



Ricerca di Sistema elettrico

Realizzazione dell'impianto sperimentale P2G/L

D. Marotto, S. Meloni, P. Miraglia, M. Mureddu, S. Lai, F. Dessì, A.
Porcu, S. Sollai, D. Multineddu, A. Orsini F. Ferrara, G. Calì

REALIZZAZIONE DELL'IMPIANTO SPERIMENTALE P2G/L

D. Marotto, S. Meloni, P. Miraglia, M. Mureddu, S. Lai, F. Dessì, A. Porcu, S. Sollai, D. Multineddu, A. Orsini F. Ferrara, G. Calì

Dicembre 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero della Transizione Ecologica - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - III annualità

Obiettivo: Sistema Elettrico

Progetto: 1.2 Sistemi di accumulo, compresi elettrochimico e power to gas, e relative interfacce con le reti

Work package: 3 Power-to-gas

Linea di attività: LA 3.20 – Power to Gas/Liquid: realizzazione dell'impianto pilota e sperimentazione

Responsabile del Progetto: Giulia Monteleone, ENEA

Responsabile del Work package: Eugenio Giacomazzi, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "POWER-to-Gas/Liquid Utilizzo della CO₂"

Responsabile scientifico ENEA: Paolo Deiana

Responsabile scientifico Co-beneficiario SOTACARBO: Marcella Fadda

Hanno partecipato alle attività R. Cara, F. Tedde, A. Argiolas, C. Manca, S. Muntoni, I. Puddu, A. Vacca

Indice

SOMMARIO	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 DESCRIZIONE DELL'IMPIANTO SPERIMENTALE	6
3 REALIZZAZIONE IMPIANTO SPERIMENTALE	9
3.1 SEZIONE DI MISCELAZIONE	10
3.2 SEZIONE DI REAZIONE	12
3.3 SEZIONE DI RICIRCOLO.....	17
3.4 SEZIONE DI SEPARAZIONE E RACCOLTA DEI PRODOTTI.....	20
3.5 SISTEMA DI CAMPIONAMENTO E ANALISI DEI PRODOTTI	24
3.6 STRUMENTAZIONE	27
3.7 SISTEMA DI REGOLAZIONE E CONTROLLO.....	29
3.8 CRITERI DI REGOLAZIONE E CONTROLLO	31
3.8.1 <i>Descrizione generale della supervisione d'impianto</i>	37
3.9 STRUTTURA METALLICA E BASAMENTO DI ANCORAGGIO	42
3.10 INSTALLAZIONE DELLA STRUTTURA.....	44
3.11 COIBENTAZIONE	45
4 REALIZZAZIONE DEI SISTEMI AUSILIARI DELL'IMPIANTO SPERIMENTALE	49
4.1 SISTEMA DI ALIMENTAZIONE GAS ALL'IMPIANTO	49
4.1.1 <i>Sistema di alimentazione H₂</i>	51
4.1.2 <i>Sistema di alimentazione CO₂</i>	54
4.1.3 <i>Sistema di alimentazione N₂</i>	55
4.2 ADEGUAMENTO DELL'IMPIANTO ELETTRICO.....	57
4.3 SISTEMA AZOTO DI BASSA PRESSIONE	59
4.4 SISTEMA DI EVACUAZIONE GAS (VENT/TORCIA)	60
4.5 STRUMENTI DI RIVELAZIONE E MISURAZIONE DEI GAS.....	61
5 CONCLUSIONI	63
6 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI	64
7 CURRICULUM SCIENTIFICO DEL GRUPPO DI LAVORO	65

Sommario

L'attività di ricerca oggetto del presente documento prevede lo sviluppo di tecnologie per il riutilizzo sostenibile della CO₂ per la produzione di combustibili liquidi e gassosi. Complessivamente, il principale risultato atteso dall'attività è lo sviluppo di un prototipo sperimentale per lo sviluppo, su scala pilota, processi di sintesi di metano, metanolo e dimetiletere (DME) mediante l'idrogenazione catalitica della CO₂, derivante da processi di cattura, con idrogeno prodotto dal surplus di generazione elettrica da fonte rinnovabile. Tale sviluppo consentirà un'ottimizzazione del processo finalizzata a una riduzione dei costi di investimento e operativi e all'acquisizione di dati sperimentali per lo studio delle integrazioni con altre tecnologie di generazione elettrica da fonti fossili e rinnovabili. I progressi attesi sono strettamente legati alla flessibilità delle nuove apparecchiature sperimentali, pensate per colmare il maggior numero possibile di lacune dello sviluppo tecnologico.

Il presente documento riporta le attività svolte nella linea di attività LA 3.20 - "Power-to-Gas/Liquid "Realizzazione dell'impianto sperimentale P2G/L" del piano triennale di realizzazione 2019-2021. Nello specifico vengono descritte le attività di realizzazione e installazione dell'impianto P2G/L (denominato *Power-to-Fuels*), compresi i sistemi ausiliari di nuova costruzione e l'adeguamento di quelli esistenti.

1 Introduzione

Nell'ultima riunione del G20 tenutasi a Roma nell'ottobre del 2021 è stato fissato a 1,5 °C il limite dell'aumento di temperatura a livello globale. Tale risultato prevede una tabella di marcia per la crescita economica finalizzata a contrastare i cambiamenti climatici e limitare il riscaldamento globale. La produzione di energia a basse emissioni di carbonio ricopre un ruolo essenziale e sarà sostituita da energia a zero emissioni nel lungo termine. La prevedibile crescita della produzione di elettricità richiederà un ulteriore sviluppo di tecnologie affidabili per l'utilizzo delle fonti rinnovabili. L'energia solare, insieme a quella eolica, stanno diventando le fonti principali per la produzione di energia elettrica e pertanto sono le grandi protagoniste della transizione energetica in atto. Esse possiedono una discontinuità di produzione di energia elettrica dovuta alla variabilità della fonte primaria (sole, vento); pertanto si rende necessario la realizzazione di sistemi di accumulo: batterie, stoccaggio chimico ecc. Inoltre, risulta altrettanto importante ridurre le emissioni di CO₂ nei settori cosiddetti "hard-to-abate" (diversi comparti industriali e i trasporti pesanti, soprattutto quelli aereo e marittimo), per i quali non è possibile la completa elettrificazione o la decarbonizzazione secondo le strategie convenzionali. In questo caso, il metano può fungere da risorsa di transizione ma in definitiva, i combustibili fossili dovranno essere sostituiti con combustibili sintetici per una soluzione sostenibile a zero emissioni di carbonio.

In questo contesto energetico, le tecnologie *Power-to-Fuels* rappresentano una soluzione sostenibile per la produzione di combustibili sintetici e lo stoccaggio di energia rinnovabile. Tale tecnologia integra quella di stoccaggio energetico a breve termine rappresentata dalle batterie, e consente la conversione dell'energia elettrica in combustibili gassosi, come l'idrogeno o il metano, o in combustibili liquidi, come il metanolo, che possono essere immagazzinati per lunghi periodi se necessario.

La sostituzione dei combustibili fossili con alternative che prevedano emissioni neutre di carbonio, può ridurre direttamente le emissioni in molti settori. Inoltre, grandi quantità di energia possono essere immagazzinate per un lungo periodo al fine di garantire l'equilibrio tra domanda e offerta di energia rinnovabile. L'energia elettrica non deve quindi essere più pensata solo come un prodotto energetico finale, ma piuttosto come una fonte di energia sostenibile integrata nelle tecnologie *power-to-fuels* per la propria trasformazione in vettori energetici liquidi e gassosi. Grazie all'utilizzo di tecnologie efficaci, le energie rinnovabili potranno essere economicamente sostenibili a livello globale. Nello specifico, l'energia rinnovabile può essere utilizzata per alimentare un impianto di elettrolisi per la produzione di idrogeno, che viene utilizzato con anidride carbonica in un reattore di metanazione, producendo metano sintetico, noto anche come gas naturale sintetico (SNG). Il SNG può essere stoccato e utilizzato direttamente come combustibile per i mezzi di trasporto o riconvertito in energia elettrica. In alternativa, l'idrogeno può essere convertito in metanolo, che può svolgere un ruolo chiave nella produzione sostenibile di combustibili sintetici per il trasporto via terra, navale e aereo. Il metanolo sintetico può essere utilizzato direttamente nel settore della mobilità e rispetto al SNG presenta numerosi vantaggi, come la maggiore densità energetica e la facilità di stoccaggio e trasporto.

Si riportano di seguito i componenti chiave dei sistemi *Power-to-Fuels*:

- Energia rinnovabile - Le fonti rinnovabili, in particolare l'eolico e il solare, forniscono l'energia primaria per la produzione di combustibili verdi;
- Elettrolisi - L'impianto di elettrolisi alimentato da energie rinnovabili produce idrogeno;
- Fonte di CO₂ - L'apporto di carbonio richiesto per il processo può provenire da grandi fonti di emissione puntuali, quali le centrali elettriche o gli impianti industriali, o dall'aria stessa;
- Sezione di reazione - L'idrogeno reagisce con l'anidride carbonica per la produzione di combustibili sintetici quali il metano, il metanolo e il DME;
- Infrastrutture di stoccaggio e trasporto - I combustibili sintetici possono essere stoccati in loco, immessi nella rete del gas o trasportati tramite camion o navi fino alla destinazione d'uso.

Il presente rapporto tecnico si inquadra all'interno progetto 1.2 "Sistemi di accumulo e relative interfacce con le reti" dell'Accordo di Programma MISE-ENEA 2019-2021. Nello specifico, è stato realizzato nell'ambito del WP3 - LA3.20 e descrive le attività di realizzazione del prototipo sperimentale *Power-to-Gas/Liquids*

(P2G/L) per lo sviluppo del processo e la sperimentazione della sintesi di combustibili liquidi e gassosi, quali metano, metanolo e DME, mediante idrogenazione catalitica di CO₂. L'impianto prototipale è stato installato presso la piattaforma pilota del Centro Ricerche Sotacarbo e sarà utilizzato per lo sviluppo tecnologico delle tecnologie P2G/L con CO₂ derivante da processi di cattura e idrogeno dal surplus di produzione elettrica da fonte rinnovabile. Nel presente report è riportata la descrizione di tutte le attività relative all'installazione e alla realizzazione dell'impianto, nonché la definizione delle procedure per la gestione della fase operativa .

2 Descrizione dell'impianto sperimentale

L'impianto prototipale, dedicato alla conversione della CO₂ in metano, metanolo e dimetiletere (DME), è stato progettato per una produzione massima di 5 kg/h (120 kg/giorno) di prodotto finale. Nella Figura 2.1 è riportato uno schema semplificato del processo, mentre in Figura 2.2 si riporta lo schema di processo (*Process Flow Diagram, PFD*) definitivo dell'impianto.

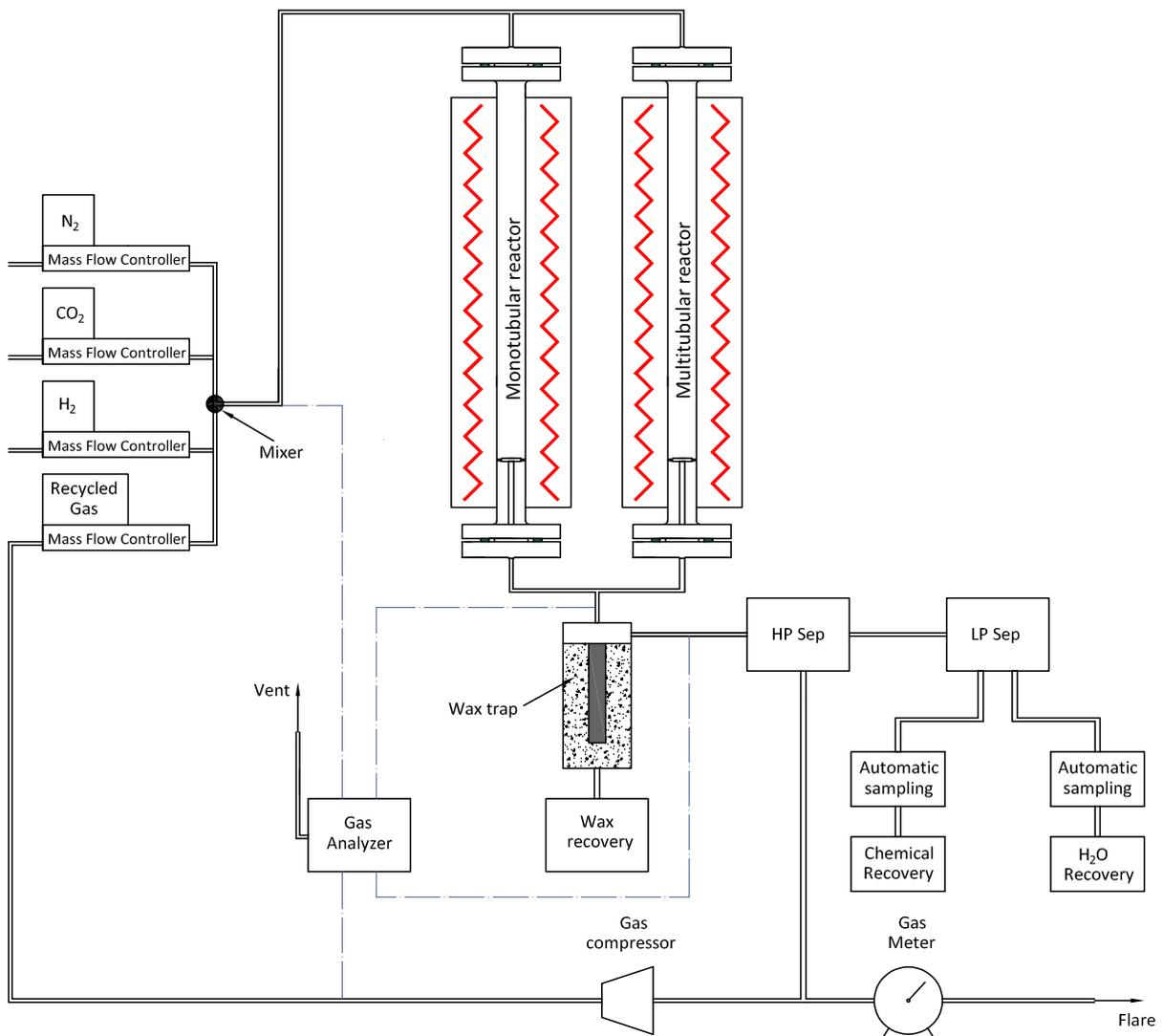


Figura 2.1. Schema semplificato del processo.

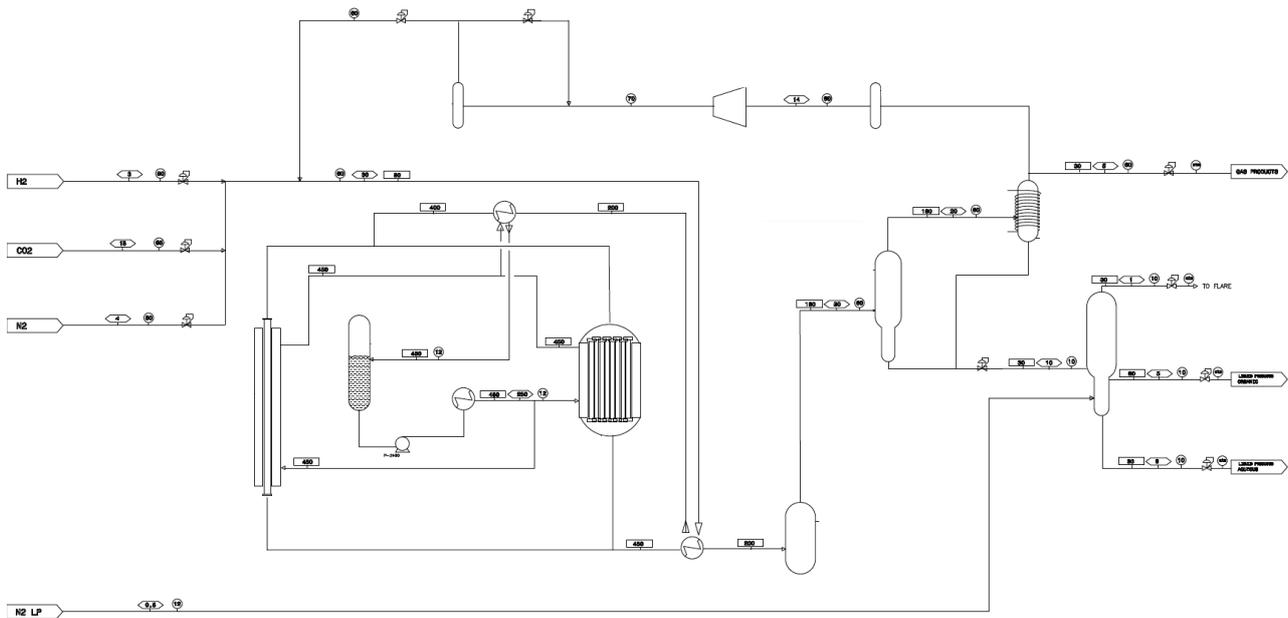


Figura 2.2. Process Flow Diagram (PFD) definitivo dell'impianto.

Nello specifico, l'impianto risulta costituito principalmente da:

- Sezione di alimentazione.
- Sezione di miscelazione.
- Sezione di reazione.
- Sezione di ricircolo.
- Sezione di separazione e raccolta dei prodotti.
- Sistema campionamento e analisi dei prodotti.
- Sistema di regolazione e controllo.
- Strumentazione.

Data la natura sperimentale dell'impianto, è stata adottata una configurazione estremamente flessibile (costituita da due differenti reattori, uno monotubolare e uno multitubolare, con elevato rapporto lunghezza/diametro) che consenta da un lato l'ottimizzazione dei processi di interesse in diverse condizioni operative e dall'altro l'acquisizione di dati sperimentali per il futuro scale-up delle tecnologie. Ciascun reattore è stato progettato e realizzato in rispondenza alle condizioni operative individuate per tutti i processi di interesse (60 barg @ 350 °C e 30 barg @ 450 °C).

La sezione di alimentazione è costituita da un impianto di decompressione, distribuzione e regolazione dei flussi di anidride carbonica, idrogeno e azoto. Ogni linea di alimentazione è dotata di un filtro, un trasduttore di pressione, una valvola di sfiato per sovrappressione, un regolatore di pressione preceduto e seguito da un misuratore di pressione, un regolatore di portata massica ad effetto Coriolis e una valvola di ritegno. Per quanto riguarda il controllo della temperatura, l'impianto è dotato di un sistema, basato su un design a doppia camicia, che consente una regolazione efficiente della temperatura anche con reazioni particolarmente esotermiche come quelle oggetto della sperimentazione. La miscela gassosa, prima di entrare nel reattore, viene preriscaldata attraverso uno scambiatore di calore che scambia a sua volta il calore con l'olio uscente dalla camicia del reattore. Inoltre, la linea in ingresso al reattore è elettroriscaldata e isolata termicamente. Dopo il preriscaldamento, un sistema di valvole automatizzate permette di selezionare il reattore a cui inviare la miscela gassosa (il monotubolare oppure il multitubolare).

Nello specifico, il modulo di regolazione della temperatura è costituito da:

- Due scambiatori di calore in contro-corrente.
- Un riscaldatore del fluido circolante.
- Un condensatore raffreddato ad aria.
- Una pompa di circolazione del fluido ad alte prestazioni.
- Quattro separatori del fluido della capacità di 8 litri ciascuno.

A valle della sezione di reazione, è presente un sistema di separazione dei prodotti composto da:

- Una trappola per il recupero di eventuali prodotti ad elevato peso molecolare.
- Un separatore gas-liquido ad alta pressione.
- Un separatore gas-liquido a bassa pressione per separare la fase gassosa dalle due fasi condensate (acquosa e organica).

