



Ricerca di Sistema elettrico

Progettazione di dettaglio dell'impianto sperimentale P2G/L

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

PROGETTAZIONE DI DETTAGLIO DELL'IMPIANTO SPERIMENTALE P2G/L

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

Dicembre 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero della Transizione Ecologica - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 – II-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 3.18 – Power to Gas/Liquid: progettazione dell'impianto pilota

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

Indice

SOMMARIO	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 PROGETTAZIONE DI DETTAGLIO DELL'IMPIANTO SPERIMENTALE P2G/L.....	7
2.1 SEZIONE DI ALIMENTAZIONE.....	10
2.2 SEZIONE DI MISCELAZIONE	16
2.3 SEZIONE DI REAZIONE	17
2.4 SEZIONE DI RICIRCOLO	22
2.5 SEZIONE DI SEPARAZIONE E RACCOLTA DEI PRODOTTI	26
2.6 SISTEMA DI CAMPIONAMENTO E ANALISI DEI PRODOTTI.....	31
2.7 STRUMENTAZIONE	36
2.8 SISTEMA DI REGOLAZIONE E CONTROLLO	37
2.9 PROGETTAZIONE STRUTTURALE E MECCANICA DELL'INFRASTRUTTURA	45
2.10 IMPIANTO ELETTRICO E LIMITI DI BATTERIA.....	49
3 CRONOPROGRAMMA PER LA REALIZZAZIONE DELL'IMPIANTO SPERIMENTALE P2G/L	53
4 CONCLUSIONI	54
5 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	63
6 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI	64
7 CURRICULUM SCIENTIFICO DEL GRUPPO DI LAVORO.....	65

Sommario

La presente attività di ricerca si inquadra nell'ambito degli studi volti all'avanzamento delle conoscenze nel settore dei processi innovativi di riutilizzo dell'anidride carbonica e di accumulo dell'energia da fonti rinnovabili. In questo contesto, nell'ambito del piano triennale di realizzazione 2019-2021 della ricerca di sistema elettrico nazionale, si intende realizzare un prototipo sperimentale Power-to-Gas/to-Liquid (P2G/L) per lo sviluppo dei 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 produzione elettrica da fonte rinnovabile.

Nello specifico, nel presente rapporto tecnico si riporta la progettazione di dettaglio dell'impianto sperimentale P2G/L in cui sono state definite le principali caratteristiche di tutti i componenti dell'impianto. In particolare, sono stati ridefiniti i *Piping & Instrumentation Diagrams* (P&ID) e il *Process Flow Diagram* (PFD) delle diverse sezioni. Il progetto è stato completato con la progettazione strutturale e meccanica, l'automazione del processo e i modelli 2D e 3D dell'infrastruttura sperimentale.

L'impianto P2G/L è stato progettato per una produzione massima di 5 kg/h (120 kg/giorno) di prodotto finale. In particolare, è stata selezionata una configurazione estremamente flessibile (dotata di 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. Entrambi i reattori possono essere utilizzati per tutti i processi di interesse poiché progettati sulla base delle condizioni operative individuate sia per la sintesi di metanolo/DME che per il processo di metanazione. Per quanto riguarda il controllo della temperatura, l'impianto è dotato di un sistema innovativo, basato su un design a doppia camicia, che consente una regolazione efficiente della temperatura anche con reazioni particolarmente esotermiche. 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 e un separatore gas-liquido a bassa pressione per separare la fase gassosa dalle due fasi condensate (acquosa e organica). 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 progettazione comprende inoltre l'individuazione della strumentazione necessaria per il monitoraggio, controllo e analisi del processo. In questa fase del progetto, è stato predisposto il *Bill of materials* (BOM) che riporta in modo esaustivo il dettaglio di tutti gli strumenti, le apparecchiature e i carichi elettrici che costituiranno l'impianto P2G/L. Oltre alle principali specifiche operative in termini di temperature e pressioni di esercizio e di progetto, sono riportati, per i vari componenti, modelli e casa costruttrice, tipologia di materiale e di connessione sia meccanica che elettrica, oltre alla tipologia di connessione analogica e digitale di ogni singolo strumento.

Infine, è stato definito il diagramma di *Gantt* per la realizzazione dell'impianto P2G/L.

