositivo di miscelamento ha di fatto unito la semplicità realizzativa di quello presentato in

Figura 76 con gli accorgimenti tecnici individuati dalla valutazione complessiva del componente. La camera realizzata è quindi composta da un corpo cilindrico (Figura 77), al cui interno vengono immessi in maniera ortogonale all'asse di sviluppo, i canali di adduzione delle due linee primarie. Avendo dimensionato opportunamente i volumi in gioco e le velocità di ingresso alla camera, è stato possibile quindi realizzare un sistema che rispondesse ai requisiti inizialmente dichiarati.

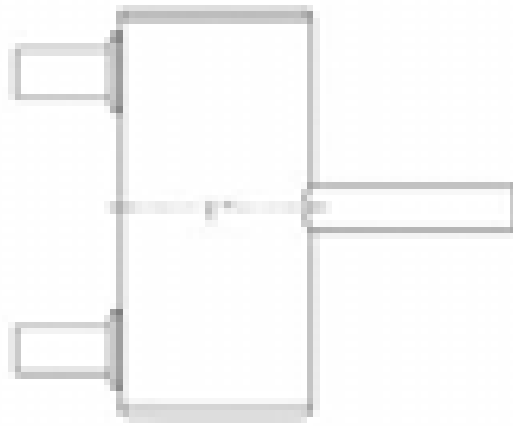


Figura 77: Schema definitivo della camera di miscelamento

Cautelativamente, le dimensioni effettive del volume sono state calcolate a partire dalle portate minime; infatti da queste dipenderà una risposta del sistema sufficientemente rapida al fine di controllare in modo adeguato la risposta del banco. In Figura 78 si riporta, a scopo prettamente esemplificativo, un estratto del foglio di calcolo messo a punto nello sviluppo del lavoro dei calcoli effettuati per dimensionare la camera di tale dispositivo.



Figura 78: estratto di esempio dei calcoli di dimensionamento del miscelatore

In base ai calcoli effettuati, si è stimato che il volume minimo indispensabile per ottenere un buon livello di miscelamento dei gas in ingresso ed ottenere tempi di risposta del sistema accettabili sia approssimativamente di 2100 cm³. Con tale configurazione, anche in condizioni di portata minima, si prevede di avere una permanenza massima delle singole particelle del gas internamente al volume di miscelamento inferiore al secondo.

Durante le operazioni di allestimento dello skid, è stato progettato e realizzato anche il cosiddetto “gorgogliatore ad acqua” (water seal o sistema di guardia idraulica), ovvero un sistema di sicurezza finalizzato ad evitare il ritorno di fiamma lungo le linee del flare gas. Tale sistema prevede l’immissione del flare gas in un contenitore d’acqua calda, sotto il livello del battente idrostatico con conseguente efflusso del combustibile verso una bocca di uscita posta sulla sommità di tale contenitore. Questa soluzione evita l’eventuale ritorno di fiamma proveniente dalla bocca di uscita del gas. L’acqua presente nel contenitore viene riscaldata per evitare la formazione di ghiaccio all’interno del sistema conseguente all’efflusso del gas combustibile. Il gorgogliatore deve permettere quindi l’ingresso diretto del flare gas all’interno del liquido e pertanto la bocca di adduzione è stata posta sotto battente; le superfici di contatto delle pareti non bagnate sono state ridotte al minimo e il canale di efflusso presentato al resto della struttura in modo che non vi si possano depositare eventuali schizzi o umidità. Per fare questo, inizialmente, si è pensato di inserire dei setti di separazione inclinati e con dei fori contrapposti in modo da far passare il gas con delle sezioni convergenti fino all’imbocco del canale di deflusso. Nella configurazione finale, si è optato per un sistema a campana rovesciata. In corrispondenza della zona lambita dall’acqua, è stata inoltre inserita una resistenza elettrica per garantire, tramite l’intervento di un termostato, il riscaldamento dell’acqua fino alla temperatura desiderata (60-70 °C) evitando quindi gli eventuali effetti di congelamento. Il gorgogliatore è provvisto inoltre di un canale di immissione e di scolo dell’acqua. Un misuratore di livello garantisce che il quantitativo di acqua presente nel sistema sia adeguato alla sua piena funzionalità.

Analogamente a quanto successo per lo sviluppo della camera di miscelamento, anche in questo caso è stato inizialmente messo a punto un foglio di calcolo per

la valutazione dei volumi e in seguito a questo, definito un primo schema progettuale del sistema. In Figura 79, a scopo di esempio, ne è riportata un'immagine dell'interfaccia.