In particolare, l'effluente gassoso caldo in uscita dal reattore scambia calore con l'alimentazione fresca e viene inviato successivamente alla trappola per cere. Questa viene mantenuta a una temperatura idonea per la separazione dei composti più alto-bollenti. I gas in uscita dalla trappola vengono poi convogliati al separatore di alta pressione che, attraverso l'abbassamento di temperatura, condensa l'acqua, il metanolo e il DME formati durante la reazione. La fase gas in uscita dal separatore viene inviata a un condensatore che ha la funzione di ottimizzare la separazione gas-liquido; questo viene fatto attraverso il raffreddamento indotto da un gruppo chiller a circuito chiuso. I gas in uscita dal condensatore vengono inviati in parte alla sezione di ricircolo dei gas non reagiti (sezione di fondamentale importanza per aumentare la resa del processo), in parte al vent di processo e al sistema di analisi. L'effluente liquido in uscita dal separatore di alta pressione viene miscelato con quello proveniente dal condensatore e viene inviato al separatore di bassa pressione dove avviene la separazione tra la fase acquosa e organica. Nel sistema viene inviato un piccolo flusso di azoto a bassa pressione per consentire il massimo recupero del gas, eventualmente presente.

La fase organica dei prodotti liquidi è costituita principalmente da DME. Acqua e metanolo vengono inviati al sistema di campionamento a pressione ambiente e stoccati in appositi serbatoi. Infine, le cere eventualmente recuperate vengono inviate tramite una linea riscaldata al sistema di campionamento a pressione atmosferica e successivamente stoccate in un apposito serbatoio.

Al fine di aumentare la resa di reazione, specialmente per la sintesi del metanolo, è stata predisposta una linea di ricircolo dei gas non reagiti. La sezione di ricircolo è costituita da un compressore di tipo elettrico a diaframma metallico, con raffreddamento a liquido, funzionante in modalità ad anello; due vasi di espansione e controllori di flusso massico ad effetto Coriolis per la misura e il controllo della portata di gas ricircolato.

Tutti i componenti e tutte le linee dell'impianto sono stati realizzati in materiali compatibili con le condizioni operative definite durante la progettazione. L'impianto è dotato, infine di tutti i dispositivi necessari per garantire la corretta operatività e sicurezza, in accordo con la normativa vigente.

3 Realizzazione impianto sperimentale

L'impianto è un sistema molto compatto, nonostante la sua complessità e le differenti sezioni che lo compongono. Si è scelto di realizzare l'impianto su skid per ottimizzare sia le fasi di installazione che i costi di realizzazione dell'impianto. Di seguito si riportano alcune immagini della struttura dell'impianto (Figura 3.1).



Figura 3.1. Immagini della struttura dell'impianto durante la fase di realizzazione presso il fornitore.

La struttura che sostiene l'impianto ha le seguenti dimensioni: lunghezza 6 m, larghezza 4 m altezza 9 m. L'impianto è disposto in altezza su tre differenti piani. Al primo piano sono posizionate le principali apparecchiature: quadro elettrico di gestione e alimentazione, sistemi di adduzione gas, compressore di ricircolo, chiller, sistema di riscaldamento con olio diatermico. Al secondo piano sono posizionate le apparecchiature di analisi gas ed il reattore multitubolare. Al terzo piano è presente la parte finale del reattore monotubo che si estende su tutti i piani dell'impianto.

3.1 Sezione di miscelazione

La sezione di miscelazione è quella sezione all'ingresso dell'impianto in cui le linee del sistema di alimentazione sono connesse con le linee di impianto (Figura 3.2). Questa sezione è adibita al controllo e alla regolazione di tutti i gas coinvolti nel processo e alla loro miscelazione. Come da progettazione di dettaglio, per ciascuno dei tre gas (CO_2 , N_2 e H_2) la linea è stata realizzata con una tubazione in acciaio SS316 di diametro 3/8" fornita di valvola di intercettazione, filtro da 7 μm , trasduttore di pressione, valvola di sfiato per sovrappressione (impostata a 85,3 bar), regolatore di pressione preceduto e seguito da: misuratore di pressione, regolatore di portata massica ad effetto *Coriolis*, valvola di intercettazione e valvola di ritegno (Figura 3.3).

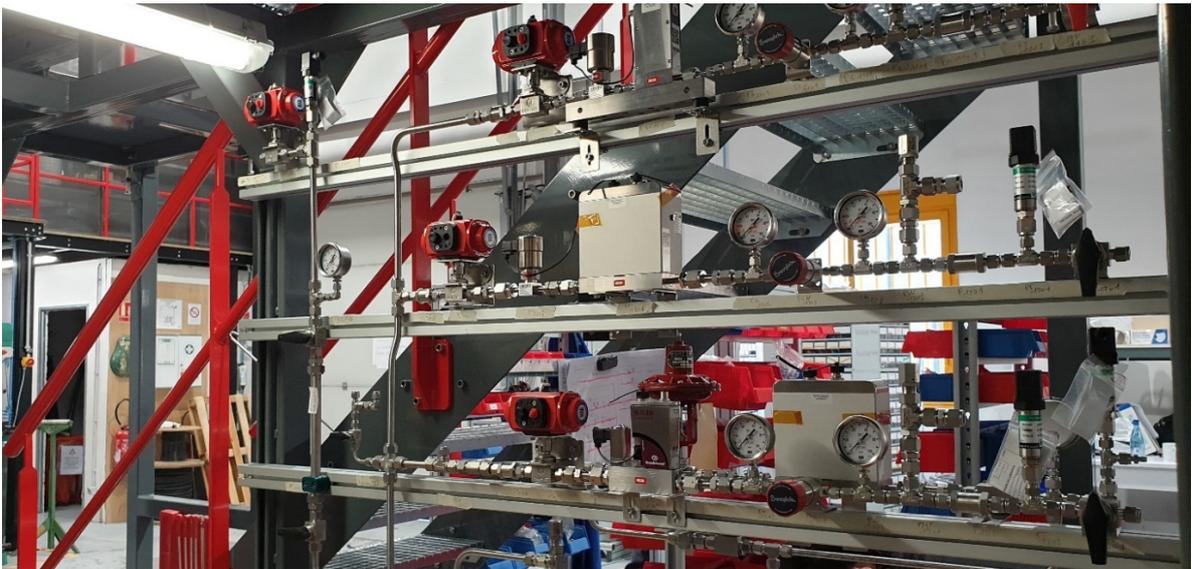


Figura 3.2. Realizzazione della sezione di miscelazione gas.



Figura 3.3. Particolare della linea di distribuzione dell'idrogeno e dei suoi componenti.

I gas vengono miscelati all'interno di un gas mixer insieme al flusso di ricircolo proveniente dal reattore. Il miscelatore è stato realizzato con un tubo di acciaio SS316/316L da 1/2" al cui interno sono state realizzate cinque sezioni differenti e alternate, costituite da 3 setti di forma spiralata intervallati da 2 miscelatori di

forma elicoidale (Figura 3.4). Il componente è stato concepito e realizzato in modo tale da massimizzare la miscelazione dei gas. Le giunzioni dell'ingresso e dell'uscita del gas mixer sono realizzate tramite l'impiego di raccordi ad elevata tenuta in grado di reggere temperature e pressioni massime di 100 °C e 80 bar.

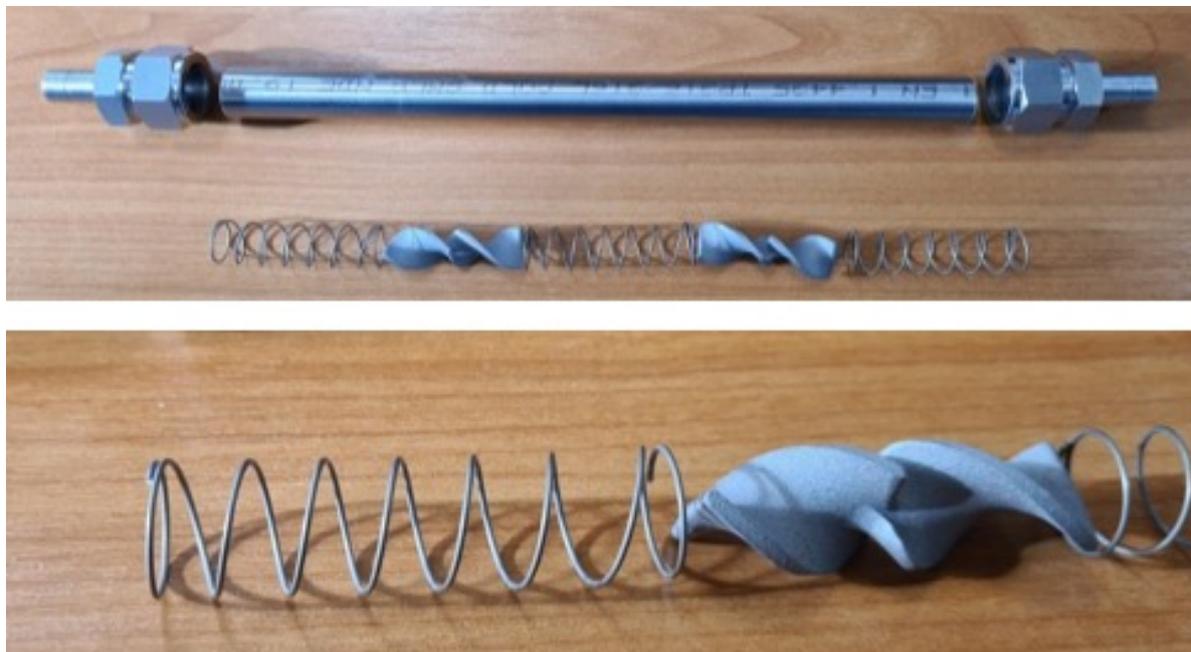


Figura 3.4. Realizzazione delle parti costituenti il gas mixer (in alto) e dettaglio dei componenti interni (in basso).

Nella figura in basso si può osservare l'avvenuta installazione del componente in esame e in particolare l'uscita del gas mixer fornita, nell'ordine, di valvola di intercettazione, seguita da misuratore di pressione e valvole di intercetto per le misure strumentali (gascromatografiche e a spettroscopia infrarossa), valvola pneumatica attuatrice "shut-off" e trasduttore di pressione (Figura 3.5).



Figura 3.5. Installazione del gas mixer e particolare dell'uscita e dei suoi componenti.

3.2 Sezione di reazione

La sezione di reazione costituisce il cuore dell'intero impianto. È infatti all'interno dei reattori che avvengono le reazioni oggetto delle sperimentazioni e si formano i prodotti desiderati. Per tale motivo, già durante le prime fasi del progetto è stata dedicata particolare attenzione alla configurazione reattoristica e alla selezione della tipologia di reattore, che va ad influire sulle prestazioni catalitiche finali, insieme ad un'attenta ingegnerizzazione dell'intera sezione. Nella progettazione di dettaglio, oggetto del report RdS/PTR(2021)/282, l'intera sezione di reazione è stata dimensionata, definendo le particolarità dei reattori e le caratteristiche di tutti i componenti che la compongono.

Nello specifico, la configurazione individuata per questa sezione si basa sull'utilizzo di un reattore multitubolare e di un reattore monotubolare, entrambi con elevato rapporto lunghezza/diametro (L/D), per consentire da un lato l'analisi di un ampio spettro di problematiche che devono essere affrontate nello studio di questi processi, e dall'altro la scalabilità dei risultati ottenuti. Ciascun reattore è stato progettato e realizzato in rispondenza alle condizioni operative individuate, dopo attenta analisi, per entrambi i processi (60 barg @ 350 °C e 30 barg @ 450 °C). Per questioni di chiarezza si riporta di seguito una breve descrizione dell'intera sezione e del suo funzionamento.

Questa sezione può essere suddivisa in due sottosezioni: la sezione di reazione vera e propria, ovvero rappresentata dai reattori, e la sezione di preriscaldamento/riscaldamento/raffreddamento dei fluidi di processo. Infatti, la miscela gassosa, proveniente dalla sezione di miscelazione gas, all'ingresso della sezione di reazione viene preriscaldata attraverso uno scambiatore di calore dove viene fatto passare dell'olio diatermico uscente dalla camicia del reattore. A seguito del preriscaldamento, un sistema di valvole automatizzate permette di scegliere tra il reattore monotubolare e quello multitubolare. Nello specifico, il modulo di regolazione della temperatura è costituito da: due scambiatori di calore in contro-corrente (Figura 3.6), un riscaldatore del fluido circolante, un condensatore raffreddato ad aria, una pompa di circolazione del fluido ad alte prestazioni e quattro separatori del fluido della capacità di 8 litri ciascuno (Figura 3.7). Questi ultimi agiscono come stoccaggio del fluido riscaldante. L'intera sezione è stata installata al piano terra dell'impianto (Figura 3.8).



Figura 3.6. Realizzazione degli scambiatori di calore.



Figura 3.7. Realizzazione dei separatori del fluido diatermico.

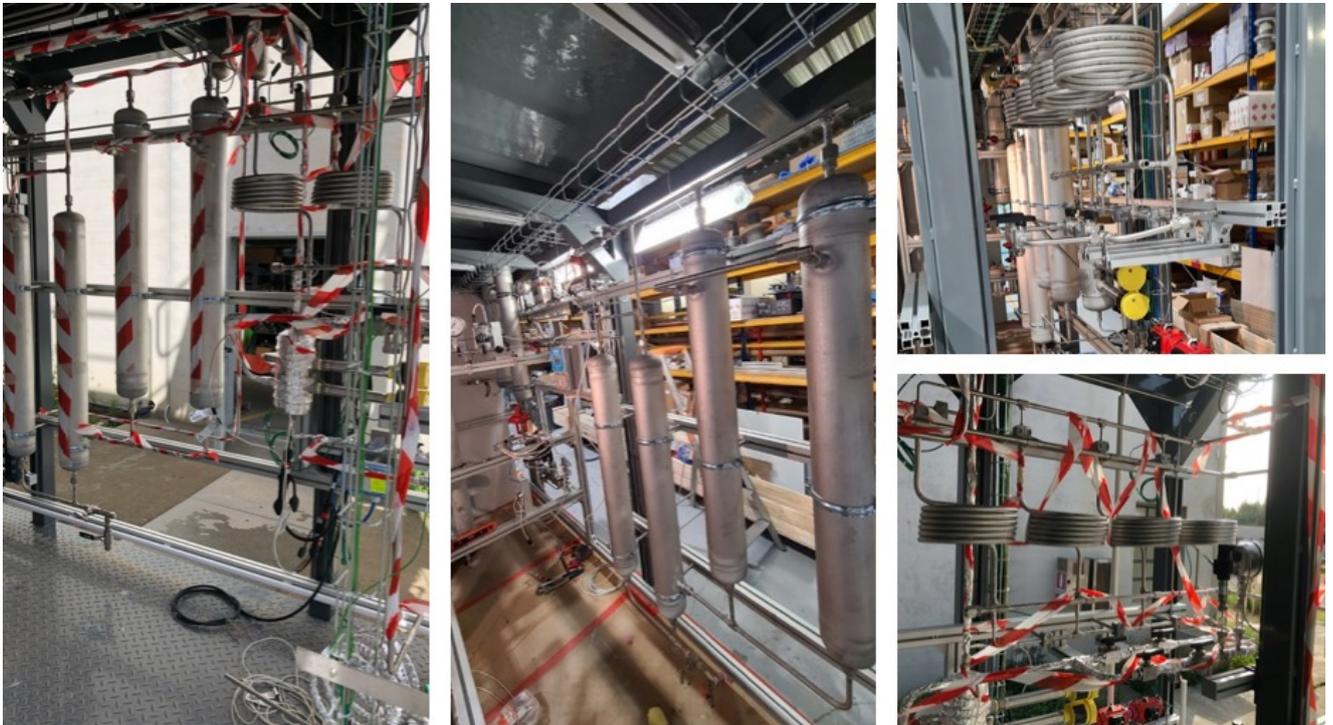


Figura 3.8. Posizionamento finale dei quattro separatori del fluido diatermico (sinistra) e degli scambiatori di calore (destra).

Configurazione del reattore multitubolare

La configurazione a multitubo è stata realizzata attraverso l'impiego di 12 tubi in acciaio inox SS316 con diametro interno di 23 mm e lunghezza pari a 1300 mm, collegati ciascuno in modalità parallela e assemblati all'interno di una struttura in alluminio (Figura 3.9) facilmente posizionabile e mobile.



Figura 3.9. Struttura in profilato di alluminio per l'alloggiamento del reattore multitubolare.

Nella Tabella 3.1 si riportano le caratteristiche tecniche e operative impiegate per la realizzazione finale del reattore multitubolare.

Tabella 3.1. Caratteristiche tecnico/operative di dettaglio del reattore multitubolare.

Materiale di costruzione	Acciaio inox SS316
N° tubi	12
Volume del reattore (1 tubo)	540 cm ³
Volume totale	ca. 6500 cm ³
Lunghezza tubo	1300 mm
Diametro interno	23 mm
Modalità operativa	Isoterma
Temperatura massima	450 °C
Pressione massima	60 barg @350 °C o 30 barg @450 °C
Temperatura di progetto	510 °C
Pressione di progetto	80 barg

Il corpo reattore ha una dimensione di 26,7 × 1400 mm. Si sottolinea che il reattore multitubolare è stato progettato e realizzato in conformità alla direttiva PED/2014/68/EU, mentre le tubazioni di collegamento sono state progettate e realizzate in conformità con la norma ANSI B31.3. La realizzazione finale ha previsto una disposizione del reattore con orientazione verticale e in cui nella testa superiore dei singoli tubi (Figura 3.10) viene alimentata la miscela gassosa e la parte inferiore (Figura 3.10) costituisce l'uscita dei prodotti di reazione e dei gas non convertiti.



Figura 3.10. Realizzazione della configurazione reattoristica multitubolare.

Il reattore multitubolare è inoltre corredato da un ingresso del fluido di riscaldamento/raffreddamento, posto nella parte inferiore, e dalla corrispettiva uscita localizzata nella testa del reattore. Tutte le connessioni di ogni singolo tubo, sia per quanto riguarda le linee gas che quelle dell'olio diatermico sono state realizzate, date le elevate temperatura in gioco, tramite l'utilizzo di specifici giunti a vite con attacco rapido tipo VCR (Figura 3.11). Tale sistema offre l'elevata purezza di una tenuta metallo-metallo, garantendola anche ad alte pressioni. La tenuta viene assicurata attraverso una guarnizione che viene compressa attraverso l'impiego di un dado maschio a corpo esagonale e di un dado femmina. L'alimentazione all'ingresso e l'uscita dei gas dal fondo del reattore sono realizzati attraverso l'uso di tubi in acciaio SS316/316L da ½".

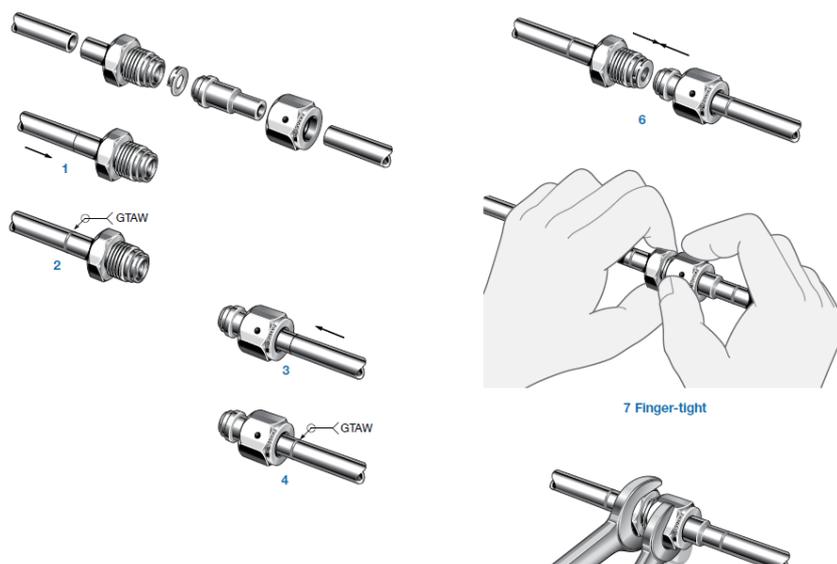


Figura 3.11. Giunzioni VCR costituenti il top e il bottom del reattore multitubolare.