1 Introduzione

L'accordo di Parigi prevede una tabella di marcia per la crescita economica finalizzata a contrastare i cambiamenti climatici e limitare il riscaldamento globale [1]. A tal proposito, per il raggiungimento degli ambiziosi obiettivi a breve termine, la produzione di energia a basse emissioni di carbonio ricopre un ruolo essenziale e sarà sostituita da energia a emissioni nulle 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 e quella eolica stanno diventando, tra le fonti rinnovabili, le principali protagoniste della transizione energetica in atto [2]. Tuttavia, risulta altrettanto importante ridurre le emissioni di CO₂ nei settori in cui non è possibile la completa elettrificazione, come molti settori industriali e il settore dei trasporti pesanti (specialmente quelli aerei e marittimi). In alcuni di questi casi, 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 emissioni nulle di carbonio [3, 4].

Nel contesto del processo di decarbonizzazione del sistema energetico le tecnologie *Power-to-Gas* (P2G) e *Power-to-Liquids* (P2L) rappresentano una soluzione sostenibile per la produzione di combustibili sintetici e lo stoccaggio di energia rinnovabile a lungo termine [5]. 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. Pertanto, può rispondere a due sfide fondamentali del processo di decarbonizzazione: l'uso diretto di combustibili sintetici consente la decarbonizzazione dei settori che attualmente dipendono dai combustibili fossili, come i trasporti pesanti o alcuni processi industriali. La sostituzione dei combustibili fossili con alternative *carbon neutral* 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 forma di energia sostenibile integrata nelle tecnologie P2G e P2L 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, nel caso delle tecnologie P2G, l'energia rinnovabile viene utilizzata per alimentare un impianto di elettrolisi che scinde l'acqua in idrogeno e ossigeno. L'idrogeno può essere quindi introdotto 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 carburante per auto, camion e mezzi pubblici o riconvertito in energia elettrica. Nelle tecnologie P2L, invece, l'idrogeno viene convertito in metanolo o altri combustibili (inclusa la benzina), che possono svolgere un ruolo chiave nella produzione sostenibile di combustibili sintetici per i settori industriali e dei trasporti, nonché di reagenti per l'industria chimica. 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 P2G e P2L [6]:

- Energia rinnovabile - Le fonti rinnovabili, in particolare l'eolico e il solare, forniscono l'energia per un impianto P2G/L.
- Elettrolisi - L'impianto di elettrolisi alimentato da energie rinnovabili scinde l'acqua in ossigeno e 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 i processi industriali, o dall'aria stessa.
- Sezione di reazione - L'idrogeno può essere fatto reagire 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 del 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 - LA3.18 e riporta la progettazione di dettaglio dell'infrastruttura di ricerca *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 verrà installato presso la piattaforma pilota del Centro Ricerche Sotacarbo e sarà messo a disposizione della comunità scientifica e delle realtà industriali per lo sviluppo e la diffusione commerciale delle tecnologie P2G/L con CO₂ derivante da processi di cattura e idrogeno dal surplus di produzione elettrica da fonte rinnovabile.

La progettazione di dettaglio è stata eseguita in seguito alla definizione della progettazione di massima dell'impianto sperimentale P2G/L. Quest'ultima ha consentito di individuare la soluzione tecnologica più idonea a soddisfare le specifiche esigenze del progetto e a definire la configurazione finale dell'impianto con capacità oraria massima di 5 kg/h (120 kg/giorno) di prodotto finale. Nella progettazione di dettaglio sono state determinate le caratteristiche tecniche e operative definitive di tutti i componenti da installare nell'impianto e sono state valutate le prestazioni dei singoli componenti all'interno della globalità del processo. La sezione di reazione costituisce il cuore dell'intero impianto e per tale motivo è stata dedicata particolare attenzione alla configurazione reattoristica e alla selezione della tipologia di reattore insieme ad un'attenta ingegnerizzazione dell'intera sezione. Sono stati presi in considerazione diversi fattori per la corretta progettazione: la rispondenza alle condizioni operative dettate dai processi di idrogenazione coinvolti, la flessibilità operativa e la scalabilità dei risultati ottenuti. A seguito dell'approfondita analisi condotta sulla tipologia dei processi considerati in termini di condizioni operative, e al fine di garantire la necessaria flessibilità operativa, l'impianto è stato pensato e studiato attraverso l'impiego di due differenti reattori per consentire sia l'analisi di un ampio spettro di problematiche che devono essere affrontate nello studio di questi processi, sia la scalabilità dei risultati ottenuti. Sono stati individuati gli intervalli di pressione e temperatura ottimali per i diversi tipi di processo a seguito sia dell'evidenza sperimentale ottenuta su scala di laboratorio, sia dall'analisi bibliografica su processi simili su scala pilota, dimostrativa e industriale. L'idrogenazione catalitica della CO₂, con particolare riferimento alla produzione di metanolo e DME, a causa della limitata conversione all'equilibrio, ha richiesto la presenza di una sezione che consenta il ricircolo dei composti non reagiti. Una sezione fondamentale dell'impianto sperimentale P2G/L riguarda il campionamento e l'analisi dei fluidi nelle varie fasi del processo, al fine di conoscere in tempo reale e con precisione come questo stia evolvendo. Sulla base delle caratteristiche dell'impianto e della specificità dei componenti in ingresso e in uscita, sono state identificate due diverse tipologie di sistema di analisi in linea. Parte integrante della progettazione di dettaglio dell'impianto P2G/L risulta la definizione della strumentazione necessaria a misurare le temperature, le pressioni, le portate e i livelli dell'impianto P2G/L, e il sistema di controllo che permetterà di monitorare e regolare i principali parametri di processo.