Figura 79: foglio di calcolo per il dimensionamento del sistema di guardia idraulica

Note le volumetrie necessari per il corretto funzionamento del dispositivo, per garantire quindi che il tail gas prodotto dal miscelamento, prima di raggiungere la zona di combustione abbia pieno gorgogliamento senza riduzione di temperatura, si è realizzato un primo modello progettuale del water seal che tenesse di conto di tutte le problematiche messe in luce. In Figura 80 è rappresentata tale geometria.

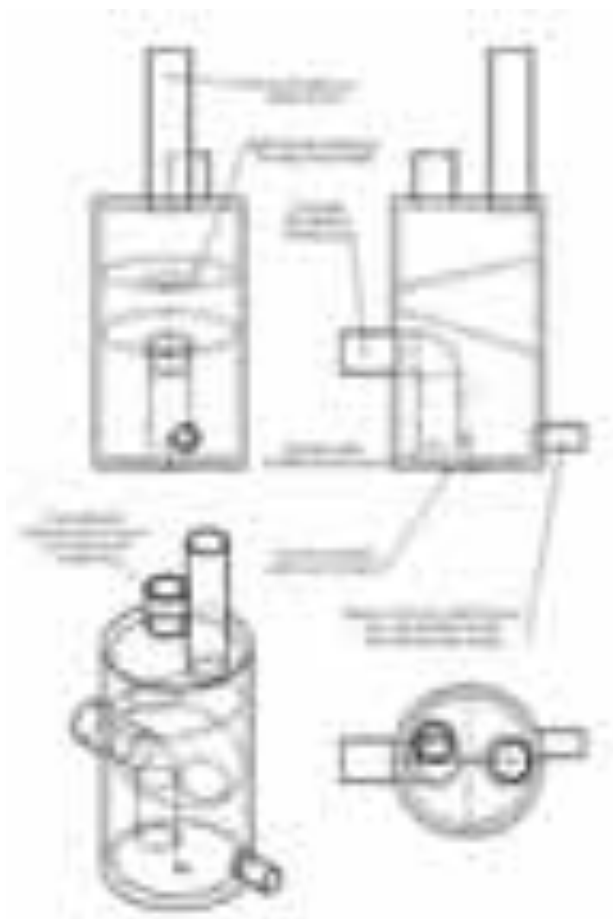


Figura 80: schema di concetto del gorgogliatore

Procedendo quindi alla realizzazione di tale componente, dalle analisi prodotte dalle stime delle portate previste, si è valutato che il volume minimo

indispensabile per ottenere un buon miscelamento ed avere tempi di risposta del sistema accettabili sia indicativamente di 6000 cm³. In questo modo, anche in condizioni di portata minima, si stima di avere una permanenza massima delle singole particelle del gas internamente al volume di miscelamento inferiore al secondo, garantendo in maniera analoga a quanto già valutato per la camera di miscelamento, una rapida risposta alla regolazione da parte del banco. In Figura 81: Schema realizzativo del Waterseal è riportata la messa in tavola da officina del sistema di guardia idraulica.