All'interno di ogni singolo tubo sono state posizionate le termocoppie multipunto (con misurazione della temperatura del letto catalitico ogni 218 mm) i cui cavi e le rispettive connessioni sono state fatte passare in un tubo coassiale nella parte inferiore del reattore, in corrispondenza dell'uscita. I 12 reattori assemblati, sono stati fissati nella struttura in alluminio appositamente realizzata e sono stati alloggiati al primo livello dell'impianto.

Configurazione del reattore monotubolare

Questa configurazione è costituita da un singolo reattore tubolare con dimensioni confrontabili alla scala industriale. Questo componente è stato realizzato con l'impiego di un singolo tubo in acciaio inox SS316 con un diametro interno di 35,1 mm e un'altezza di 6615 mm. Per chiarezza si riportano le caratteristiche tecnico-operative di tale configurazione (Tabella 3.2).

Tabella 3.2. Caratteristiche tecnico/operative di dettaglio del reattore monotubolare.

Materiale di costruzione	Acciaio inox SS316 e SS310
N° tubi	1
Volume del reattore	6800 cm ³
Lunghezza	6615 mm
Diametro interno	35.1 mm
Modalità operativa	Isotherma
Temperatura massima	450 °C
Pressione massima	60 barg @350 °C o 30 barg @450 °C
Temperatura di progetto	510 °C
Pressione di progetto	80 barg

Per alloggiare il reattore, di altezza complessiva di circa 7 metri, è stata realizzata una struttura che permetta agevolmente di effettuare le operazioni di montaggio e smontaggio, di caricamento del catalizzatore e di manutenzione. È stata infatti realizzata una sorta di intercapedine delle dimensioni di circa 0,3 m² (Figura 3.12) che si estende dal piano terra sino al secondo piano. In particolare, l'ultimo piano permette un facile accesso alla testa del reattore dove viene caricato il catalizzatore, mentre al piano terra il reattore è posizionato in maniera tale da poter scaricare in modo agevole il catalizzatore usato, senza dover smontare l'intera struttura.



Figura 3.12. Sede di alloggiamento del reattore a singolo tubo.

Anche in questo caso il reattore a singolo tubo è stato realizzato in conformità alla direttiva PED/2014/68/EU e le tubazioni di collegamento in conformità con la norma ANSI B31.3. Come sopra descritto, la disposizione finale del reattore ha un orientamento verticale, in cui la testa superiore (Figura 3.13) rappresenta l'ingresso dei gas di processo e la parte inferiore costituisce l'uscita dei prodotti di reazione e dei gas non convertiti. L'ingresso e l'uscita dei gas di processo sono stati realizzati attraverso l'impiego di tubi in acciaio SS316/316L da ½", come anche gli ingressi e le uscite del fluido diatermico nella camicia del reattore. Contrariamente a quanto realizzato nella configurazione a multitubo, l'ingresso e l'uscita del reattore, sia per la linea gas, che per il fluido di riscaldamento è stata realizzata attraverso una giunzione flangiata. Inoltre, il reattore è costituito da due sezioni (sezione superiore e sezione inferiore) connesse tra loro attraverso una giunzione flangiata. Il reattore è stato ancorato alla struttura dell'impianto tramite l'uso di collari in acciaio e staffe imbullonate alla struttura portante.



Figura 3.13. Realizzazione della configurazione reattoristica multitubolare.

Anche in questo caso, il controllo della temperatura all'interno del reattore è realizzato attraverso l'impiego di una termocoppia multipunto disposta coassialmente al centro del reattore lungo tutta la sua lunghezza. In particolare la termocoppia multipunto permette il controllo della temperatura in 11 punti diversi del letto catalitico.

3.3 Sezione di ricircolo

Questa sezione, fondamentale in tutti quei processi caratterizzati da una limitata conversione all'equilibrio, consente il ricircolo dei composti non reagiti dall'uscita del reattore, comprimendoli e rinviandoli nuovamente all'ingresso del reattore, previa miscelazione – se necessaria – con gas freschi. Tale sezione è costituita da tre componenti principali:

- compressore dei gas di ricircolo del tipo elettrico a diaframma metallico, con raffreddamento a liquido, funzionante in modalità ad anello;
- due vasi di espansione della capacità di 1 litro ciascuno operante ad una temperatura operativa di 30 °C e una pressione di 70 bar (temperatura e pressione di progetto di 100 °C e 80 bar, rispettivamente);
- valvola di controllo e sistema di misura del flusso massico ad effetto *Coriolis* per la misura e il controllo della portata del gas ricircolato.

L'intera sezione è stata posizionata adiacente alla sezione di alimentazione e miscelazione gas (Figura 3.14) con il compressore collocato a fianco, sotto le scale (Figura 3.15).

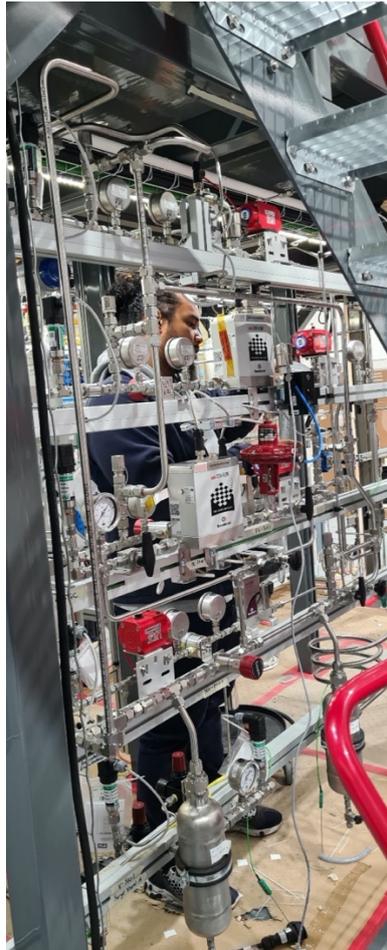


Figura 3.14. Disposizione finale della linea di ricircolo gas.



Figura 3.15. Disposizione finale del compressore.

Come da progettazione di dettaglio, la linea è stata realizzata con una tubazione in acciaio SS316 di diametro 1/2" fornita nell'ordine da un filtro da 15 µm, una valvola di intercettazione, dai vasi espansori sopra menzionati, un trasduttore di pressione, un regolatore di pressione seguito da una misura di pressione (Figura 3.16).



Figura 3.16. Realizzazione della linea di ricircolo gas.

Il compressore elettrico è del tipo a due teste non lubrificato, selezionato per evitare trascinamenti di olio nel flusso di ricircolo, che funziona in modalità "loop-mode" in modo da consentire un ampio intervallo di portate di ricircolo. Questo tipo di compressore è in grado di garantire un livello di trafilamento compreso tra 10^{-6} e 10^{-4} scc/s di elio. Per chiarezza vengono di seguito riportate le caratteristiche tecniche del compressore di ricircolo (Tabella 3.3).

Tabella 3.3. Caratteristiche tecniche e operative di dettaglio del compressore di ricircolo.

Materiale di costruzione	Acciaio inox SS301 e SS316
Portata massima	32 Nm ³ /h
Pressione massima	70 barg
Pressione differenziale massima	10 barg
Consumo di acqua massimo	10 dm ³ /min (a 20 °C)
Consumo energetico	(400 V, 50 Hz); 11 kW

3.4 Sezione di separazione e raccolta dei prodotti

A valle della sezione di reazione è presente un sistema di separazione gas-liquido con la duplice finalità di consentire il recupero dei prodotti della reazione condensabili e incondensabili e la separazione dei gas che vengono rinviati alla sezione di ricircolo. Il sistema di separazione dovrà garantire una separazione efficace tra il gas (fase incondensabile) e il liquido (fase condensabile) e al contempo dovrà assicurare un trascinamento minimo del gas separato nella fase liquida raccolta. Gli elementi costituenti l'intera sezione sono di seguito riportati:

- Trappola per cere per il recupero di eventuali prodotti ad elevato peso molecolare che potrebbero formarsi durante la reazione.
- Separatore gas-liquido ad alta pressione accoppiato con *chiller*.

- Separatore gas-liquido a bassa pressione per separare la fase gassosa dalle due fasi condensate (acquosa e organica).
- Condensatore accoppiato con *chiller* per la separazione spinta della fase liquida.
- Misuratori di portata massica ad effetto *Coriolis* per la quantificazione del liquido prodotto.

Principio di funzionamento della sezione

L'effluente gassoso caldo in uscita dal reattore scambia calore con l'alimentazione fresca, e viene inviato successivamente alla trappola per cere. Questa viene mantenuta a una temperatura di 180 °C, idonea per la separazione dei composti alto-bollenti. I gas in uscita dalla trappola vengono poi convogliati al separatore di alta pressione che, attraverso l'abbassamento di temperatura, permette la condensazione dell'acqua, del metanolo e del DME formati durante la reazione. La fase gas in uscita dal separatore viene inviata ad un condensatore in cui i gas permanenti vengono completamente separati dai prodotti liquidi di reazione. Il condensatore ha la funzione di aumentare ulteriormente la separazione gas-liquido; questo viene fatto attraverso un *chiller* a circuito chiuso che, regolando accuratamente la temperatura, permettere una maggiore separazione. I gas in uscita dal condensatore vengono inviati in parte al *loop* di ricircolo e in parte al *vent*; inoltre, una piccola porzione di questi è inviata al gascromatografo per l'analisi qualitativa e quantitativa. Inoltre è stata posizionata una valvola di controllo per la regolazione della pressione all'uscita dal condensatore. Il sistema di separazione tra il prodotto liquido e le componenti acquose e organiche (quando presenti) è composto di due stadi ad alta e bassa pressione. Tra i due stadi avviene la miscelazione con il prodotto liquido proveniente dal condensatore. A supporto dello *stripping* dal liquido viene inviato un piccolo flusso di azoto a bassa pressione per consentire il massimo recupero del gas, eventualmente disciolto nel liquido.

Vengono di seguito descritte le fasi di realizzazione e installazione dei componenti dell'intera sezione.

Trappola per cere e separatori gas-liquido ad alta e bassa pressione

La trappola per cere è costituita da un contenitore realizzato in acciaio inossidabile (SS316L) della capacità di circa 2 litri (Figura 3.17), dalla lunghezza di 358,6 mm e dal diametro interno di 114 mm. Dalla figura si evincono gli ingressi e le uscite dei gas (sul lato sinistro del serbatoio) e degli eventuali liquidi (sul fondo del *serbatoio*). Sulla parte destra trovano invece alloggio i misuratori del livello del liquido la cui quantità è rilevata grazie alla differenza di pressione fra la parte superiore e inferiore del serbatoio, usando un misuratore di pressione differenziale. I separatori (di alta e di bassa pressione) e il condensatore hanno il compito di separare i prodotti gassosi non reagiti durante la normale marcia dell'impianto dalla fase liquida permanente, minimizzando il trascinarsi di particelle liquide nel gas. La condensazione dei liquidi all'interno del separatore viene effettuata tramite la circolazione di acqua all'interno della doppia camicia posta nella parte superiore del separatore. Come per la trappola, questi componenti sono costituiti da serbatoi in acciaio inossidabile (SS316L) della capacità di 8 e 10 litri, rispettivamente per il separatore di alta pressione e per il condensatore, e per il separatore di bassa pressione (Figura 3.17). Anche in questo caso in ciascun *serbatoio* sono stati ricavati gli ingressi e le uscite dei gas e dei liquidi. In particolare, nel separatore di bassa pressione è stato inoltre realizzato un ingresso addizionale, dedicato ad ospitare il trasmettitore di livello.

La fase gassosa recuperata in modo continuo dal separatore ad alta pressione viene inviata al condensatore di alta pressione, anch'esso raffreddato tramite un *chiller* (Figura 3.18), costituito da un tubo spiralato di lunghezza pari a 6 m, seguito da un contenitore per recuperare la fase liquida, che viene poi rinviata al fondo del separatore di alta pressione.



Figura 3.17. Realizzazione della trappola per cere (sinistra) e dei separatori di alta e di bassa pressione e del condensatore (destra).



Figura 3.18. Gruppo *chiller* per il raffreddamento e ricircolo dell'acqua.

Una volta realizzati tutti i singoli componenti, questi sono stati installati nella loro posizione finale e interconnessi come da progettazione definitiva. L'intera sezione è stata posizionata al piano terra

dell'impianto. La figura sottostante (Figura 3.19) riporta la sezione di separazione gas-liquido di alta e bassa pressione in fase di installazione.



Figura 3.19. Installazione della sezione di separazione gas-liquido di alta e di bassa pressione.

Una volta che tutti i prodotti sono stati separati, i differenti effluenti vengono inviati verso il sistema di raccolta (Figura 3.20). Questa è suddivisa in tre rami principali costituiti da:

- Raccolta dei prodotti di reazione in fase organica.
- Raccolta dei prodotti di reazione in fase acquosa.
- Raccolta delle cere.

I prodotti di reazione in fase organica, tra cui il principale è il dimetiletere, sono inviati ad un sistema di campionamento pressurizzato che viene poi, se non stoccato, inviato in torcia. I prodotti di reazione in fase acquosa (principalmente metanolo e acqua) vengono convogliati ad un sistema di raccolta a temperatura e pressione ambiente costituito da un serbatoio con capacità di 50 litri. La terza linea di campionamento, totalmente elettroriscaldata, è destinata alla raccolta delle eventuali cere prodotte in un serbatoio in vetro da 5 litri.

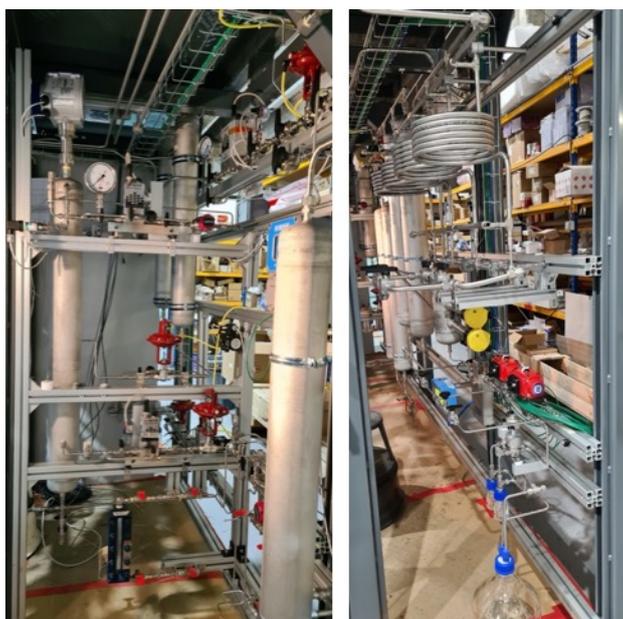


Figura 3.20. Uscita dei prodotti liquidi dal separatore di bassa pressione (sinistra) e sistema di campionamento delle cere in uscita dalla trappola (destra).

3.5 Sistema di campionamento e analisi dei prodotti

Il sistema di campionamento e analisi delle specie fluide coinvolte è necessario per conoscere, in tempo reale, l'evoluzione del processo nelle varie sezioni dell'impianto. Il campionamento, in particolare, consente di raccogliere e analizzare un'opportuna e rappresentativa porzione di fluido. Quest'operazione non deve condizionare o influenzare il processo in corso per cui i punti di campionamento sono stati realizzati tenendo conto delle condizioni operative (temperatura e pressione) previste, al fine di garantire la corretta analisi del gas in esame. I punti di campionamento (Figura 3.21) sono realizzati in modo da consentire il prelievo del gas e il suo invio ai sistemi di analisi previsti. Il gas, una volta campionato, può essere riscaldato e può attraversare dei sistemi di protezione (Figura 3.22) per favorire la condensazione dell'eventuale umidità (tramite l'utilizzo di filtri): questo serve per proteggere la strumentazione a valle e per "preparare" il gas all'analisi.



Figura 3.21. Punti di campionamento gas.



Figura 3.22. Sistema pneumatico di campionamento gas per analizzatore NDIR/TCD (in alto) e per GC (in basso).

L'analisi in tempo reale (online) delle principali specie gassose coinvolte nel processo ovvero ossido di carbonio, metano, anidride carbonica e idrogeno, avviene grazie ad un analizzatore (Figura 3.23) dotato di due diversi detector: NDIR (*Non-Dispersive Infrared*) per le prime tre specie, TCD (Termoconduttività) per l'idrogeno. Il gas, tramite i punti di campionamento, viene convogliato all'analizzatore dove un flussimetro indica il valore della portata e ne consente la sua regolazione e in questo modo si può garantire il corretto ingresso della miscela gassosa nello strumento. Sul display vengono riportati in tempo reale i valori di concentrazione delle singole specie: questi vengono utilizzati per la regolazione automatica del rapporto

molare H_2/CO_2 tra l'alimentazione fresh e quella del ricircolo. I dati di prova sono anche registrati e resi disponibili successivamente per avere uno storico di tutte le fasi della prova condotta. Il gas, prima dell'ingresso nell'analizzatore, attraversa un sistema di pulizia dotato di filtri per eliminare l'umidità (Figura 3.24).



Figura 3.23. Analizzatore online NDIR (per CO , CH_4 e CO_2) e TCD (per H_2) (a sinistra) e Gascromatografo (a destra).



Figura 3.24. Sistema di pulizia e protezione dell'analizzatore NDIR/TCD.

Per l'analisi qualitativa e quantitativa delle ulteriori specie fluide coinvolte nel processo si utilizza un gascromatografo (Figura 3.25) che, posto a valle dell'impianto, consente la determinazione sia delle specie gassose già misurate col sistema online (e in questo senso si potrà disporre di una doppia misura), sia delle restanti come ad esempio ossigeno, azoto, metanolo, DME ma anche idrocarburi leggeri sino a C_4/C_5 . Il sistema, impiegando opportuni gas carrier come azoto, elio o argon, dispone di due rilevatori: uno a termocoducibilità (TCD), uno a ionizzazione di fiamma (FID). Le colonne analitiche sono due: Molsieve (per H_2 , O_2 , N_2 , CH_4 e CO) e Pora-PLOT (per le restanti specie). L'analizzatore GC, rispetto a quello online, richiede dei tempi di analisi più elevati, necessari perché il gas attraversi le colonne analitiche. Il riscaldamento del

gas tramite opportuna sonda posta a monte del GC permette anche di rilevare la presenza di specie quali metanolo e acqua allo stato gassoso (Figura 3.26).



Figura 3.25. Gascromatografo.



Figura 3.26. Sonda per il riscaldamento del gas e sistema di protezione umidità (setacci molecolari) posto a monte del GC.

3.6 Strumentazione

La strumentazione di misura è fondamentale per la corretta analisi dell'andamento del processo poiché permette di valutare i principali parametri di processo quali: temperature, pressioni, portate, livelli dell'impianto. Questi parametri sono raccolti e analizzati dal sistema di regolazione e controllo.

Sull'impianto prototipale sono state installate le seguenti strumentazioni:

- Trasmettitore di pressione differenziale (DP).
- Filtri (F).
- Misuratori di portata (FE).
- Misuratori regolatori di portata (FIC).
- Valvole regolatrici di portata (FV).
- Misuratori indicatori di livello (LI e LT).
- Valvole di controllo della pressione (PCV).
- Trasmettitore e misuratore di pressione (PG e PT).
- Valvole di sicurezza (PSV).
- Dischi di rottura (RD).
- Termocoppie (TE).
- Valvole pneumatiche (UV).

Le strumentazioni installate sull'impianto hanno un'elevata classe di precisione. Nelle Figura 3.27, Figura 3.28 e Figura 3.29 sono riportate le immagini relative ad alcune delle strumentazioni di misura implementate nell'impianto.



Figura 3.27. Esempio di strumentazione di misura montata sull'impianto.



Figura 3.28. Esempio di strumentazione di misura montata sull'impianto.



Figura 3.29. Esempio di strumentazione di misura montata sull'impianto.

Tutta la strumentazione elettrica è gestita da remoto attraverso il sistema di regolazione e controllo dell'impianto che è descritto nel paragrafo successivo.