Nella fase di progettazione di dettaglio, sono stati ridefiniti il *Process Flow Diagram* (PFD) (Allegato 1) e i *Piping & Instrumentation Diagrams* (P&ID) (Allegato 2) delle diverse sezioni. L'attività di progettazione è stata svolta in collaborazione con una società specializzata nel settore e individuata con apposita gara. La stessa società si è occupata della realizzazione dell'impianto, oggetto della linea di attività LA 3.20 "Realizzazione dell'impianto pilota e sperimentazione". Il progetto è stato completato con la progettazione strutturale e meccanica, l'automazione del processo e i modelli 2D e 3D dell'infrastruttura sperimentale. Infine, è stato definito il diagramma di *Gantt* per la realizzazione dell'impianto P2G/L.

2 Progettazione di dettaglio dell'impianto sperimentale P2G/L

L'impianto prototipale P2G/L, 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 il Process Flow Diagram (PFD) finale dell'impianto.

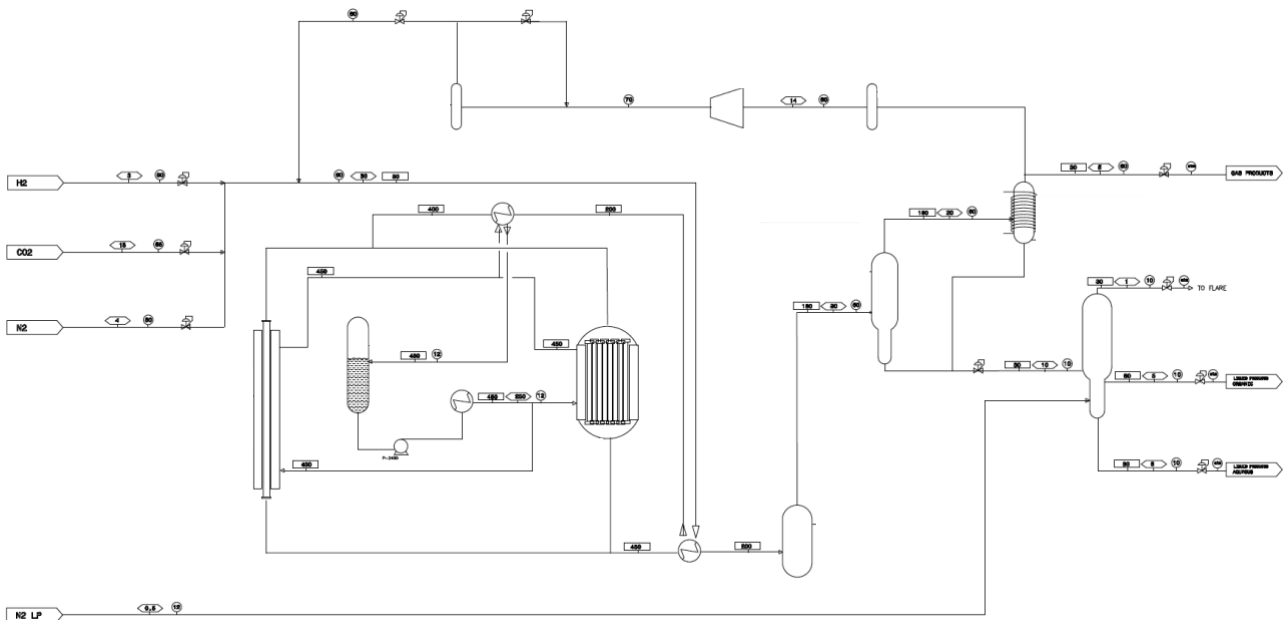


Figura 2.1. Process Flow Diagram (PFD) dell'impianto P2G/L.

Come riportato, per l'impianto è stata selezionata una configurazione estremamente flessibile (dotata di 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.