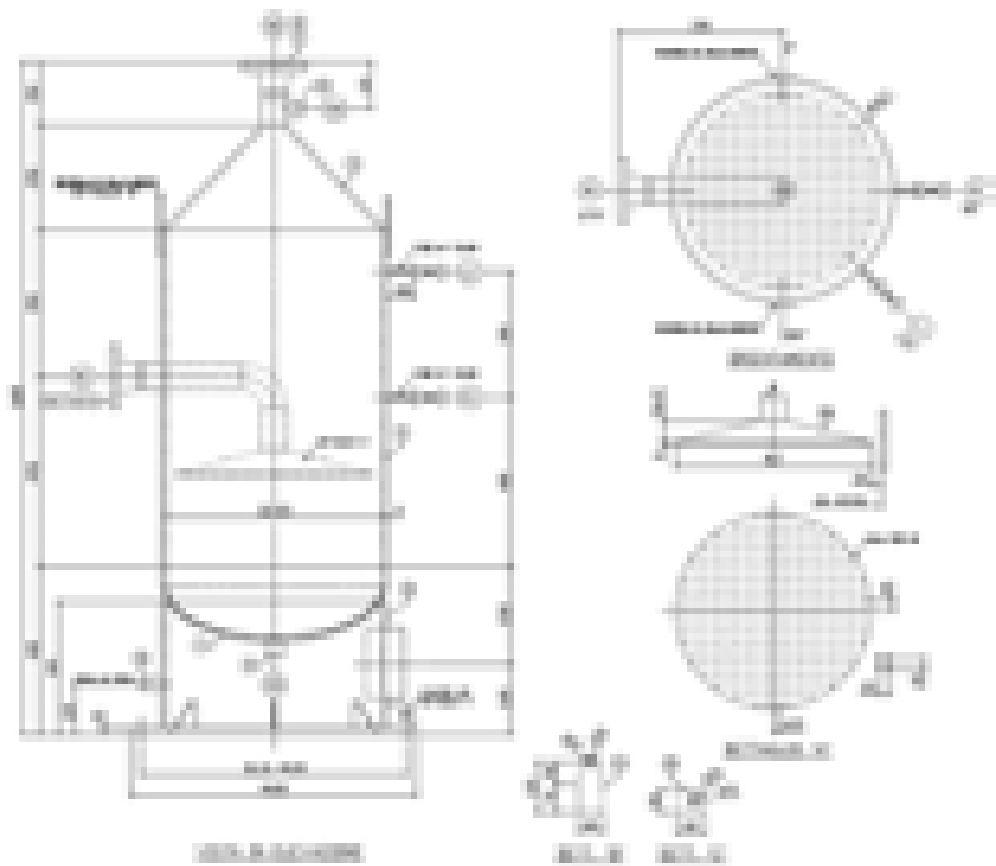


Figura 81: Schema realizzativo del Waterseal.

I due componenti di cui discusso nel presente paragrafo sono stati quindi alloggiati, secondo quanto dettagliato nei P&ID, all'interno dello Skid permettendo quindi il loro sfruttamento sia ad uso della camera di prova per torce scalate, che per la torre di test per la valutazione della stabilità della fiamma in risposta agli agenti atmosferici.

2.21 LAYOUT DEFINITIVO DELLA ZONA ADIBITA ALLA REALIZZAZIONE DEI BANCHI PROVA

Dovendo quindi procedere alla realizzazione di un banco di sperimentazione per torce in condizioni controllate e sicure, come dichiarato all'inizio dell'attività si è provveduto alla completa realizzazione di un'area attrezzata per tali scopi. Alla fine della fase di allestimento del sistema, questo si è presentato composto complessivamente da 4 elementi costitutivi:

- Banco prova in scala ridotta per la misura dei parametri termodinamici e degli inquinati
- Banco prova in scala reale (Derrick) per il test delle condizioni di ancoraggio sul bruciatore e di stabilità agli agenti atmosferici della fiamma
- Skid di con raggruppamento valvole e controlli per la regolazione e la gestione delle linee dei gas
- Locale di controllo per supervisione dei banchi di test e per l'acquisizione dati

Tutte le strutture coinvolte sono state raccordate elettricamente: infatti la rete di sensori allestita in ciascuno dei banchi (camera, derrick e skid) è stata opportunamente convogliata in canalette di protezione per poi confluire internamente al locale di controllo dove è stata posta la catena di acquisizione e condizionamento dei segnali; la disposizione delle tracce di raccordo è riportata in Figura 82.

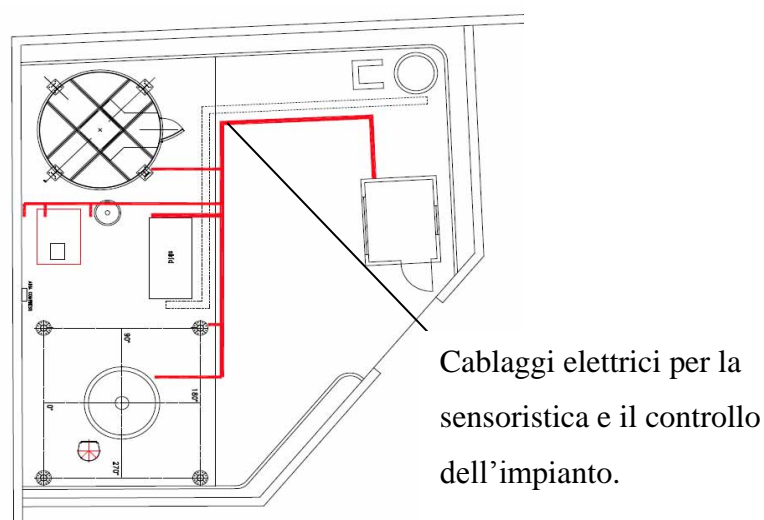


Figura 82: Tracce elettriche di raccordo della sensoristica

La filosofia progettuale con la quale è stata allestita l'intera zona di test è stata quindi la seguente: la camera di prova, opportunamente attrezzata con sensori di temperatura e pressione, permette di monitorizzare le condizioni della fiamma, ricavandone tutti i punti caratteristici sia nelle condizioni di regime che in quelle di transitorio. Inoltre il sistema di estrazione dei gas, incanalando i fumi in una sezione definita, permette l'analisi delle emissioni prodotte dalla reazione di combustione sviluppata. Tale tipo di analisi non sarebbe stata in alcun modo fattibile se la fiamma fosse stata sviluppata in aria libera.