3.7 Sistema di regolazione e controllo

Il sistema di controllo dell'impianto è basato su architettura PLC COMPACTLOGIX 5370 L3 della Rockwell Automation.

Tali controllori sono dotati di sicurezza integrata e utilizzano lo stesso software di programmazione, lo stesso protocollo di rete e le stesse funzionalità informative comuni a tutti i controllori Logix della Rockwell Automation. Questo sistema offre un ambiente di sviluppo comune per tutte le fasi di controllo. Gli strumenti implementati e le caratteristiche intrinseche del PLC aiutano gli utenti a semplificare la diagnostica e la ricerca guasti.



Figura 3.30. PLC COMPACTLOGIX 5370 L3.

I PLC COMPACTLOGIX 5370 L3 rappresentano una scelta ideale per l'applicazione *Power-to-Fuels*. Essi sono dotati di supporto per Integrated Motion su EtherNet/IP™ per ottenere la massima scalabilità dell'applicazione.

Supportano tipologie di rete *Device Level Ring* (DLR) per fornire un rapido rilevamento e riconfigurazione dei guasti di rete e per supportare le applicazioni di controllo più esigenti.

I PLC COMPACTLOGIX 5370 L3 sono dotati di una scheda SD di capacità fino a 2 GB per rapide operazioni di salvataggio e ripristino del programma.

Il sistema offre supporto per la connessione Modbus TCP, nonché per dispositivi quali stampanti, lettori di codici a barre e server; inoltre, vi è la possibilità di connessione con opzioni HMI per schermi di diverse tipologie e dimensioni.

Dal punto di vista Hardware (HW), questi consentono un fattore di forma e dimensioni inferiori rispetto ad altri PLC concorrenti, in modo da massimizzare lo spazio nell'armadio di controllo.

Le caratteristiche tecniche del PLC COMPACTLOGIX 5370 L3, versione 1769-L3ERM, sono riportate nella Tabella 3.4.

Tabella 3.4. Caratteristiche tecniche del PLC COMPACTLOGIX 5370 L3, versione 1769-L3ERM.

PLC COMPACTLOGIX 5370	1769-L36ERM
Memoria utente	3 MB
Task di controllo	32
Programmi per task	100
Integrated Motion	Asse ad anello di posizionamento CIP motion 16 assi
Dimensioni	55 mm di larghezza x 118 mm di altezza x 105 mm di profondità
Certificazioni	cULH (Classe I Divisione 2), KCC/UL (UL 508), ULH (Classi I e II, Divisione 2 e Classe III, (Divisioni 1 e 2)/ATEX, CE, C-Tick, GOST-R e marina
Moduli di espansione locali	30
Punti I/O di espansione locali	960
Moduli di comunicazione aggiuntivi	DeviceNet con 1769-SDN o dispositivo di terzi
Scheda di memoria flash	Scheda di memoria SD certificata e con classificazione industriale (opzioni da 1 e 2 GB);
Servoazionamenti (anello di posizione CIP)	16
Nodi I/O Ethernet/IP	48
Assi virtuali	100
Solo feedback, coppia, velocità, Vhz (controllori CIP motion max.)	48
Assi/ms	2
Supporto Kinematics	Sì
Software/Firmware	RSLogix 5000 V20 ed RSLinx Classic V2.59 – firmware v20.1x o superiore

Il PLC è alloggiato in un quadro di potenza e controllo sul quale confluiscono sia i cavi di potenza che quelli di segnale dell'impianto prototipale. (Figura 3.31).



Figura 3.31. Interno del quadro di regolazione e controllo.

Il software realizzato per l'acquisizione dei dati e la supervisione dell'impianto esegue le seguenti operazioni:

- Acquisizione dei dati delle misure dei vari parametri operativi (temperatura, pressione, portate ecc...).
- Visualizzazione continua delle misure sotto forma, ad esempio, di linee di tendenze.
- Registrazione delle misure nella workstation.
- Visualizzazione del sinottico generale del sistema e indicazione dello stato di ciascun componente.

3.8 Criteri di regolazione e controllo

Nel presente paragrafo viene descritta l'architettura del sistema di regolazione e controllo dell'impianto prototipale (Figura 3.32); di seguito vengono identificati i sottosistemi coinvolti, gli stati di funzionamento dell'impianto e le sequenze operative; inoltre vengono identificate le logiche di regolazione, gli allarmi e le cause di blocco.

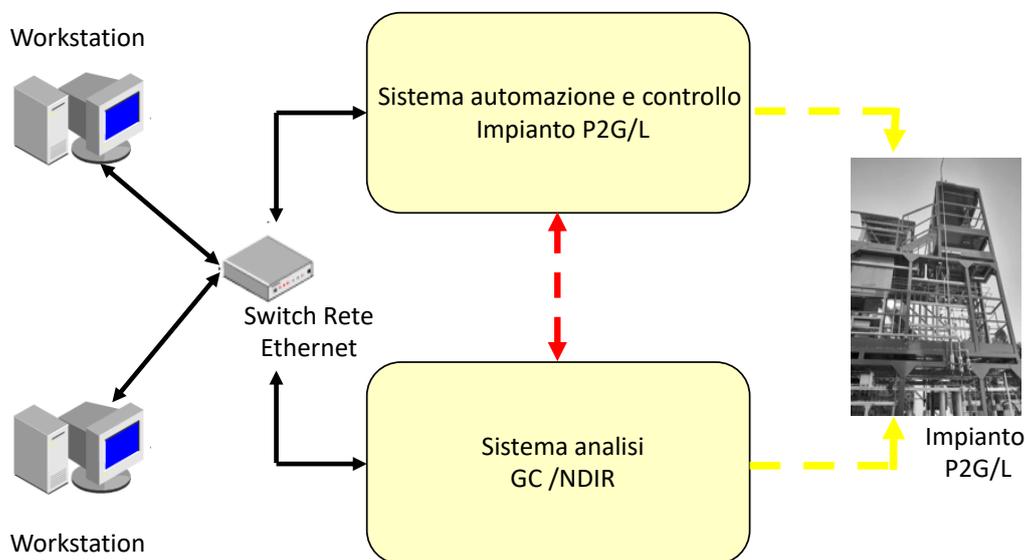


Figura 3.32. Architettura del sistema di regolazione e controllo.

La funzione del Controllore è quella di coordinamento e segnalazione di tutto il sistema in oggetto; effettua pertanto tutto il controllo degli azionamenti, le sequenze di configurazione di impianto e le sequenze di messa in sicurezza di impianto, la gestione degli interblocchi, la visualizzazione sinottica ed il coordinamento degli stati di tutti i sottosistemi interessati allo svolgimento della funzione dell'impianto nella sua globalità.

Il Controllore acquisisce gli input da campo e fornisce i comandi mediante schede di I/O dedicate. Il monitoraggio dell'impianto è effettuato mediante sinottici implementati sul software di gestione.

È possibile:

- Muoversi da un sinottico all'altro sia tramite mouse sia tramite tasti dedicati.
- Verificare lo stato delle utenze in base al colore (marcia/arresto/anomalia).
- Visualizzare tutte le grandezze di interesse.

È anche possibile accedere a menù dedicati per l'impostazione di set-point o parametri vari o per l'invio di comandi e sono stati previsti sinottici di vista d'insieme e sinottici dedicati alla visualizzazione di dettaglio di ogni zona o circuito da controllare. Per impedire accessi non autorizzati, le pagine di comando utenze e/o modifica parametri/set sono protette da password.

Un particolare sinottico è dedicato alla gestione degli allarmi, secondo le sequenze di gestione dell'impianto implementate dai programmatori. Sono state inoltre previste alcune pagine di trend per la visualizzazione sotto forma di grafico on-line dell'andamento di grandezze quali: pressioni, temperature, portate dei fluidi e livelli dei liquidi. I dati sono archiviati su disco permettendo l'esportazione degli stessi e la visualizzazione degli storici.

Il sistema di controllo

L'HW necessario alla realizzazione del sistema di automazione è realizzato mediante i seguenti componenti:

- Un'unità Controllore (PLC) completa delle schede di I/O.
- Un PC utilizzato come stazione di supervisione/programmazione.
- Le reti di comunicazione dedicate alla supervisione/programmazione (comprehensive di tutto il necessario alla comunicazione).

Unità Controllore

Il Controllore gestisce tutto il sistema in oggetto, le sequenze di configurazione di impianto e le sequenze di messa in sicurezza di impianto, gli interblocchi, la visualizzazione sinottica ed il coordinamento degli stati di tutti i sottosistemi interessati allo svolgimento della funzione dell'impianto nella sua globalità. Il Controllore acquisisce gli input fisici ed aziona i suoi comandi mediante schede di I/O.

Unità Interfaccia Operatore

La stazione di interfaccia operatore è costituita da una workstation, che assolve le seguenti funzioni:

- Funzioni di display video per l'osservazione del processo.
- Funzioni di manovra per la conduzione del processo.
- Funzione di raccolta e archiviazione dei dati ed eventi.
- Funzione di tuning parametri protetta da password.

Reti di comunicazione

La comunicazione tra il sistema di controllo e la stazione di supervisione avviene tramite rete ethernet (protocollo TCP/IP).

Modalità di funzionamento dell'impianto

Si definiscono le seguenti modalità di funzionamento per l'impianto:

- MANUALE
- AUTOMATICO

In modalità MANUALE l'operatore ha il controllo completo dell'impianto ed i comandi sono da lui implementati manualmente: sono presenti degli interblocchi di sicurezza al fine di evitare danni accidentali dovuti a eventuali errori di manovra.

La selezione delle modalità di funzionamento è operata tramite software, in una pagina dedicata.

In modalità AUTOMATICO tutti i dispositivi e le strumentazioni interessate dal processo ricevono i comandi da sequenze preimpostate dai programmatori.

Modi operativi valvole on/off

I modi operativi delle valvole On/off sono:

- AUTOMATICO
- MANUALE

La selezione tra i due 2 modi operativi può essere effettuata mediante supervisore.

In modo Automatico le valvole si aprono e si chiudono da comandi di sequenza. In modo Manuale l'operatore può aprire e chiudere a suo piacimento (se lo stato dell'apparecchiatura glielo permette senza controindicazioni per la sicurezza di impianto).

Modi operativi valvole regolazione

I modi operativi delle valvole di regolazione sono:

- AUTOMATICO
- MANUALE

La selezione tra i due modi operativi è effettuata mediante supervisore .

In AUTOMATICO i loop di regolazione sono chiusi ed il set point è impostato dall'operatore mediante supervisione.

In MANUALE i loop di regolazione sono aperti e l'operatore agisce direttamente sulla posizione della valvola.

Regolazioni principali

I principali parametri di impianto regolabili sono:

- Portata.
- Temperatura.
- Pressione.
- Livello liquidi.
- Rapporto stechiometrico H₂/CO₂.

Di seguito si riportano alcuni loop di controllo con regolatori PID (Proporzionale, Integrativo, Derivativo).

Portata di CO₂

A causa dell'alta viscosità della CO₂, la regolazione della portata non può essere effettuata mediante il misuratore di flusso integrato nelle valvole, così come avviene per gli altri gas (N₂ e H₂), ma viene controllata da un regolatore (PID) a circuito chiuso posizionato fra un misuratore di flusso (FE-1201) e una valvola regolatrice FV-1201, come mostrato in Figura 3.33.

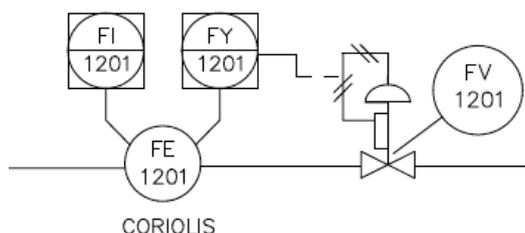


Figura 3.33. Loop di controllo della CO₂.

Portata del gas di ricircolo

Il compressore di ricircolo è connesso a una valvola a spillo capace di mantenere una pressione costante all'ingresso del misuratore FE-5101 (ad effetto *Coriolis*). La quantità di gas che viene ricircolata è impostata dall'operatore e controllata dalla valvola proporzionale FV-5101, grazie alle informazioni del misuratore *Coriolis*. Anche in questo caso è presente un PID (FY-5101) per la regolazione della portata di ricircolo. Il loop di controllo della portata di ricircolo è schematizzato in Figura 3.34.

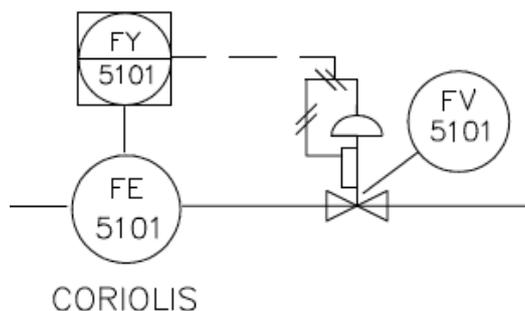


Figura 3.34. Loop di controllo della portata di ricircolo.

Temperatura in ingresso ai reattori

Il gas proveniente dal mixer attraversa lo scambiatore di calore E-2010 (Figura 3.35) in modo da raggiungere le temperature di reazione richieste. Per assicurarsi che la temperatura in ingresso al reattore sia quella adeguata, viene utilizzata una serpentina riscaldata (TZ-2012) controllata da un PID (TIC-2012). La misura di temperatura è effettuata mediante una termocoppia tipo K (TE-2012); è presente, inoltre, una seconda termocoppia (TE-92012) come elemento di sicurezza. La TE-92012 è collegata ad un interruttore di sicurezza (TSS-92012) che interrompe l'alimentazione dei riscaldatori in caso venga raggiunto il valore di allarme.

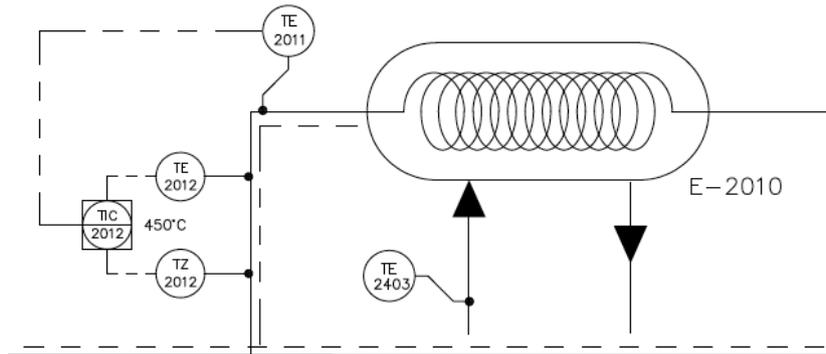


Figura 3.35. Loop di controllo della temperatura in uscita dal riscaldatore E-2010.

Temperatura dell'olio (sezione di riscaldamento)

L'olio diatermico, necessario al riscaldamento dei fluidi di processo, ha la funzione di mantenere costanti le temperature di processo all'interno dei reattori (il calore di reazione è convertito in calore di evaporazione dell'olio). Il riscaldatore E-2400 (visibile in Figura 3.36) è utilizzato per il raggiungimento della temperatura di funzionamento a regime e garantisce le compensazioni dovute alle perdite di temperatura. Per effettuare questo servizio, l'elemento riscaldante (TZ_2401) è controllato da un PID (TIC-2401). Anche qui sono presenti le termocoppie di misura (TE-2401) e quella di sicurezza (TE-92401) governata dall'interruttore di sicurezza (TSS-92401).

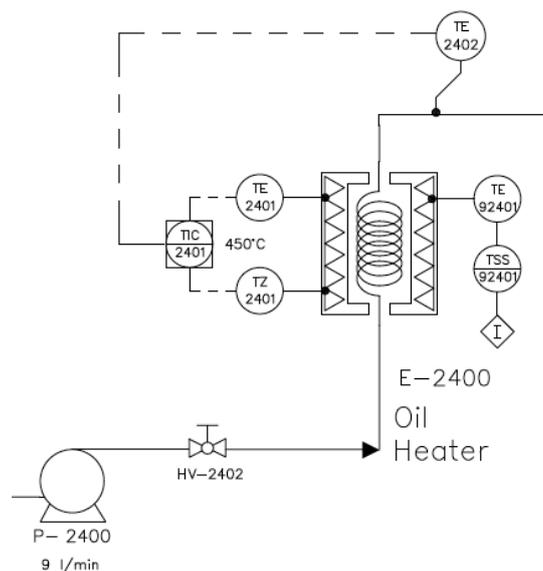


Figura 3.36. Loop di controllo del riscaldatore dell'olio diatermico E-2400.

Temperatura del gas in uscita dal reattore

Il gas uscente dal reattore attraversa uno scambiatore di calore (E-2000, Figura 3.37) al fine di diminuire la sua temperatura prima di giungere alla sezione di separazione. Se la temperatura dovesse essere troppo bassa, potrebbe verificarsi la condensazione di alcuni prodotti indesiderati. Per questo motivo è stata posizionata una serpentina riscaldante (TZ-2301) tra lo scambiatore di calore e la trappola delle cere. Il riscaldatore è controllato da un PID (TIC-2301); la misura di temperatura è effettuata con una termocoppia tipo K (TE-2301) mentre il sistema di sicurezza è governato dalla termocoppia TE-92301 atta alla gestione dell'interruttore di sicurezza TSS-92301.

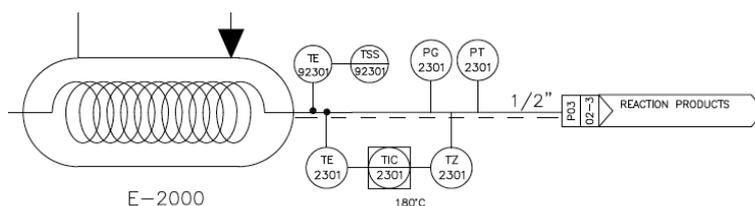


Figura 3.37. Loop di controllo in uscita dal riscaldatore E-2000.

Gli elementi di controllo possono agire, oltre che sulle temperature, anche sulle pressioni, i livelli o le composizioni, come nei casi illustrati di seguito.

Pressione di processo

Il gas proveniente dalla sezione di separazione (Figura 3.38) viene diviso in due parti: una viene convogliata alla sezione di ricircolo; l'altra, invece, viene spinta attraverso la valvola di controllo proporzionale PV-3401; la quantità di gas ricircolata dipende dai comandi impostati dall'operatore. Al fine di mantenere costante la pressione del sistema, la valvola PV-3401 è controllata tramite il PLC grazie ai valori in ingresso dal trasmettitore di pressione PT-3401: un segnale analogico viene indirizzato ad un trasduttore (PIC-3401) che, ricevuto l'impulso, invia una quantità d'aria proporzionale al segnale alla valvola PV-3401.

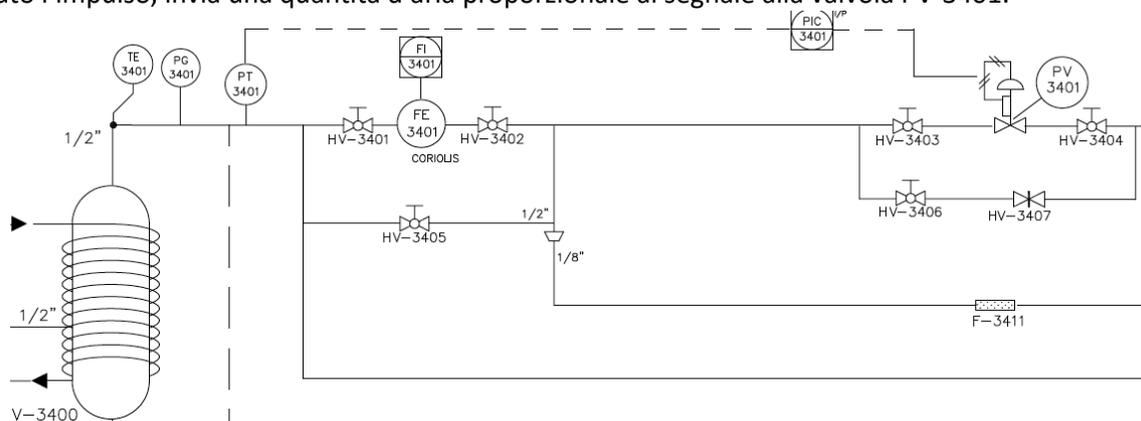


Figura 3.38. Loop di controllo della pressione in uscita dalla sezione di separazione.