La sezione di alimentazione è costituita da un impianto di decompressione, distribuzione e regolazione delle portate 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 una misura 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. 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 diatermico 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 scegliere tra il reattore monotubolare e 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 e quattro separatori del fluido della capacità di 8 litri ciascuno (Figura 2.2).

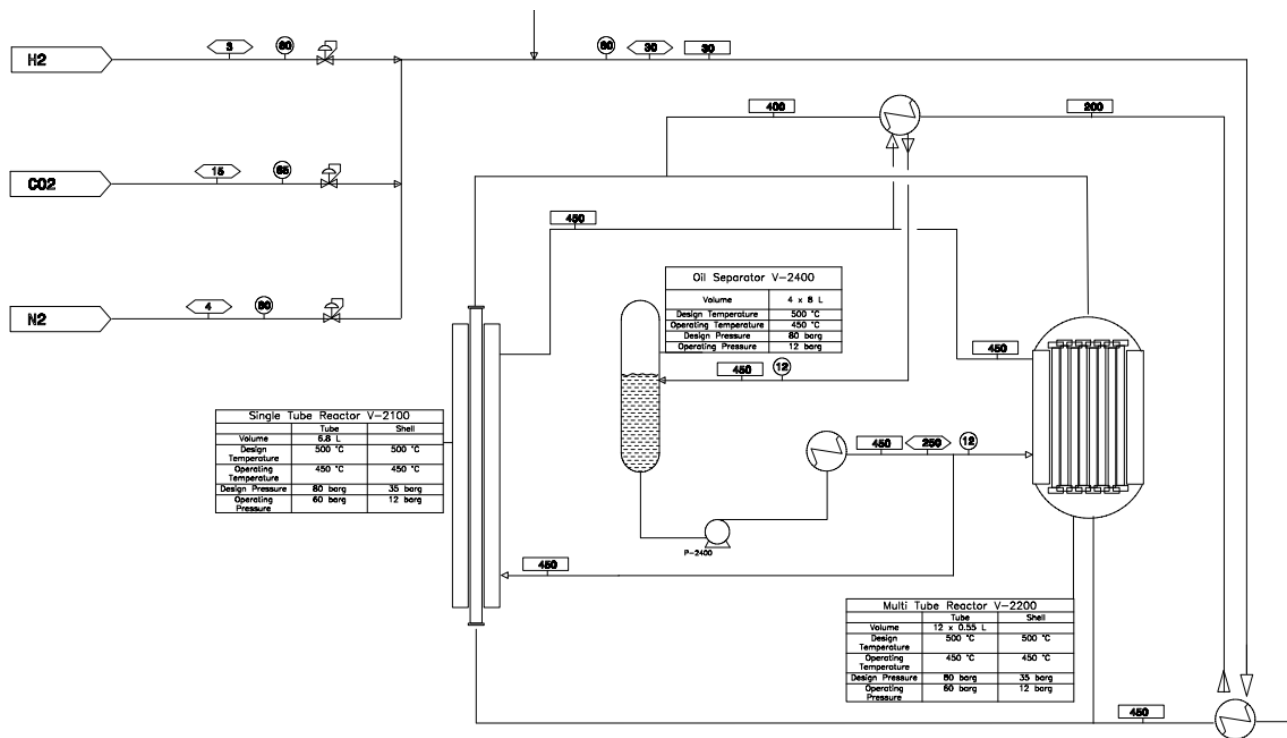


Figura 2.2. Process Flow Diagram (PFD) della sezione di reazione.

A valle della sezione di reazione è presente un sistema di separazione dei prodotti (Figura 2.3) composto da: una trappola per il recupero di eventuali prodotti ad elevato peso molecolare; un separatore gas-liquido ad alta pressione e 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 spingere ulteriormente 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.