Parallelamente lo sviluppo della torcia in scala 1:1, ha permesso di valutare le condizioni di ancoraggio della fiamma e la sua resistenza dalle condizioni atmosferiche (tipicamente vento e pioggia), in condizioni di effettivo funzionamento del sistema. Per congruenza realizzativa, si è optato per montare sulla sommità del Derrick le medesime teste del bruciatore sviluppate sul banco prova a terra. Questo permette di avere uno studio sperimentale delle misure e degli effetti strettamente legati al funzionamento del sistema direttamente comparabili.

Poiché i lavori di realizzazione dei banchi sono durati circa due anni, nelle prime fasi del progetto, come locale di controllo è stato utilizzato una struttura metallica prefabbricata in disuso per effettuare la prima installazione del sistema. In fase di realizzazione delle opere edili (basamento del banco prova, piazzale rivestito e serbatoio combustibile interrato) anche quest'ultimo elemento del sistema è stato quindi completamente riprogettato e realizzato ex novo. Dall'iniziale struttura prefabbricata senza fondamenta in cemento armato, si è quindi realizzato un alloggio coperto all'interno del quale sono stati installati tutti i controlli remoti del banco (sistema innesco scintilla, iniezione gasolio e altri sporcanti, allarmi, pulsanti di apertura/chiusura/sfiato valvole di sicurezza). La presenza di tale struttura, oltre ad agevolare significativamente tutte le operazioni sul banco prova, è anche più efficiente in termini di sicurezza in caso di formazione di fiamme anomale provenienti dalla zona di test.

In Figura 83 sono riportate due immagini scattate dalla camera di controllo, scattate rispettivamente nelle prime fasi di allestimento dell'area di test e in fase di inizio sperimentazione, ovvero a chiusura delle operazioni di realizzazione dell'area di test.



Figura 83: Foto del primo e del secondo locale di controllo dell'impianto

Avendo inserito anche questo quarto elemento, il layout definitivo della zona dedicata al banco prova e alla torcia in scala 1:1 realizzato è quello riportato in