Livello del separatore ad alta pressione

La quantità di liquido che fluisce nel separatore ad alta pressione (V-3200, Figura 3.39) è dedotta dalla differenza di pressione fra la parte alta e quella bassa del serbatoio, usando un misuratore di pressione differenziale (DP-3201). Questa informazione viene inviata al PLC che interpreta a seconda del suo settaggio e trasforma la grandezza in un livello in percentuale. Al fine di mantenere un livello costante (impostato dal *set-point* dell'operatore), il PLC invia un segnale ad un trasduttore (LIC-3201) che, sollecitato dall'impulso, invia a sua volta una quantità d'aria necessaria ad azionare la valvola LV-3201.

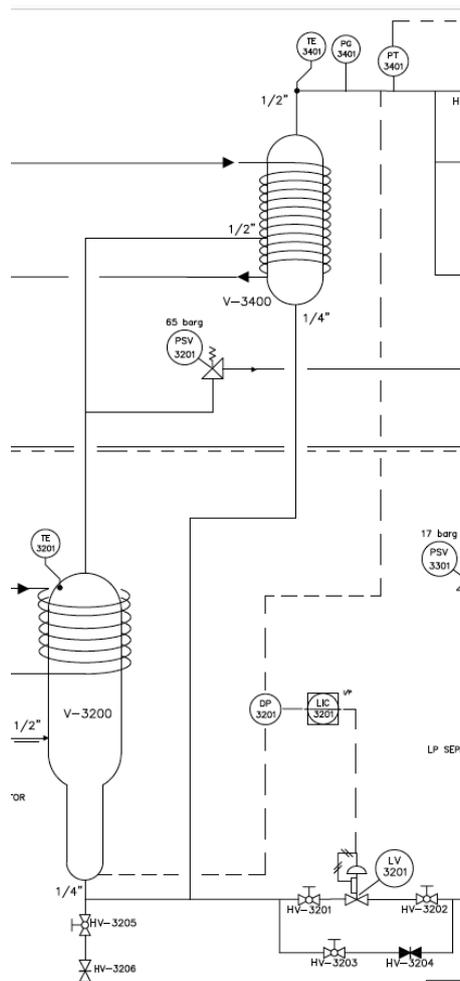


Figura 3.39. Loop di controllo del livello del separatore in alta pressione.

Livello del separatore di bassa pressione (fase organica)

A seconda del processo studiato, il liquido contenuto all'interno del separatore V-3300 può presentarsi in due fasi distinte:

- Fase organica, composta principalmente da dimetiletere.
- Fase acquosa, contenente principalmente una miscela di acqua e metanolo.

La quantità di liquido organico ed il suo livello all'interno del separatore vengono determinati attraverso un misuratore di livello analogico (LT-3311). Questa informazione viene trasmessa al PLC e che interpreta a seconda del suo settaggio e trasforma la grandezza in un livello a seconda della calibrazione dello strumento. Per mantenere il livello costante, ad un set-point desiderato, il PLC invia un segnale analogico al trasduttore LIC-3311 che, sollecitato dall'impulso, invia a sua volta una quantità d'aria necessaria ad azionare la valvola LV-4101.

Livello del separatore di bassa pressione (fase acquosa)

La quantità di liquido in fase acquosa ed il suo livello all'interno del separatore vengono determinati attraverso un misuratore di livello analogico (LS-3311). Questa informazione viene trasmessa al PLC e che interpreta a seconda del suo settaggio e trasforma la grandezza in un livello a seconda della calibrazione dello strumento.

Per mantenere il livello costante, ad un set-point desiderato, il PLC invia un segnale analogico al trasduttore LIC-3321 che, sollecitato dall'impulso, invia a sua volta una quantità d'aria necessaria ad azionare la valvola LV-3321.

Rapporto H_2/CO_2

Durante il funzionamento, diversi parametri possono influire sul rapporto di reazione in ingresso che potrebbe modificare il rapporto stechiometrico. Al fine di prevenire questo problema, il gas di ricircolo è analizzato in tempo reale dall'analizzatore NDIR che consente al PLC di aggiustare la portata di H_2 tramite il FIC-1101.

3.8.1 Descrizione generale della supervisione d'impianto

Il supervisore generale di impianto gestisce tutti i segnali provenienti dall' I/O. Un'indicazione relativa alla struttura delle pagine video è riportata nella Figura 3.40.

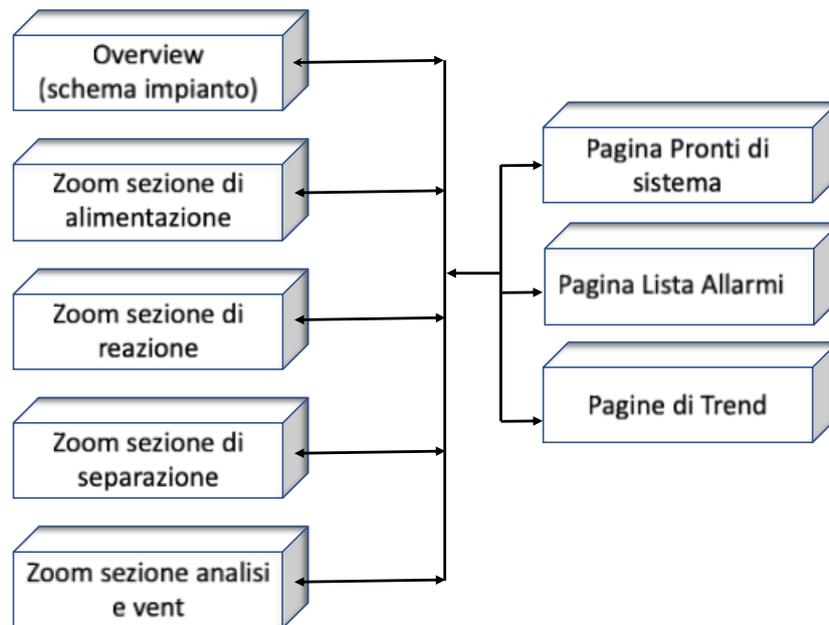


Figura 3.40. Diagramma pagine video.

I sinottici principali sono:

- Vista generale dell'impianto (Overview).
- Sezione di alimentazione (Feed section).
- Sezione di reazione (Reaction section).
- Sezione di separazione (Separator section).
- Sezione di analisi gas e vent (Gas Analysis & vent).
- Lista Allarmi.
- Trends.

Overview: da questa pagina è possibile avere il controllo di tutto l'impianto. Si visualizza lo stato fisico dei vari sottosistemi (sezionatori aperti, chiusi o in allarme, valvole on/off aperte, chiuse, in allarme, posizione valvole di regolazione in percentuale, misure strumentazione in campo, etc.). La pagina di overview è riportata nella Figura 3.41.

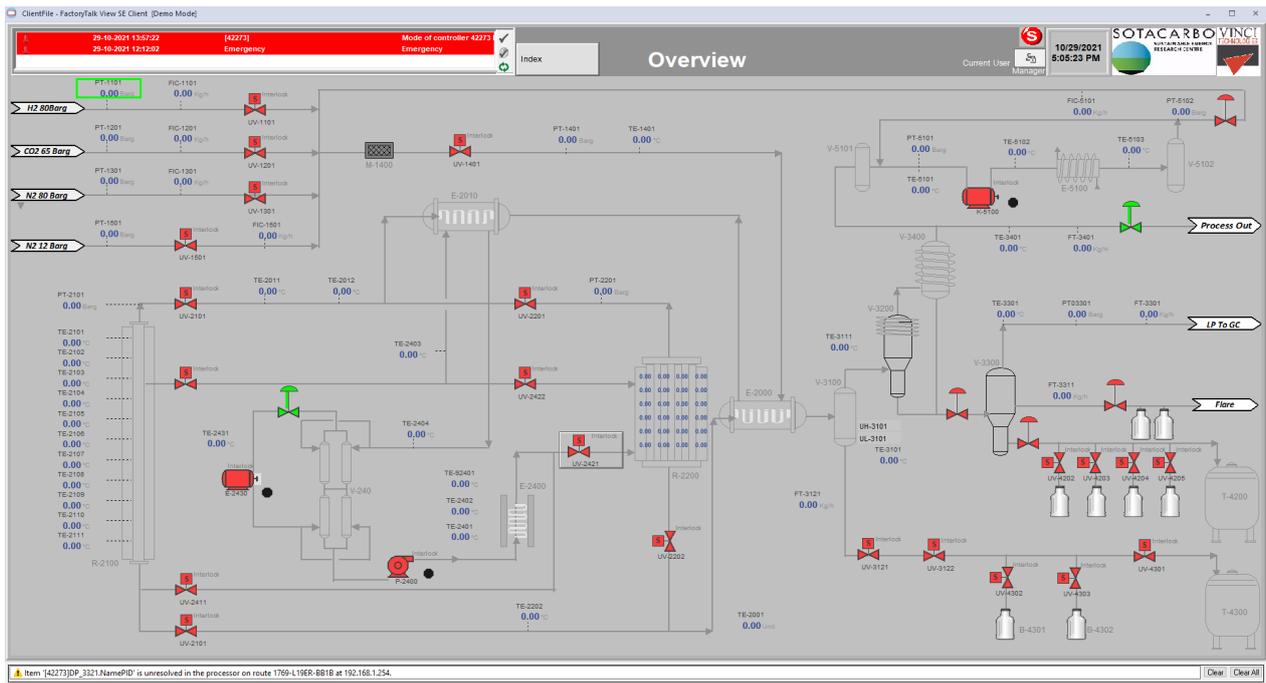


Figura 3.41. Sinottico generale dell'impianto.

Sezione di alimentazione (Feed section): questa pagina rappresenta la sezione di alimentazione con tutte le misure ed i comandi a lei dedicati; tale sezione è riportata in Figura 3.42.

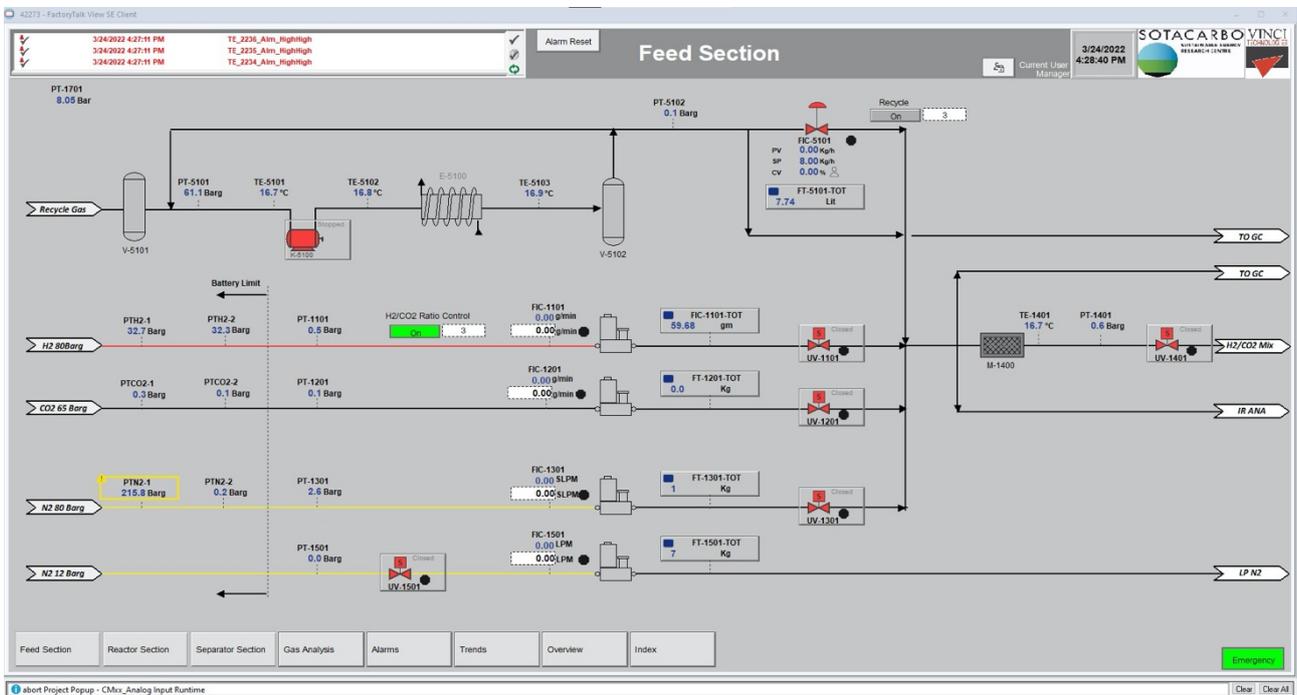


Figura 3.42. Sinottico della sezione di alimentazione.

Sezione di reazione (Reaction section): questa pagina rappresenta la sezione di reazione dell'impianto, con tutte le misure ed i comandi dedicati (Figura 3.43).

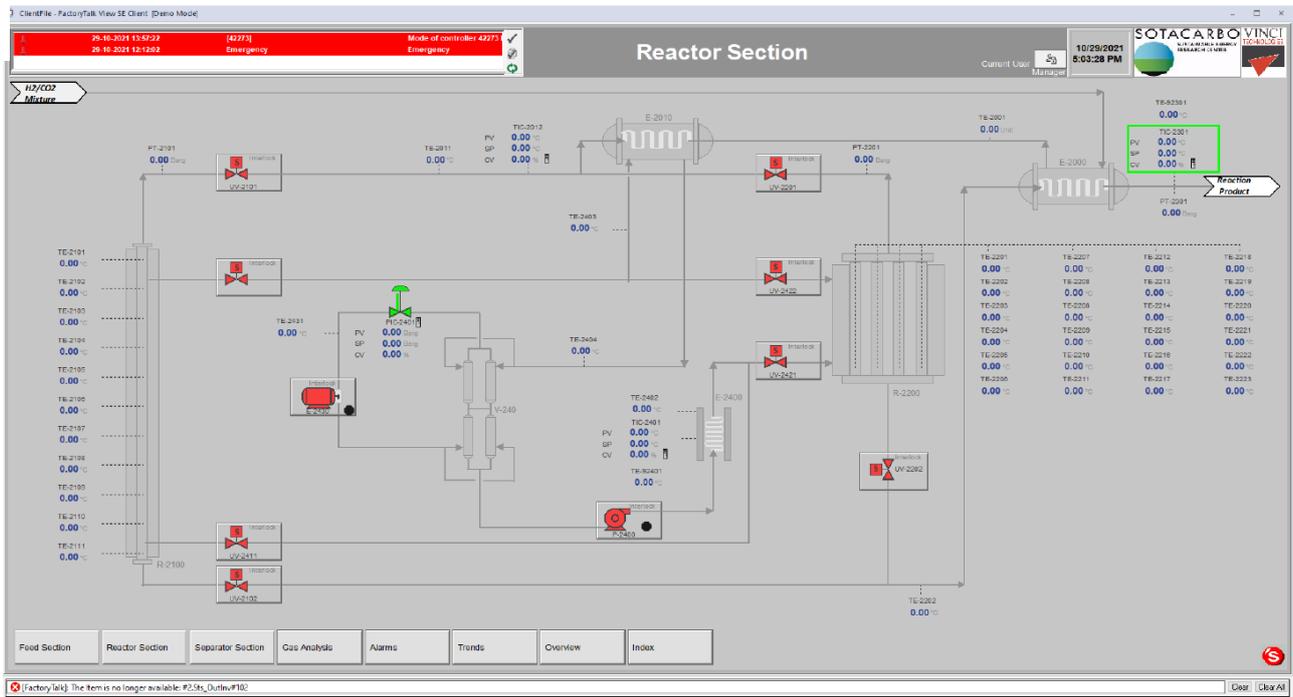


Figura 3.43. Sinottico della sezione di reazione.

Sezione di separazione (Separation section): questa pagina rappresenta la sezione di separazione, schematizzata in Figura 3.44.

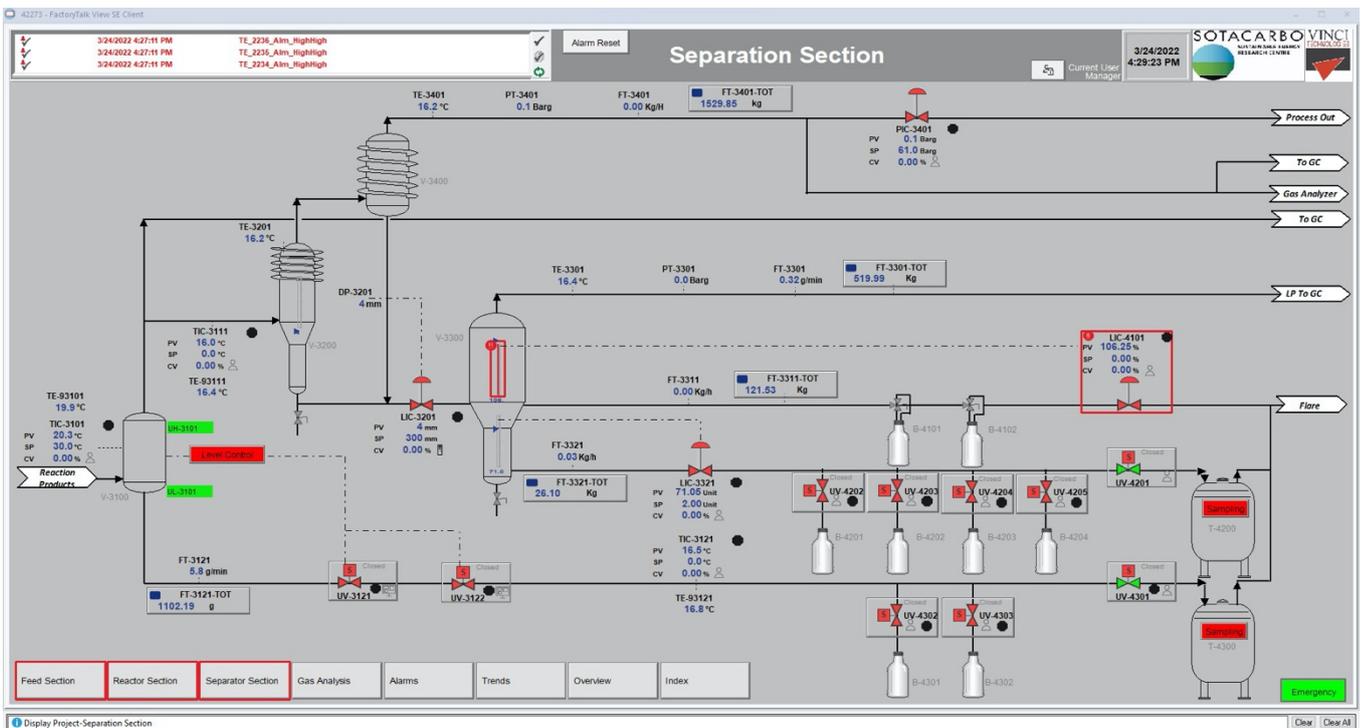


Figura 3.44. Sinottico della sezione di separazione.

Sezione di analisi gas e vent (Gas Analysis & Vent): questa pagina descrive la sezione di analisi gas e dei vent disponibili (Figura 3.45).