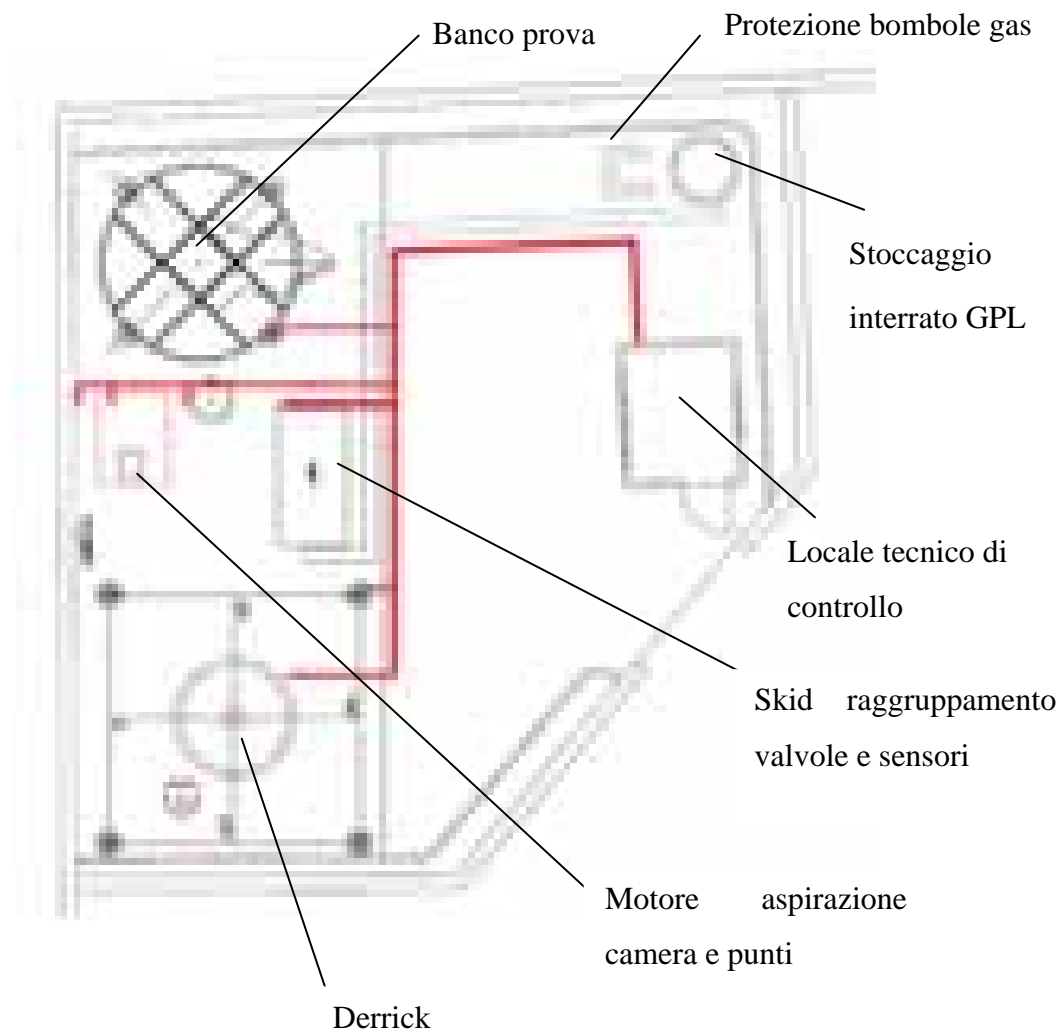


Figura 84: Layout dell'area di test per torce industriali presso GAM Oil&Gas

La foto riportata in Figura 85 è stata scattata da una delle passerelle intermedie del derrick e mostra una vista dall'alto della zona di test realizzata. Particolare attenzione è stata posta nella realizzazione del sistema di copertura degli stoccaggi di metano, azoto e anidride carbonica, al dislocamento del serbatoio interrato di GPL e allo scannafosso di raccordo impiantistico per il passaggio delle condotte e delle canalette elettriche.

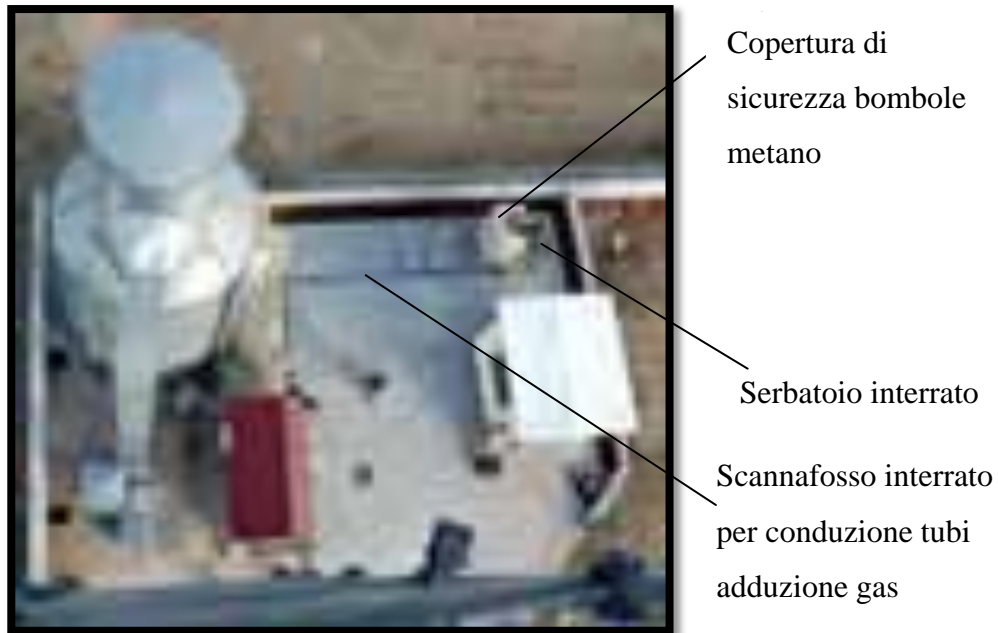


Figura 85: Foto dell'area di test per torce industriali allestita presso GAM Oil&Gas

Il banco è stato quindi installato sul suo basamento di cemento mattonellato e quindi collegato stabilmente alle linee di adduzione dei gas combustibili e dei gas tecnici necessari alla generazione del tail gas. Il serbatoio interrato di GPL, scelto opportunamente con una capienza di 1500 l, permette quindi un utilizzo prolungato della struttura sia per alimentare il banco di test per torce scalate, sia per servire opportunamente anche il derrick ed effettuare così prove di efflusso ad alta velocità per tempi prolungati. In Figura 86 è riportata una foto della sezione di accesso al serbatoio di GPL. Il gruppo strumentale composto dal sensore di temperatura, dal sistema di riduzione della pressione, e dalle valvole pneumatiche di sicurezza è direttamente allestito sulla zona emersa del serbatoio.