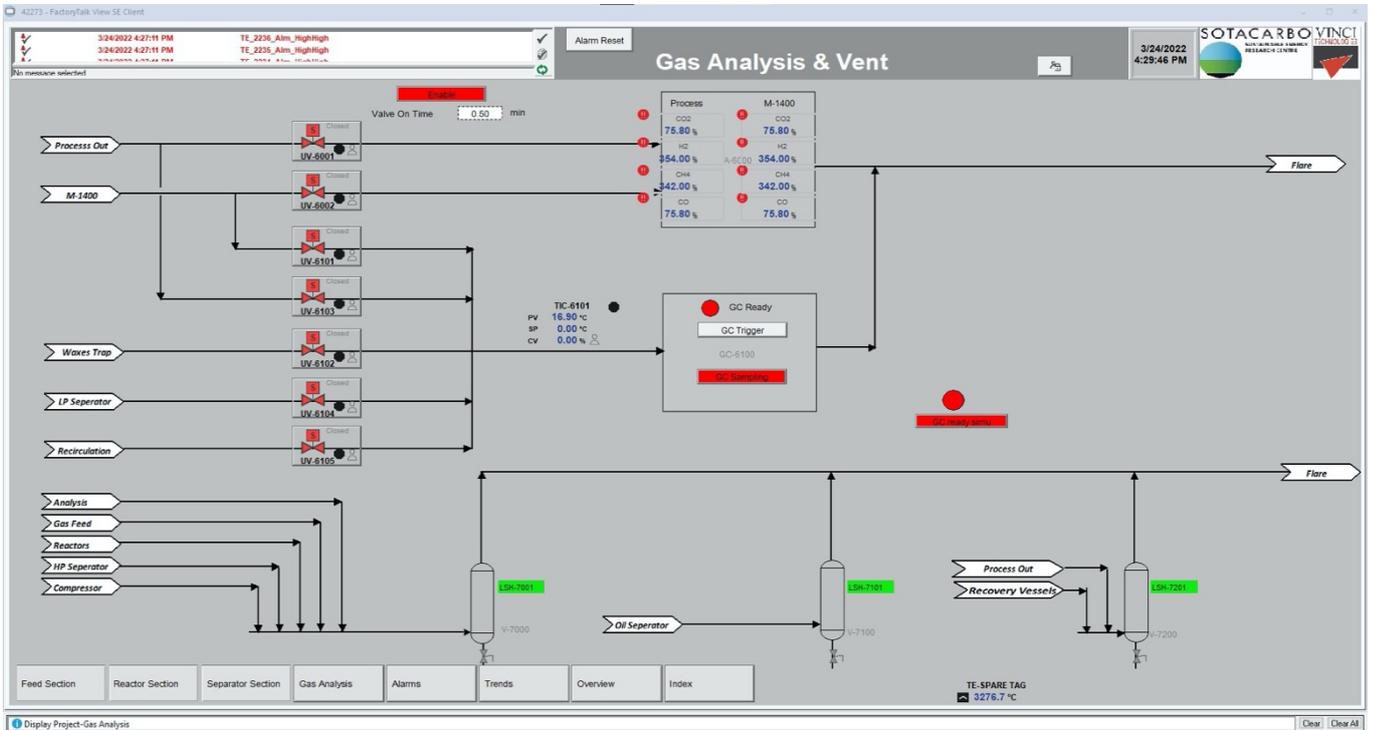


Figura 3.45. Sinottico della sezione di analisi.

Lista Allarmi (Alarms): in questa pagina (Figura 3.46) vengono visualizzati tutti gli allarmi di impianto. Le informazioni che sono elencate per ogni allarme sono:

- Nome identificativo dell'allarme.
- Data.
- Ora di intervento.
- Descrizione.

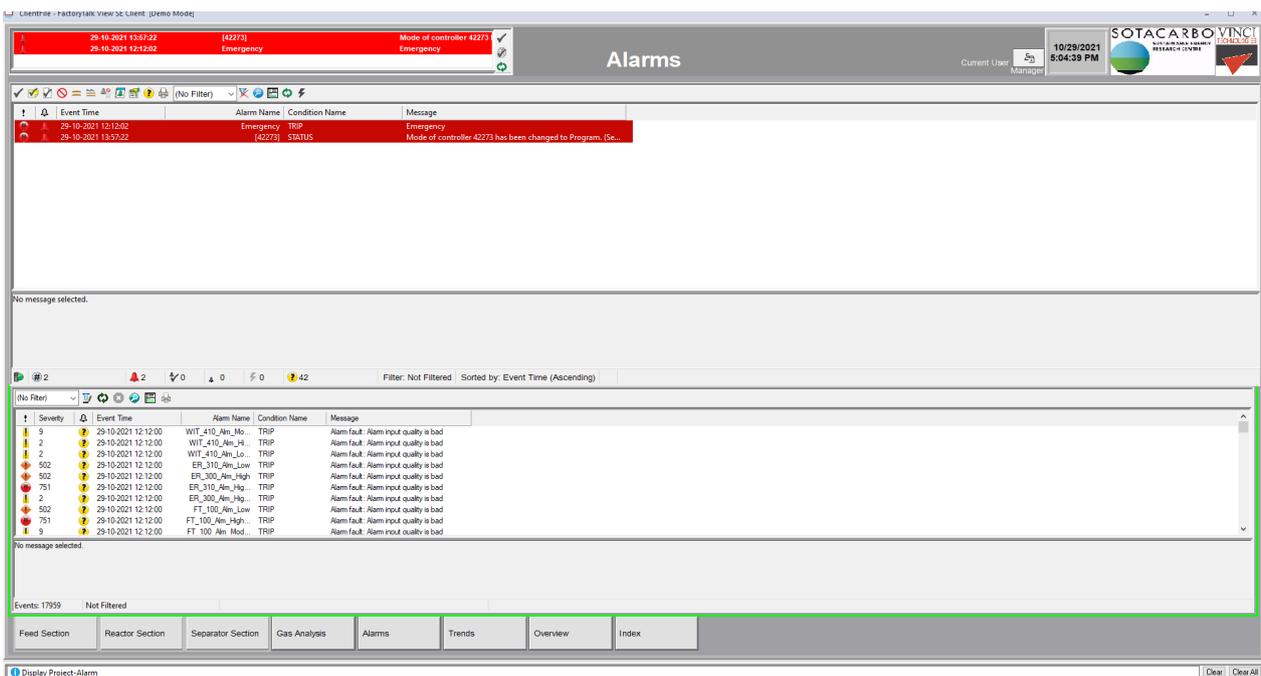


Figura 3.46. Pagina di visualizzazione degli allarmi.

Pagine Trend: attraverso questa pagina (Figura 3.47) è possibile visualizzare i dati sia in tempo reale che in modalità “storica”, definendo gli intervalli di funzionamento di interesse e, eventualmente, salvando le finestre temporali definite.

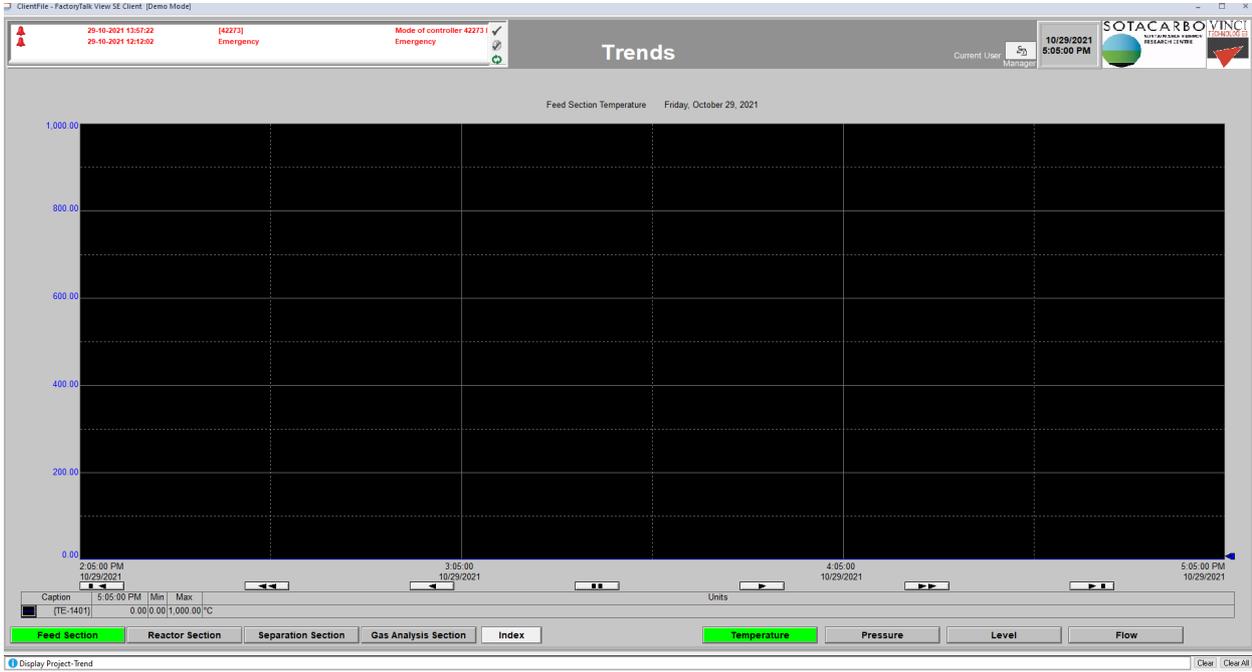


Figura 3.47. Pagina di visualizzazione dei trend di misura.

3.9 Struttura metallica e basamento di ancoraggio

Oltre ai vari componenti finora descritti, l'impianto prototipale è costituito da una struttura in carpenteria metallica per l'alloggiamento dei reattori, delle apparecchiature e del *piping*. Complessivamente il castelletto è formato da tre strutture modulari connesse tra di loro tramite giunzioni bullonate. La struttura presenta uno sviluppo in pianta di 3x4,5 m. Tale struttura è stata realizzata con profili commerciali delle dimensioni di 80x80x4 cm, pre-assemblati e saldati in officina, e successivamente assemblati tra loro mediante unioni saldate a piè d'opera. Per il piano di calpestio della struttura si è ricorso a un grigliato elettrosaldato. Per la carpenteria, è stato utilizzato un acciaio strutturale S275 JR.



Figura 3.48 – Struttura metallica (assemblaggio in officina).

Si è ritenuto opportuno eseguire un basamento di ancoraggio, non previsto nella fase iniziale della progettazione, che, installato in maniera solidale alla platea esistente, va a compensare le carenze strutturali di quest'ultima. Tale accorgimento garantisce l'idoneità della struttura all'azione del vento e più in generale alla verifica di idoneità della struttura, come riportato nella relazione di calcolo strutturale redatta dal progettista della ditta Vinci Technologies (Allegato 1).

Dopo aver eseguito la progettazione di dettaglio (Figura 3.49), sono stati avviati i lavori di realizzazione del basamento in cemento armato avente dimensioni di 490x350x20 cm, dove, in sostituzione della rete elettrosaldato, è stata costruita una gabbia formata da staffoni in ferro sagomati di dimensioni e maglia ($\phi 12$, 200x200 mm), riempita con calcestruzzo Rck 35, caratterizzato da prestazioni migliori rispetto al Rck 30, inizialmente previsto (Figura 3.50). Inoltre, per rendere solidale il basamento alla preesistente fondazione, si è proceduto all'inghisaggio di ferri di armatura con resina bicomponente e all'applicazione di adesivo epossidico bicomponente per riprese di getto tra vecchio e nuovo.

3.10 Installazione della struttura

I componenti dell'impianto sono stati consegnati pre-montati all'interno di ciascun castelletto della struttura. La fase di montaggio presso l'area individuata della Piattaforma Pilota Sotacarbo è rappresentata nella Figura 3.51.



Figura 3.51. Installazione impianto Power-to-Fuels presso la Piattaforma Pilota Sotacarbo.

Dopo aver posizionato la struttura, le colonne del castelletto dell'impianto sono state inghisate al basamento mediante l'installazione di opportune piastre metalliche (Figura 3.52).



Figura 3.52. Piastre metalliche per inghisaggio del castelletto dell'impianto al basamento.

3.11 Coibentazione

Per garantire l'isolamento termico, ridurre al minimo la dispersione del calore e per proteggere i vari componenti e le tubazioni dell'impianto è stata realizzata la coibentazione dei componenti ma anche delle varie linee di collegamento.

La coibentazione è stata realizzata con nastri isolanti estremamente flessibili e rotoli in feltro di lana minerale rivestita con alluminio rinforzato. Per alcuni componenti quali reattore monotubolare, reattori multitubolari e scambiatori di calore, la coibentazione è stata realizzata con rotoli di lana di roccia e con una scatola in lamierino di alluminio dotata di chiusura a leva (Figura 3.53).



Figura 3.53. Materiali per coibentazione.

Nella Figura 3.54 sono evidenziate in rosso le linee coibentate e nella Figura 3.55 sono riportate le varie fasi di realizzazione.

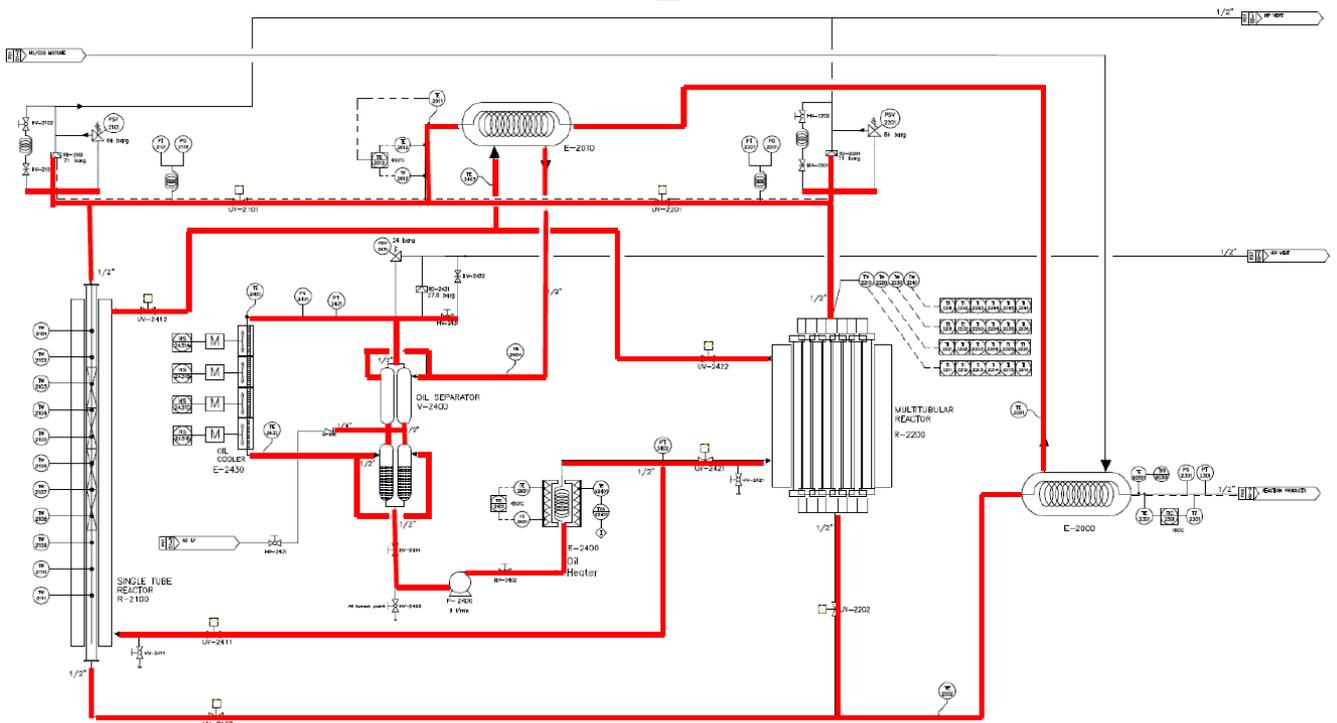


Figura 3.54. Linee coibentate.



Figura 3.55. Realizzazione coibentazione linee.

In Figura 3.56, Figura 3.57 e Figura 3.58 sono evidenziati i componenti che sono stati coibentati e protetti con lamierino di alluminio e scatoletto e nella Figura 3.59 sono riportate le varie fasi di realizzazione.

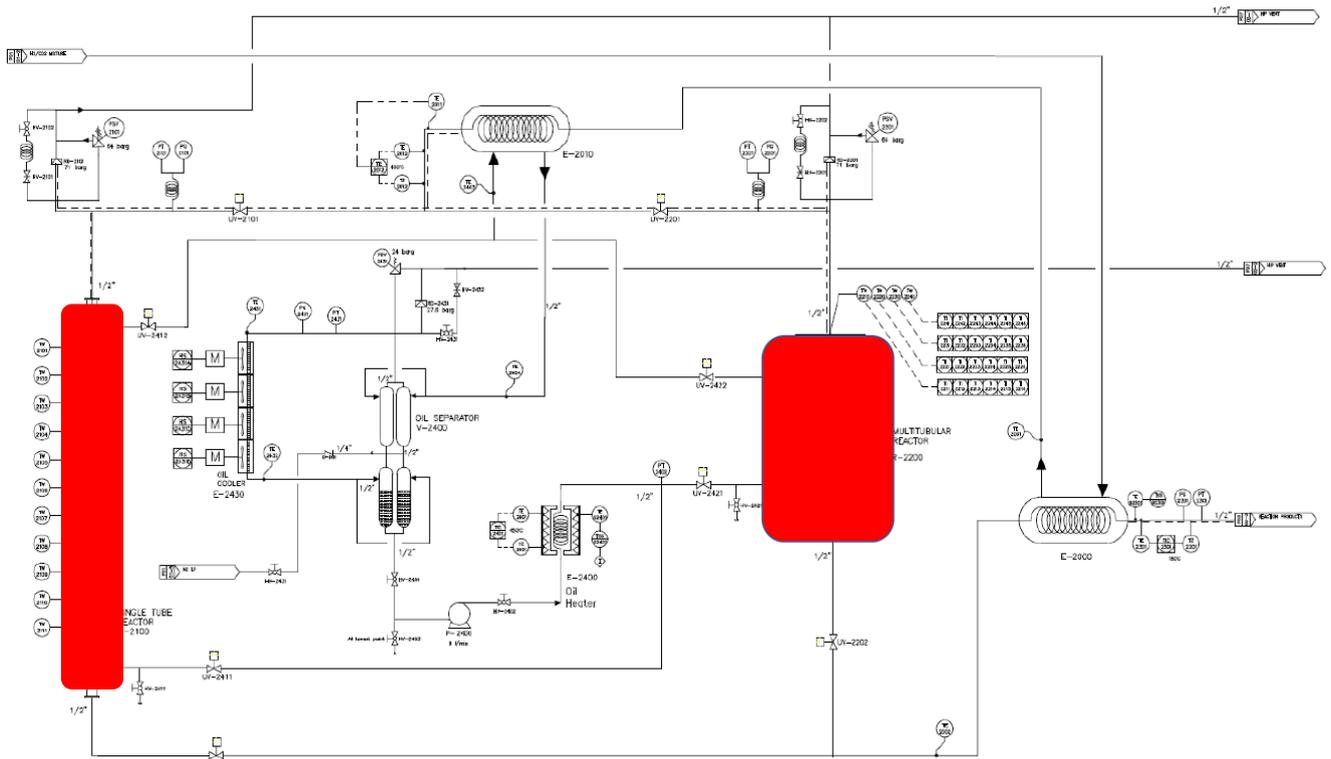


Figura 3.56. Coibentazione reattori (monotubolare e multitubolare).