In prossimità di questo è stata posizionata anche l'unità di compressione per garantire la fornitura di aria compressa a tutto l'impianto.



Figura 86: Zona di accesso al serbatoio interrato di GPL

La scelta tecnica di installare sotto il piazzale il serbatoio, è stata effettuata per due diverse ragioni: in primis un accumulo considerevole di GPL permette di effettuare prove continuative per un tempo sufficiente a modificare le condizioni di operatività del sistema, la seconda invece è strettamente legata alle condizioni di sicurezza operativa. Lavorando infatti con combustibili liquidi e gas tecnici, trovandosi perlopiù in prossimità di zone di fiamma o quantomeno soggette ad un surriscaldamento locale molto elevato, l'utilizzo di sistemi interrati ha garantito la schermatura da effetti di irraggiamento termico diretto. Analogamente è stata allestita anche una struttura (vano di raccolta) in cemento armato per lo stoccaggio e la copertura delle bombole di metano e di anidride carbonica. Come già precedentemente discusso, tale struttura (visibile in Figura 85) è stata munita con un sistema di docce per portare acqua alla superficie esterna delle bombole ed evitarne così il congelamento durante la fase di erogazione (laminazione) del gas. Per raccordare il punto di stoccaggio con le elettrovalvole di sicurezza e i punti di presa, è stata realizzata sul basamento del piazzale mattonellato, una scanalatura tagliafuoco con apposita griglia di copertura.

2.22 ACCORGIMENTI IMPIANTISTICI DELLO SKID E DEL BANCO PER L'ALLESTIMENTO DELLE LINEE

Una volta terminato il primo allestimento dello skid, al fine di ottenere la piena funzionalità del sistema, sono state messe a punto alcune accortezze tecniche necessarie per la messa in sicurezza dell'impianto. Alla luce dei progressi ottenuti, in accordo con gli ingegneri ed i tecnici specializzati della GAM Oil&Gas sono stati completati alcuni allestimenti così da portare la camera alla piena funzionalità.

Sono state così installate le elettrovalvole a doppio effetto su tutte le linee di adduzione alloggiare sullo Skid; inoltre è stato deciso di montare una valvola ON-OFF centralizzata sulla linea di immissione del flare gas nella camera di combustione. Tutti gli sfiati delle singole linee dove fluiscono gas tecnici sono stati quindi intercettati e convogliati in un unico punto di scarico posizionato opportunamente ad altezza di sicurezza sulla zona posteriore del banco. Inoltre, per garantire il controllo dell'intero sistema, tutte le valvole di regolazione sono state remotate all'interno di una struttura coperta, appositamente adibita per l'alloggiamento del quadro sinottico e del sistema di acquisizione.

Sono state quindi terminate le linee ausiliarie per l'immissione di inerti: nello specifico sono state montate (come previsto da P&ID) quella dell'azoto (N_2) e dell'anidride carbonica (CO_2), sulle quali sono stati poi inseriti i sensori di portata, di pressione e di temperatura, la linea di adduzione dell'acqua e quella dell'aria compressa.

Per permettere dei transitori di accensione e stabilizzazione della fiamma senza incorrere in possibili rischi di incendio del soffitto della camera, è stato realizzato e inserito sul banco il manovellismo di apertura della sua sommità. Inoltre un sistema di sicurezza attivo permette, in caso di emergenza, di chiudere tutte le valvole di ammissione del flusso dei gas tecnici dalle bombole alla torcia e di aprire contemporaneamente tutti gli sfiati permettendo alle varie sezioni delle condotte di far effluire i residui.

Alcune modifiche rispetto alla prima installazione sono state apportate anche sul sistema di regolazione della portata d'aria in aspirazione – linea fumi. Il motore che controlla la girante di aspirazione sulla linea fumi attualmente messo a

disposizione da GAM non permette regolazioni e quindi parzializzazioni della portata di aria aspirata. GAM ha proposto l'utilizzo di un inverter di loro proprietà per controllare il regime di funzionamento della girante. In questo modo sarà possibile ottenere una regolazione della portata aspirata in modo da facilitare alcune fasi come l'accensione della camera d eventuali condizioni atmosferiche di aria ferma o presenza di correnti ascensionali. Inoltre una particolare flangia dedicata all'inserimento dei puntali della sonda d'acquisizione degli inquinanti è stata realizzata sulla sezione discendente prima del sistema di aspirazione le flange per l'inserimento.