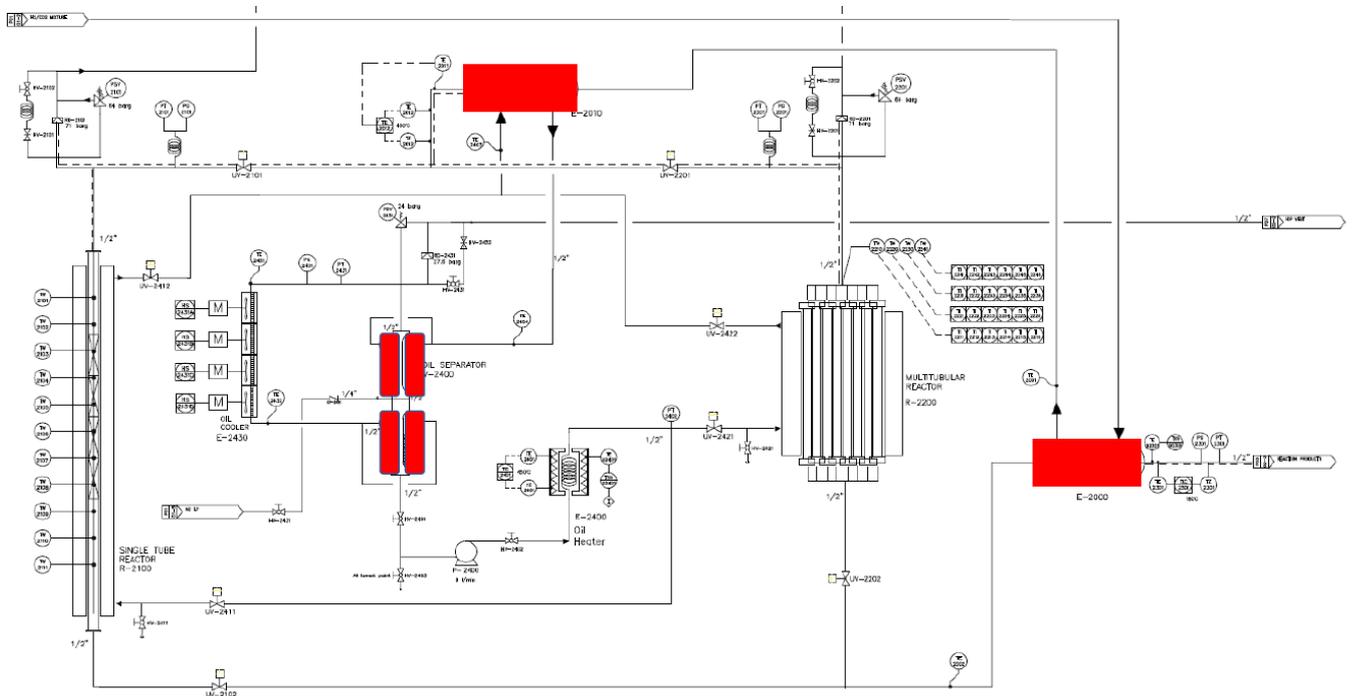


Figura 3.57. Coibentazione scambiatori di calore, sistema separazione olio.

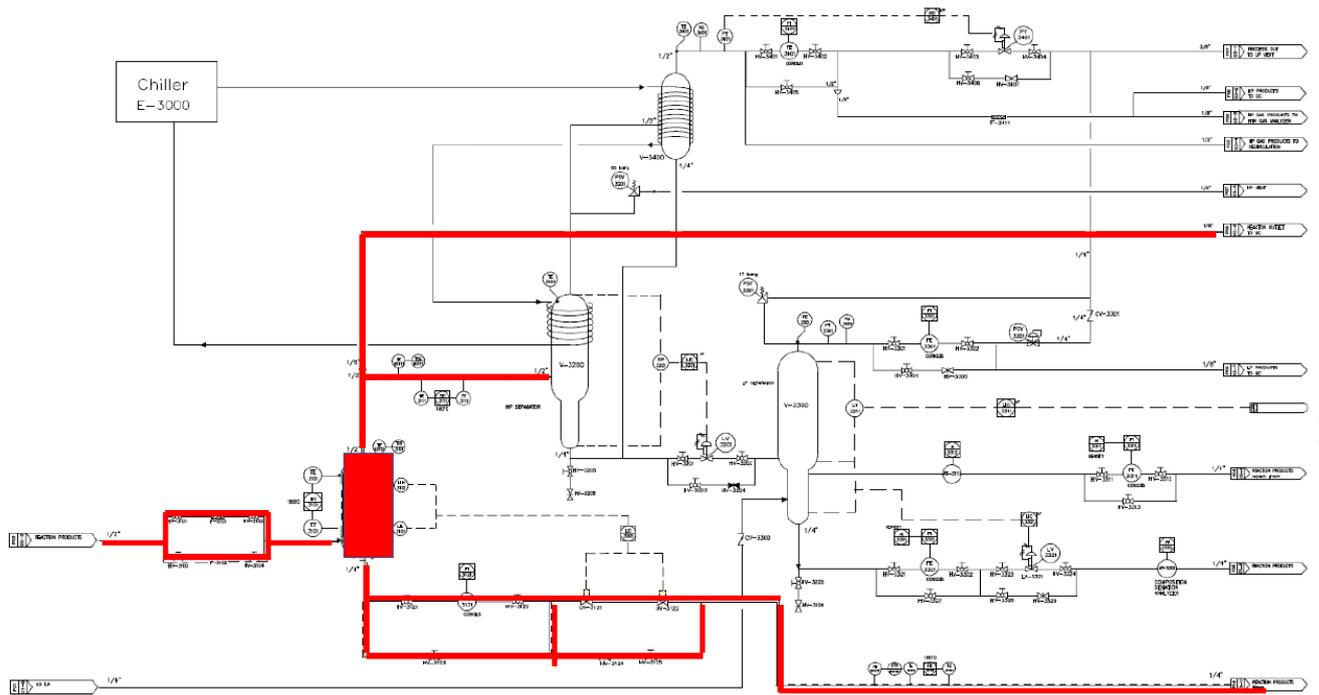


Figura 3.58. Coibentazione linee e trappola per cere.

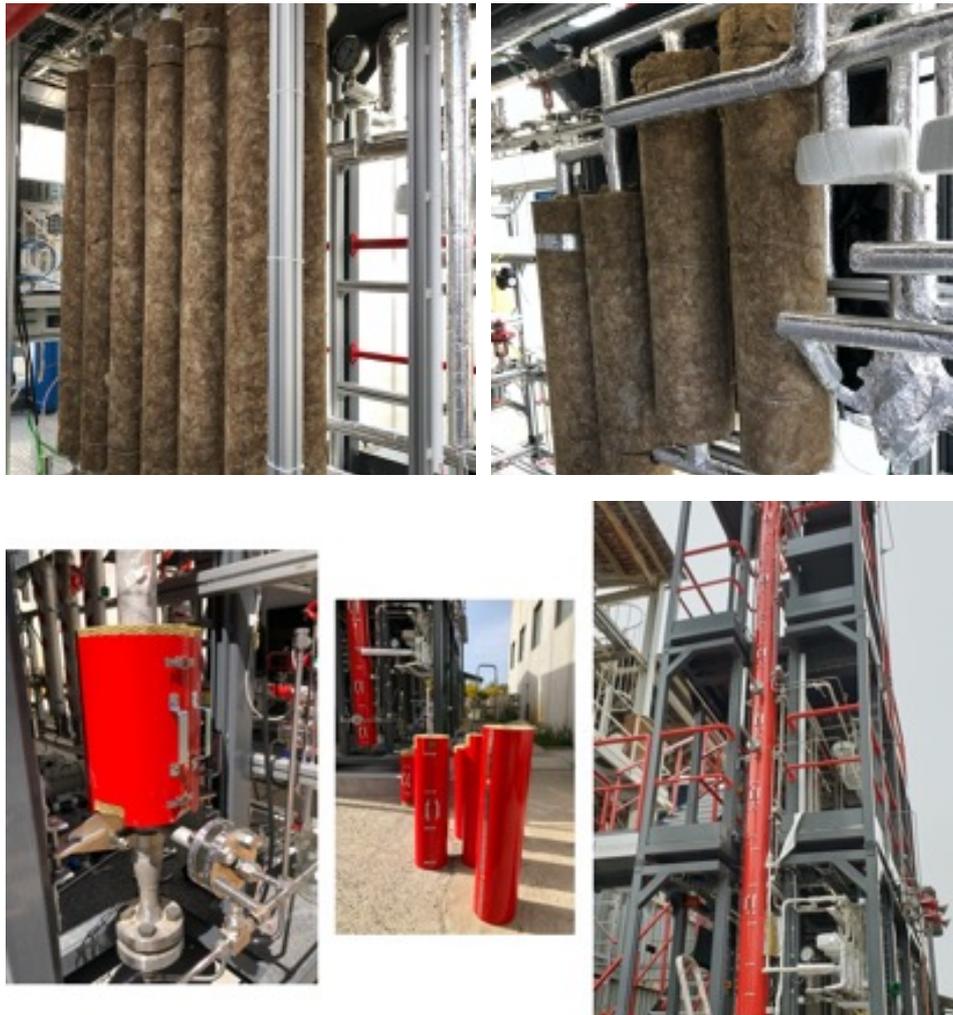


Figura 3.59. Coibentazione componenti.

4 Realizzazione dei sistemi ausiliari dell'impianto sperimentale

A corredo dell'impianto è stato necessario installare alcuni sistemi ausiliari ed eseguire alcuni collegamenti (sistema distribuzione gas, piping di collegamento alla torcia esistente, ecc) necessari al funzionamento dell'impianto prototipale e non previsti nella fornitura della ditta Vinci Technologies. Si riporta di seguito lo schema dei limiti di batteria tra la fornitura della ditta Vinci Technologies e parti in carico a Sotacarbo (Figura 4.1).

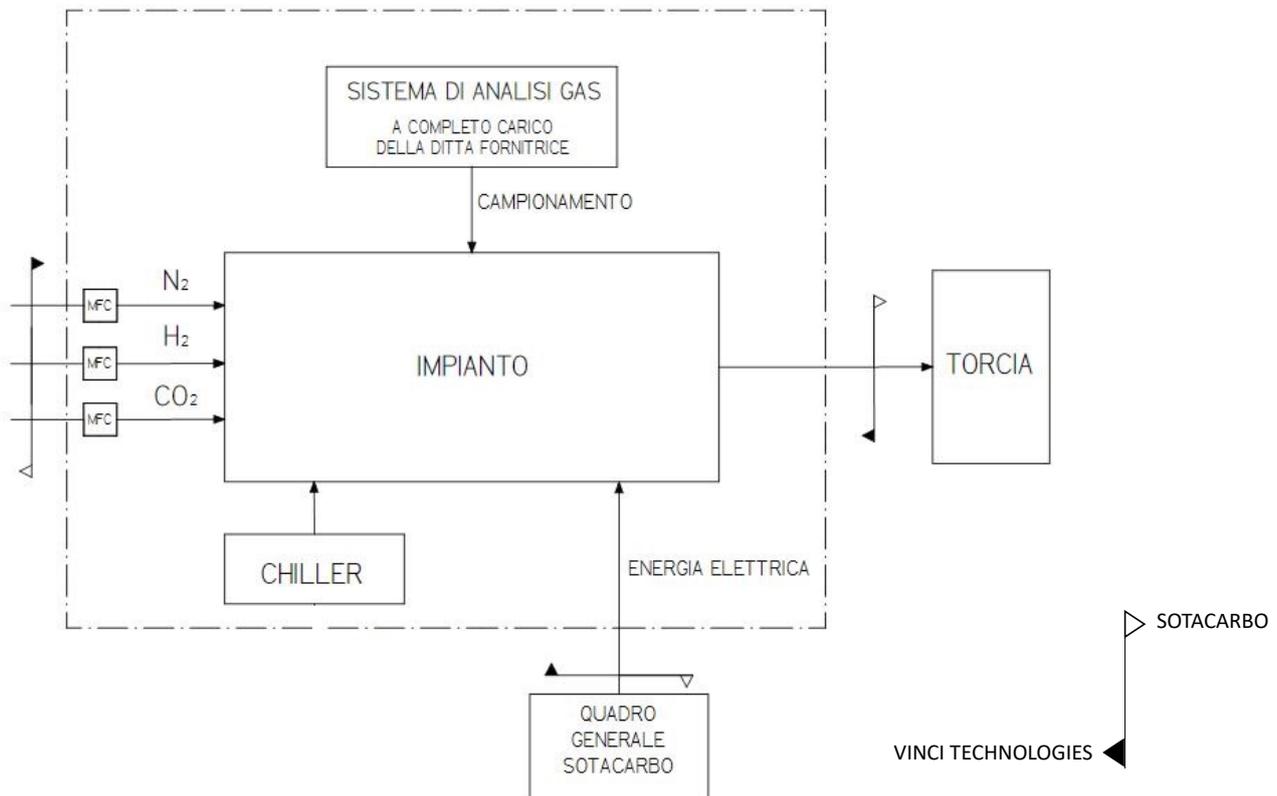


Figura 4.1. Limiti di batteria tra fornitura della Ditta Vinci Technologies e Sotacarbo.

4.1 Sistema di alimentazione gas all'impianto

L'impianto richiede, per il proprio funzionamento, un sistema di alimentazione di diversi gas tecnici, quali idrogeno, diossido di carbonio e azoto, per i quali è stato necessario realizzare un impianto di decompressione, distribuzione e regolazione.

In Figura 4.2 è riportata la pianta della piattaforma pilota con il layout del sistema di alimentazione gas all'impianto prototipale. Mentre in Figura 4.3 è riportato il layout 3D dell'impianto dove sono evidenziati i limiti di batteria tra i gas in alimentazione all'impianto stesso.

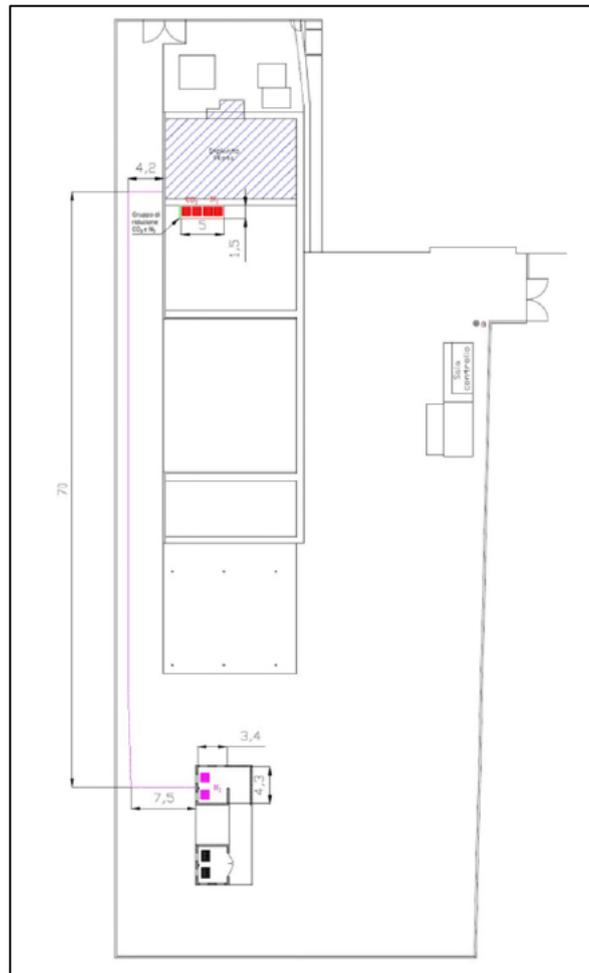


Figura 4.2. Layout del sistema di alimentazione gas.

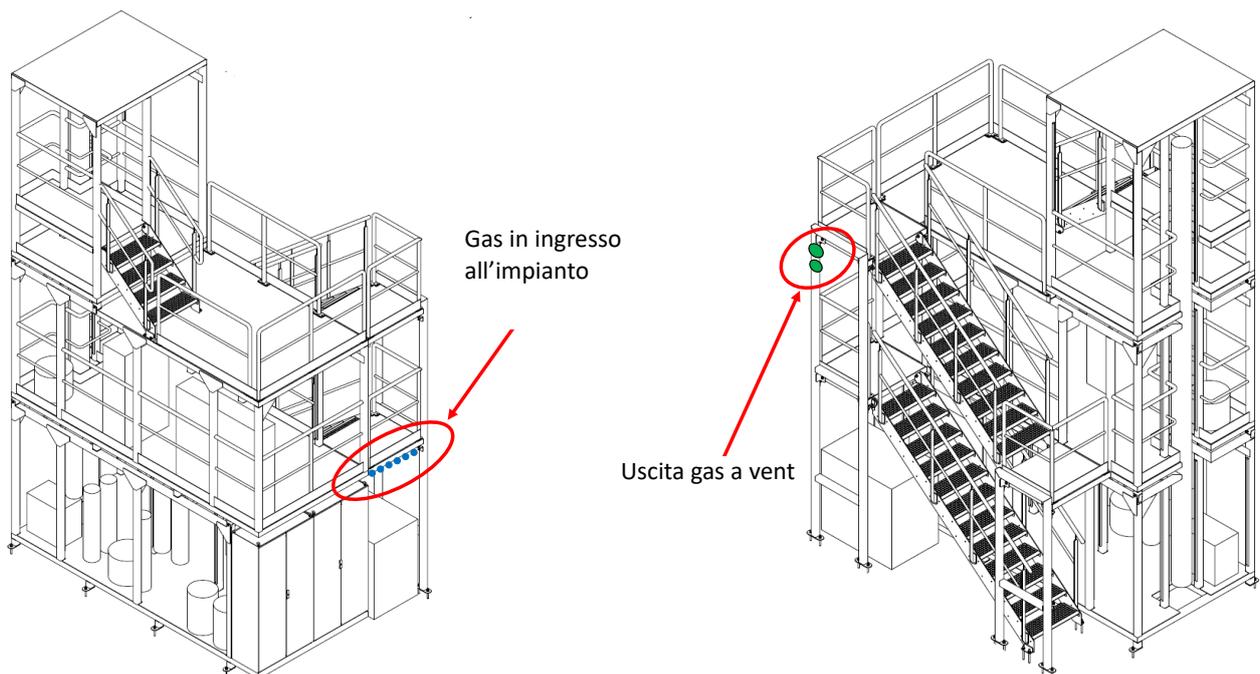


Figura 4.3. Layout dell'impianto con indicazione dei limiti di batteria.

4.1.1 Sistema di alimentazione H₂

Il gas è stoccato allo stato gassoso alla pressione di 200 bar, in due pacchi bombole. Ogni pacco bombole (Figura 4.4, a sinistra) è composto da sedici bombole, per un totale di circa 160 m³, collegate tra loro ad un'unica valvola di erogazione.

La linea H₂ mette in comunicazione il sistema di stoccaggio con l'impianto ed è composta da:

- Unità di connessione (Figura 4.4, a destra).
- Sistema di regolazione della pressione.
- Linea di adduzione e punto di utilizzo.
- Valvola di arresto in emergenza.



Figura 4.4. Pacco bombole della linea H₂ (a sinistra) e unità di connessione dei pacchi bombole (a destra).

L'unità di connessione è installata, assieme alla linea di spurgo per operazioni di cambio pacco, alla valvola pneumatica di intercettazione e al sensore dell'idrogeno, all'interno di un apposito locale già esistente ed è costituita da una centrale semiautomatica di decompressione ad alta pressione collegata con due flessibili ai rispettivi pacchi bombola. La centrale è dotata di valvole di radice, valvole di spurgo e da indicatori di pressione che permettono di eseguire le opportune operazioni di cambio del pacco bombole. Due trasmettitori di pressione forniscono indicazione del grado di riempimento dei pacchi rendendo disponibile un segnale 4 ÷ 20 mA. L'unità è inoltre corredata di un punto predisposto per le operazioni di inertizzazione dell'intera linea di erogazione, composto da una valvola di non ritorno e da una valvola di intercettazione manuale.

Il sistema di regolazione pressione è costituito da due valvole regolatrici di pressione che assicurano l'erogazione al valore richiesto dal processo.

Il sistema garantisce lo scambio dal pacco in erogazione a quello in attesa attraverso un sistema semiautomatico senza intervento da parte dell'operatore.

La linea di adduzione è realizzata in acciaio inossidabile AISI 316L. In Figura 4.5 sono riportate delle immagini della linea di adduzione dell'idrogeno vista dall'estremità vicina al box di stoccaggio e a quella prossima al punto di prelievo. Nelle stesse immagini è possibile osservare come, parallelamente alla linea in acciaio per l'idrogeno, sia stata installata, all'interno di una tubazione protettiva in corrugato, la linea in tubo *rilsan* per il trasporto dell'azoto dedicato all'azionamento della valvola di interruzione di emergenza.

La linea H₂ termina al limite di batteria con un insieme costituito da: valvola di non ritorno, *collettore*, indicatore di pressione (manometro), trasmettitore di pressione e valvola di intercettazione.

Tutti i componenti sono dimensionati per il massimo valore della pressione dello stoccaggio.



Figura 4.5. Linea di adduzione dell'idrogeno, lato box di stoccaggio (a sinistra) e lato utilizzatore (a destra).

La linea di adduzione dell'idrogeno è stata realizzata utilizzando come supporti dei *pipe-rack* già esistenti. Per il passaggio delle tubazioni dal box all'impianto è stato necessario realizzare due attraversamenti interrati (Figura 4.6), di 8 metri ognuno, con l'installazione di appositi cunicoli carrabili e ispezionabili.



Figura 4.6. Passaggi interrati della linea H₂, lato box di stoccaggio (a sinistra) e lato utilizzatore (a destra).

In prossimità del limite di batteria le linee H₂, CO₂ e N₂ presentano un passaggio in quota al livello del primo piano del castelletto dell'impianto di gassificazione pilota adiacente all'impianto prototipale. In tale tratto le

linee vengono sostenute da supporti solidali alla tubazione pre-esistente e staffe saldate alla struttura metallica.



Figura 4.7. Passaggio in quota delle linee di adduzione gas.

La valvola di arresto d'emergenza (Figura 4.8) è una valvola pneumatica di sicurezza installata sulla linea di adduzione dell'idrogeno all'interno del box.



Figura 4.8. Valvola di arresto di emergenza.

All'interno del box di stoccaggio dell'idrogeno è stato installato un sistema per la rilevazione di eventuali perdite di gas così composto:

- Sensore di rilevazione H₂ (Figura 4.9, a sinistra).
- Centralina di gestione a 4 canali (Figura 4.9, a destra), che riceve le informazioni che riceve dal sensore e gestisce in uscita segnali 4-20 mA e relè.
- Elettrovalvola ATEX.

Il segnale in uscita dalla centrale gestisce l'azoto strumenti che alimenta l'elettrovalvola installata sulla valvola pneumatica di arresto. In caso di rilevazione di perdite di H₂, l'elettrovalvola scarica l'azoto e la valvola pneumatica arresta l'erogazione dell'idrogeno a valle della centrale di decompressione. Al fine di permettere l'inertizzazione della linea è stato predisposto uno stacco per il collegamento temporaneo di azoto.



Figura 4.9. Sensore di rilevazione dell' idrogeno (a sinistra) e centralina di gestione (a destra).

4.1.2 Sistema di alimentazione CO₂

Il diossido di carbonio è stoccato allo stato liquido alla pressione di 60 barg (a 23°C), in due pacchi bombole. Ogni pacco bombole (4.10 a sinistra) è composto da sedici bombole, per un contenuto totale di circa 480 kg. Le bombole sono collegate tra loro ad un'unica valvola di erogazione. La linea del diossido di carbonio mette in comunicazione il sistema di stoccaggio con l'impianto utilizzatore. Essa è composta da:

- Unità di connessione e vaporizzazione (Figura 4.10, a destra).
- Sistema di regolazione della pressione.
- Linea di adduzione e punto di utilizzo.



Figura 4.10. Pacco bombola della CO₂ (a sinistra) e unità di connessione con riscaldatori (a destra).

L'unità di connessione è installata, assieme alla centrale di decompressione, ai riscaldatori elettrici e alla linea di spurgo per operazioni di cambio pacco, a ridosso dell'impianto su un telaio predisposto appositamente. Questa unità è costituita da due collettori di alta pressione collegati con due flessibili ai rispettivi pacchi bombola. Ogni collettore è dotato di valvola di radice, valvola di spurgo e indicatore di pressione che permettono di eseguire le opportune operazioni di cambio manuale del pacco bombole. Due trasmettitori di pressione forniscono indicazione della pressione all'interno dei pacchi rendendo disponibile un segnale 4÷20mA. Tre riscaldatori elettrici (uno per ogni collettore e uno a monte del riduttore), ognuno caratterizzato dalla potenza di 3 kW, vaporizzano il fluido portandolo alle condizioni necessarie per permetterne la regolazione. Una valvola di regolazione auto-azionata riduce e regola la pressione del fluido dal valore di equilibrio propria dello stoccaggio a quella necessaria al processo (Figura 4.11).

La linea di adduzione è realizzata in acciaio inossidabile AISI 316L e ha uno sviluppo di circa 10 m. Essa termina al limite di batteria con un insieme costituito da: valvola di non ritorno, collettore, indicatore di pressione (manometro), trasmettitore di pressione e valvola di intercettazione manuale.

Tutti i componenti sono dimensionati per il massimo valore della pressione dello stoccaggio.



Figura 4.11. Riduttore di pressione a valle del terzo riscaldatore.

4.1.3 Sistema di alimentazione N₂

Il gas è stoccato allo stato gassoso alla pressione di 200 barg, in due pacchi bombola. Ogni pacco (Figura 4.12, a sinistra) è composto da sedici bombole, per un totale di circa 160 m³. Le bombole sono collegate tra loro ad un'unica valvola di erogazione.

La linea azoto mette in comunicazione il sistema di stoccaggio con l'impianto utilizzatore.

Il sistema è composto da:

- Unità di connessione (Figura 4.12, a destra).
- Sistema di regolazione della pressione.
- Linea di adduzione e punto di utilizzo.
- Linea di alimentazione dell'azoto strumenti.
- Camino per il convogliamento in zona sicura dello scarico della valvola di sicurezza e della linea di lavaggio.



Figura 4.12. Pacco bombola del sistema di alimentazione dell'azoto (a sinistra) e unità di connessione con sistema di regolazione (a destra).

Il sistema di connessione è installato su apposito telaio, assieme alla linea di spurgo, a ridosso dell'impianto. Questa unità è costituita da una centrale semiautomatica di riduzione di pressione collegata con due flessibili ai rispettivi pacchi bombola. La centrale è dotata di valvole di radice, valvole di spurgo e da indicatori di pressione che permettono di eseguire le opportune operazioni di cambio del pacco bombole. Due trasmettitori di pressione forniscono indicazione del grado di riempimento dei pacchi attraverso un segnale 4÷20 mA .

Il sistema di regolazione della pressione è costituito da due valvole di regolazione che assicurano l'erogazione al valore richiesto dal processo. Il sistema garantisce lo scambio tra pacchi bombola attraverso un sistema semiautomatico senza intervento da parte dell'operatore. La linea di adduzione è realizzata in acciaio inossidabile AISI 316L e ha uno sviluppo di circa 10 m. Essa termina al limite di batteria con un insieme costituito da: valvola di non ritorno, collettore, indicatore della pressione (manometro), trasmettitore di pressione e valvola di intercettazione.

Tutti i componenti sono dimensionati per il massimo valore della pressione dello stoccaggio.

Dalla linea principale è derivata un'utenza dotata di apposito riduttore di pressione per permettere l'alimentazione della strumentazione pneumatica e dell'azoto di lavaggio della linea H₂ (Figura 4.13 a destra).



Figura 4.13. Unità di connessione dei pacchi bombole e derivazione dell'azoto per l'alimentazione della strumentazione pneumatica e per il lavaggio della linea H₂.

A valle del riduttore di pressione è presente una valvola di sicurezza opportunamente dimensionata, il cui scarico è convogliato in un apposito camino. Quest'ultimo è anche adibito allo scarico dei gas di lavaggio. Tutte le linee di adduzione gas dell'impianto vengono convogliate ad una rampa di alimentazione generale (Figura 4.14)



Figura 4.14. Rampa di alimentazione generale

4.2 Adeguamento dell'impianto elettrico

L'alimentazione elettrica dell'impianto *Power-to-Fuels* è stata fornita tramite l'inserimento di due interruttori appositamente dimensionati per l'alimentazione normale e quella di emergenza tramite UPS. Il primo consta di un interruttore magnetotermico differenziale trifase per gestire la potenza di 37 kW (Figura 4.15).



Figura 4.15. Interruttore generale impianto prototipale.

Il secondo invece è un interruttore magnetotermico differenziale monofase che fornisce l'alimentazione ad un UPS della potenza di un 1 kW (Figura 4.16)



Figura 4.16. Interruttore generale alimentazione di emergenza e UPS.

L'utilizzo della linea di emergenza assistita da UPS (gruppo di continuità) garantisce una continuità di alimentazione di tutte le apparecchiature di regolazione e controllo in caso di blackout, permettendo così di gestire il processo anche in assenza di energia elettrica e mantenere un grado di sicurezza adeguato. L'UPS ha un'autonomia di un'ora circa.

Anche per il sistema di stoccaggio idrogeno è stata predisposta una linea di alimentazione apposita per poter alimentare la centralina di monitoraggio e allarme. Tale alimentazione è sezionabile sia in partenza che in arrivo infatti sono stati installati due magnetotermici differenziali monofase (Figura 4.17).



Figura 4.17. Interruttori sistema di stoccaggio Idrogeno e centralina.

Infine, per poter garantire il funzionamento del sistema di stoccaggio della CO₂, sono stati installati tre riscaldatori per la vaporizzazione della CO₂, che viene stoccata nella fase liquida. Su ciascun collettore è posizionato un riscaldatore, mentre il terzo è stato installato a monte del riduttore di pressione (Figura 4.18).



Figura 4.18. Sistema di vaporizzazione CO₂ e relativi riscaldatori.

Ciascun riscaldatore viene alimentato con una apposita linea protetta da un suo magnetotermico differenziale posto in un quadro dedicato (Figura 4.19).



Figura 4.19. Quadro elettrico del sistema di vaporizzazione CO₂.

4.3 Sistema azoto di bassa pressione

Alcuni dei componenti/sezioni dell'impianto prototipale necessitano di un flusso di azoto per il loro funzionamento o per migliorare le prestazioni. Nello specifico l'azoto di bassa pressione viene inviato sia al sistema di circolazione dell'olio diatermico a supporto del funzionamento della pompa dell'olio, sia al sistema di separazione gas-liquido a supporto dello stripping dal liquido, per consentire il massimo recupero del gas, eventualmente disciolto. Per garantire la corrente di azoto, sufficiente per entrambi i componenti, è stata realizzata una tubazione apposita, collegata al sistema di stoccaggio criogenico dell'azoto già disponibile presso la piattaforma pilota Sotacarbo.

La tubazione di collegamento, avente diametro pari a un 1", è stata realizzata in acciaio AISI 316 e può erogare istantaneamente una portata massima di 500 m³/h di azoto in forma gassosa ad una pressione compresa fra 8 e 15 bar, conforme con le specifiche richieste. Nella Figura 4.20 è rappresentato il punto di partenza collegato con tubazione principale tramite una valvola a sfera.



Figura 4.20. Stacco di partenza dell'azoto di inertizzazione.

4.4 Sistema di evacuazione gas (vent/torcia)

Il gas che circola all'interno dell'impianto può essere inviato o al vent, in caso di emergenza, oppure alla torcia in condizioni di normale esercizio dell'impianto. Nelle due figure sotto riportate viene mostrato il piping di collegamento tra l'impianto e la torcia (Figura 4.21) e il vent appositamente realizzato (Figura 4.22).



Figura 4.21. Punto di invio gas dall'impianto alla torcia.



Figura 4.22. Punto di invio gas dall'impianto alla torcia.

4.5 Strumenti di rivelazione e misurazione dei gas

I vigili del fuoco, dopo aver visionato il progetto relativo all'impianto *Power-to-Fuels*, hanno prescritto l'installazione dei misuratori di CO e H₂ (Figura 4.23 e Figura 4.24) per rilevare eventuali perdite in alcune zone dell'impianto dove è prevista la presenza degli operatori:



Figura 4.23. Misuratore gas e rilevatore acustico.



Figura 4.24. Misuratori gas e rilevatori acustici installati nell'impianto.

5 Conclusioni

Scopo dell'attività oggetto del presente documento è la realizzazione di un prototipo sperimentale per lo sviluppo della tecnologia di produzione di e-fuels (metano, metanolo e DME) da CO₂ e H₂, come metodo di accumulo chimico dell'energia elettrica rinnovabile non programmabile (eolica e solare) e, al contempo, come tecnica di produzione di combustibili liquidi per la decarbonizzazione dei settori "hard-to-abate" (industria e trasporti pesanti, in primis navale e marittimo).

Dopo intense campagne sperimentali svolte su scala da banco negli anni passati (campagne che hanno portato, tra l'altro, a brevettare un catalizzatore specifico per la reazione oggetto di studio) e visti i risultati promettenti si è deciso, per il presente triennio della Ricerca di Sistema, di realizzare un prototipo che consentisse di analizzare il processo su un impianto pilota passando pertanto da TRL 4 a TRL 6.

L'impianto include due tipologie di reattori (a singolo stadio e multistadio) in cui viene inserito un opportuno catalizzatore per consentire l'evoluzione del processo di conversione.

L'impianto, grazie alla sua flessibilità, consentirà, con costi operativi relativamente limitati, un ampio campo di test sperimentali per approfondire la conoscenza del processo e lo sviluppo dei componenti chiave dell'impianto, con particolare riferimento a catalizzatori e reattori.

L'impianto, dimensionato per una portata di 5 kg/h, è costituito dalle seguenti sezioni:

- Sezione di alimentazione.
- Sezione di miscelazione.
- Sezione di reazione.
- Sezione di ricircolo.
- Sezione di separazione e raccolta dei prodotti.
- Sistema campionamento e analisi dei prodotti.
- Sistema di regolazione e controllo.

Nel proseguo dell'attività di ricerca, programmato per i prossimi anni, si prevede di realizzare un'intensa campagna sperimentale per definire approfonditamente prodotti e processi e per fornire indicazioni precise per lo scale-up della tecnologia in vista di una sua diffusione industriale, in ambito nazionale, a tutto vantaggio dell'utente finale del sistema elettrico.

Per maggiori approfondimenti sulla progettazione dell'impianto e sull'adeguamento dei sistemi ausiliari si rimanda ai report "Progettazione di dettaglio dell'impianto sperimentale P2G/L" – RdS/PTR(2021)/282 e "Adeguamento del sito e dei sistemi ausiliari per l'installazione dell'impianto P2G/L" – RdS/PTR(2021)/283, sviluppati rispettivamente nelle linee di attività 3.18 e 3.19.

6 Abbreviazioni ed acronimi

DME	Dimetil etere
FID	Flame Ionization Detector
GC	Gas Cromatografo
HMI	Human Machine Interface (Supervisore)
HW	Hardware
I/O	Input/Output
L/D	rapporto Lunghezza/Diametro
NDIR	Non-Dispersive Infrared
P&ID	Piping and Instrumentation Diagram
P2G/L	Power to Gas / Liquid
PC	Personal Computer
PFD	Process Flow Diagram
PLC	Programmable Logic Controller
PtG	Power to Gas
PtL	Power to Liquid
SW	Software
TCD	Thermal Conductivity Detector

7 Curriculum scientifico del gruppo di lavoro

L'attività di ricerca oggetto di questo rapporto è stata condotta dai ricercatori della Sotacarbo SpA, Società nata originariamente con lo scopo di rilanciare con studi e ricerche scientifiche le attività legate al carbone Sulcis, ma che da anni ha cambiato radicalmente le finalità della propria attività di ricerca, focalizzata oggi sui sistemi di conversione dell'energia caratterizzati da **basse emissioni di anidride carbonica** – per applicazioni sia nel settore della generazione elettrica che nei settori industriali – nonché sulla produzione di combustibili puliti (principalmente metanolo, dimetiletere, metano e idrogeno) ottenuti attraverso l'accumulo chimico di energia da fonti rinnovabili.

In tale ambito, l'attività di ricerca si può schematizzare – in modo molto semplificato – nei cinque macro-temi riportati sinteticamente in Figura 7.1: energia da biomasse e materiali di scarto (prevalentemente mediante processi di gassificazione), separazione, riutilizzo e confinamento della CO₂ (con particolare riferimento, in quest'ultimo caso, ai sistemi di monitoraggio dei siti di confinamento geologico), produzione di e-fuels e idrogeno rinnovabile ed efficienza energetica.



Figura 7.1. Schematizzazione delle tematiche di ricerca in corso presso Sotacarbo.

I temi di cui sopra sono, come detto, pienamente **coerenti con le strategie europee** sulla riduzione delle emissioni di CO₂, tanto che il Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca e il Ministero dello Sviluppo Economico – riconoscendo il ruolo di riferimento nazionale sulle tematiche legate alle tecnologie in questione – hanno nominato due ricercatori Sotacarbo come referenti italiani nell'*Implementation Working Group* sulle tecnologie CCUS del *SET Plan* europeo.

Una delle principali caratteristiche che differenzia le attività di ricerca di Sotacarbo da quelle di gran parte degli altri soggetti operanti nel settore (enti di ricerca, sistema accademico e spesso anche realtà industriali) è la disponibilità di **infrastrutture di ricerca all'avanguardia**, generalmente caratterizzate da un'elevata versatilità e dall'accuratezza dei sistemi di misura. Ciò consente di effettuare studi di ricerca applicata che costituiscono l'anello di congiungimento tra il mondo accademico (e, più in generale, della ricerca di base) e l'industria. Molte delle infrastrutture sperimentali a disposizione presso il Centro Ricerche Sotacarbo fanno parte della rete europea di laboratori di eccellenza ECCSEL-ERIC¹ e sono disponibili per attività scientifiche congiunte con partner internazionali.

Grazie alla natura della Società e dei finanziamenti (quasi esclusivamente di carattere pubblico), la quasi totalità dei risultati scientifici ottenuti da Sotacarbo è di **dominio pubblico** e l'attività sperimentale è sempre più finalizzata alla pubblicazione dei risultati su riviste scientifiche internazionali di alto livello.

Le attività di ricerca teorica e sperimentale sono affidate a **personale altamente qualificato**. In particolare, l'area tecnico/scientifica della società è composta da 25 ricercatori laureati (in Ingegneria, Chimica, Scienza dei Materiali e Scienze Geologiche) di cui oltre un quarto dottori di ricerca. L'attività sperimentale beneficia del supporto dell'officina meccanica interna, dell'area comunicazione e gestione progetti. Nello specifico le competenze sviluppate dal gruppo di ricerca impegnato nelle attività del piano triennale 2019-2021, riguardano:

¹ ECCSEL (the European Carbon Dioxide Capture and Storage Laboratory Infrastructure), rete internazionale di laboratori di eccellenza sulle CCUS – dei quali fa parte anche Sotacarbo – è stata costituita come ERIC (European Research Infrastructure Consortium) dai governi di Italia (rappresentata dal MIUR), Regno Unito, Francia, Olanda e Norvegia (che ospita la sede operativa)

- attività di ricerca teorica e sperimentale su temi quali tecnologie di gassificazione di biomasse e rifiuti plastici e di separazione, utilizzo e confinamento della CO₂ (CCUS, carbon dioxide capture, utilization and storage);
- produzione di combustibili liquidi (metanolo, dimetiletere, ecc.) e gassosi (idrogeno, metano) da biomasse e CO₂ attraverso processi termochimici ed elettrochimici;
- ricerca teorica e sperimentale su tecnologie fotoelettrochimiche applicate in campo energetico ed ambientale;
- ricerca e sperimentazione su tecnologie di separazione della CO₂ con tecniche pre-, post- e ossi-combustione;
- analisi di caratterizzazione dei combustibili e studi cinetici attraverso metodi termogravimetrici;
- studio, analisi e caratterizzazione chimico-fisica dei combustibili adatti all'impiego in sistemi per la produzione di energia;
- studio e sviluppo delle tecnologie per la separazione dell'anidride carbonica tramite assorbimento su solventi, membrane e sorbenti solidi;
- studi e sperimentazione su materiali e sistemi per la produzione di *e-fuels* attraverso processi termochimici e fotochimici;
- studi di processo e analisi dei dati sperimentali;
- studio e sviluppo di tecniche analitiche chimico-fisiche di appoggio alle attività sperimentali;
- studi di impatto ambientale e gestione con gli enti preposti ai controlli
- progettazione di apparati sperimentali;
- gestione di campagne sperimentali con strumenti da laboratorio e in impianti di taglia da banco, pilota e dimostrativa;
- definizione di procedure e tecniche di analisi;
- studi tecnico-economici e analisi di fattibilità sull'applicazione delle tecnologie CCUS in contesti industriali;
- sviluppo di modelli economici avanzati per studi di fattibilità.