Sempre in questa fase del progetto sono state risolte alcune criticità tecniche relative al banco di studio emerse nelle prime sessioni di accensione della camera. Determinate è stato l'inserimento dei filtri (Figura 87) posizionati prima dei misuratori di portata per evitare che questi possano bloccarsi a causa dell'accumulo di residui o di sporcizia nelle condotte. Tale accorgimento è sorto da un problema verificatosi in una delle prime fasi di test del banco; infatti a causa della polvere e dei residui di trucioli metallici contenuti nei tubi in acciaio al carbonio, i misuratori di portata sono andati in blocco, costringendo i tecnici a smontarli e a ripulirli completamente per ripristinare le condizioni di pieno funzionamento del banco.

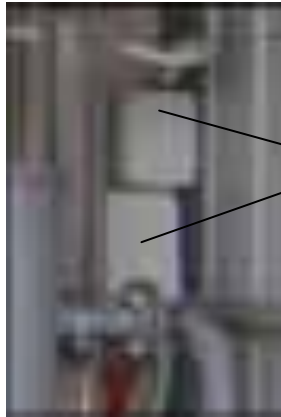


Manicotto con filtro per evitare l'ingresso di trucioli nel misuratore

Figura 87: Misuratore di portata con filtri di sicurezza

Particolare attenzione è stata anche posta nel risolvere le criticità strettamente connesse alla parte di cablaggio e di connessione elettrica. Rispetto alla prima installazione della camera tutti i quadri di raccordo delle terminazioni sono state raccordate in scatole Gewiss con grado di protezione

IP 56 per evitare problemi di condensa o di attacco da parte di agenti atmosferici. Per avere una maggior facilità di ispezione dei quadri, questi sono stati distribuiti sul vano interno dello skid e sul dorso della camera in maniera separata, così che le terminazioni in essi contenute facessero diretto riferimento alle strutture corrispondenti. Nella foto riportata in Figura 88 si possono vedere le scatole alloggiare all'interno dello skid.



Scatola di raccordo
terminazioni elettriche
con livello di

Figura 88: Quadri elettrici da esterno IP56

Tra le ultime accortezze tecniche eseguite sul sistema ci sono state l'installazione definitiva dei sistemi di pescaggio del gasolio e della caldaia (boiler) per il preriscaldamento del flare gas.

Per quanto riguarda l'iniezione di gasolio, inizialmente la tanica di contenimento era stata posizionata a terra, sulla zona posteriore dello skid: una pompa, azionata da un comando remotato all'interno del vano di controllo, provvede a spingere il combustibile, opportunamente nebulizzato tramite un ugello con un angolo di immissione di 45° , sulla zona di fiamma. Tuttavia nelle fasi di sperimentazione, in maniera particolare durante i mesi invernali, si è notato l'insorgere di alcuni problemi legati al non corretto tiraggio da parte della pompa, portando addirittura il sistema in blocco e non riuscendo soprattutto a spingere il gasolio fino all'interno della camera stessa. Per superare tale criticità si è provveduto a mettere il serbatoio in posizione rialzata e a sostituire il tubo di rame di adduzione all'ugello di immissione. In questo modo il sistema ha risposto in modo efficiente e senza imprevisti durante tutte le sessioni di test successive. La soluzione adottata è illustrata in Figura 89.



Figura 89: Foto del serbatoio di gasolio e della caldaietta di preriscaldamento tail gas

Come visibile nell'immagine sopra riportata, sulla parte posteriore dello skid è stata allocata anche una caldaietta ad uso domestico per riscaldare l'acqua di preriscaldamento del flare gas passante per lo scambiatore acqua/gas installato sulla zona anteriore. Lo scambiatore è stato opportunamente dimensionato in maniera da garantire al flare gas di raggiungere una temperatura attorno ai 60 °C prima di raggiungere la sezione di innesco. Si ricorda infatti che il flare gas, a causa delle forti espansioni causate dai riduttori di pressione posizionati a valle dei serbatoi di stoccaggio, è soggetto ad un forte raffreddamento e pertanto – soprattutto nei mesi invernali – richiede un preriscaldamento per fare in modo che le condizioni di processo industriale che si vogliono simulare risultino attendibili.

Nello schema di Figura 90 è riportato il complessivo da officina sviluppato per la realizzazione della sezione di preriscaldamento del flare gas. Il sistema di rilevamento della temperatura permette di effettuare misurazioni prima della sezione di imbocco e sulla mandata dello scambiatore, così da monitorare costantemente le condizioni termodinamiche del flare gas elaborato nella torcia.

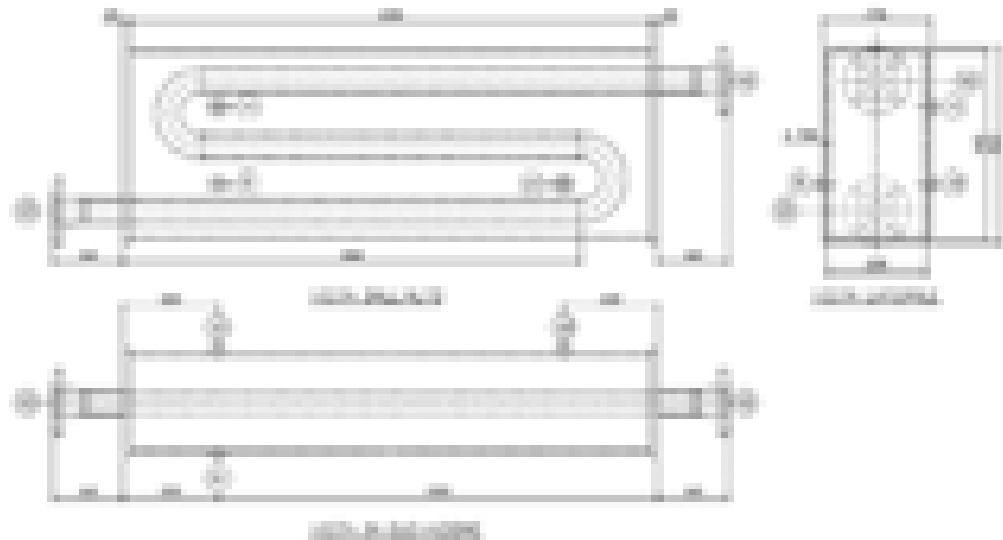


Figura 90: Messe in tavola della sezione di preriscaldamento del tail gas

Per quanto riguarda la caldaia installata sullo skid per il riscaldamento del gas tramite lo scambiatore acqua/fumi di cui sopra, i dati tecnici sono riportati in Tabella 21.

Marca :	Ferrioli
Tipo:	Fluss
Matricola:	1BALA52A/01203H
Anno Fabbricazione :	1990
Potenza Termica nom. :	kW 23.30
Potenza Termica:	kW 25.80
Alimentazione:	220V - 50Hz (150 W max)
Combustibile:	Gas GPL
Circolazione:	Forzata
Pressione Max:	3 bar
Temperatura:	100 °C

Tabella 21: Caratteristiche caldaia preriscaldamento flare gas

2.23 SISTEMA DI CONTROLLO PER L'ACCENSIONE E L'ADDUZIONE DEI GAS AL TEST RIG.

Al fine di garantire il massimo controllo sulle regolazioni da effettuare sulla camera di prova, si è predisposto un controllo di tipo duale sull'intero sistema. Tutti i dispositivi muniti di regolazioni elettriche sono stati ricondotti ad un quadro generale allestito nel locale per l'acquisizione dei dati, in maniera da poter controllare completamente il sistema da un unico punto. Le regolazioni sulle valvole (e quindi le portate effettive di tail gas che viene effettivamente portato in torcia), avvengono per via manuale sullo skid posizionato lateralmente rispetto al banco prova. Nello specifico, all'interno del locale di controllo, tramite un quadro sinottico appositamente realizzato per tale scopo (Figura 91) sono state portate le seguenti regolazioni:

- Accensione acquirente (NI-CRIO) dati con monitor Touch Screen per il rilevamento di tutti i punti di misura della camera,
- Quadro interruttore generale per alimentazione del banco
- Quadro con attivazione immissione ausiliari (acqua, vapore, gasolio, azoto, anidride carbonica)
- Sistema di blocco generale adduzione gas
- Accensione scintilla pilota
- Accensione/ regolazione aspiratore



Figura 91: Quadro di controllo ausiliari e blocchi di sicurezza

Tutti i pulsanti di controllo, il quadro elettrico con gli interruttori, il sistema di rilevamento e il monitor PC sono stati disposti in punti ravvicinati (Figura 92), così da avere un accesso agevolato a tutti i sistemi di regolazione della camera e poter quindi, all'occorrenza, interrompere l'erogazione portando l'intero sistema in blocco forzato.



Figura 92: Quadro di controllo camera e sistema di monitoraggio/acquisizione

2.24 CONCLUSIONI

Questa seconda fase del lavoro ha previsto quindi tutte le operazioni e le competenze progettuali e impiantistiche per lo sviluppo e la realizzazione di due banchi prova adibiti allo studio di torce industriali. Le operazioni di cui trattato 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.