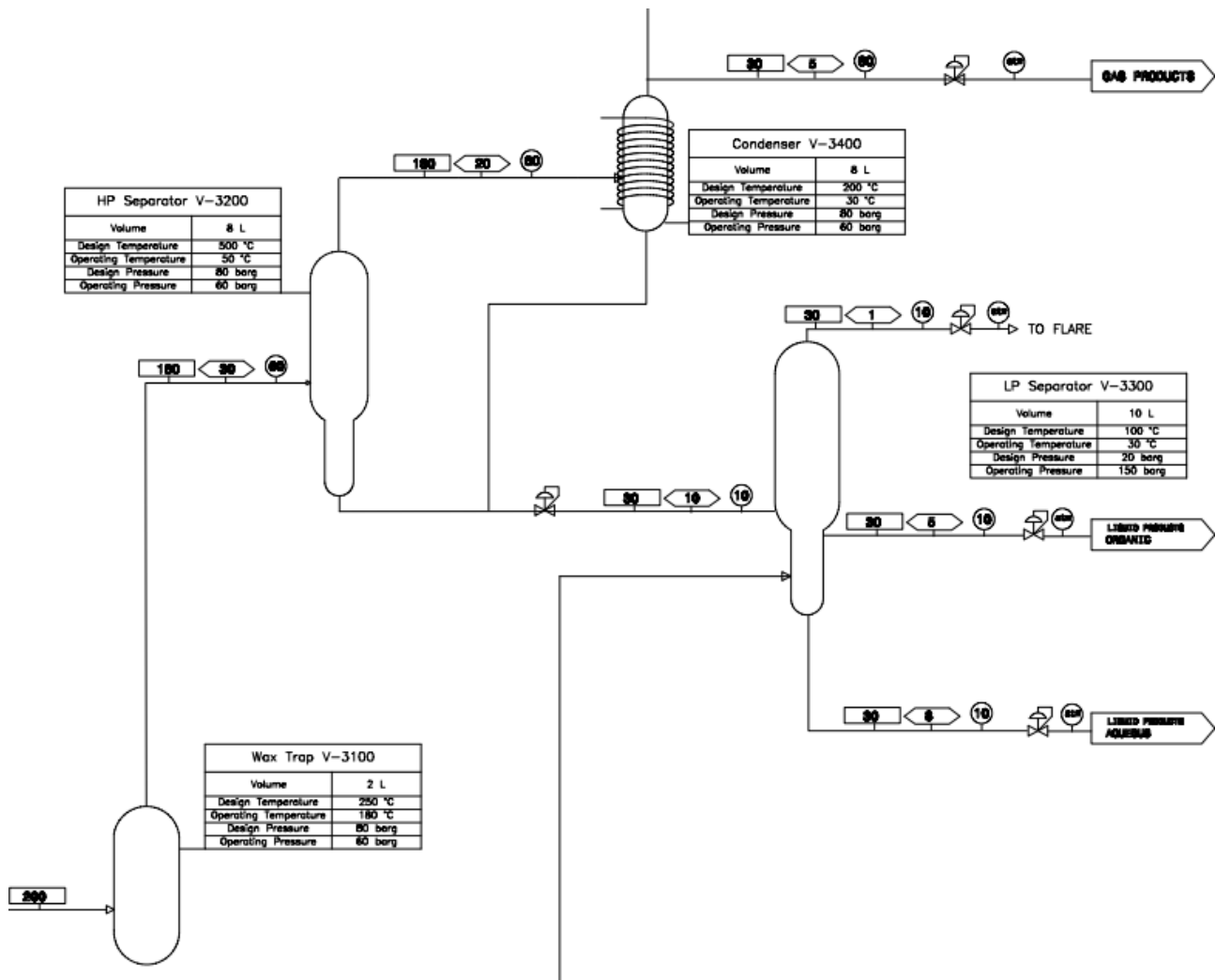


Figura 2.3. Process Flow Diagram (PFD) della sezione di separazione dei prodotti.

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 (Figura 2.4) è costituita da un compressore di tipo elettrico a diaframma metallico, con raffreddamento a liquido, funzionante in modalità ad anello, e da due vasi di espansione e controllori di flusso massico ad effetto *Coriolis* per la misura e il controllo della portata di gas ricircolato.

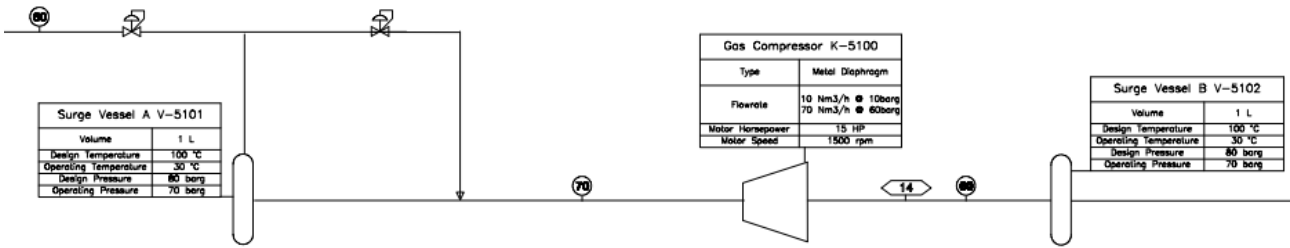


Figura 2.4. Process Flow Diagram (PFD) della sezione di ricircolo.

La progettazione comprende l'individuazione della strumentazione necessaria per il monitoraggio, controllo e analisi del processo. In questa fase del progetto è stato predisposto il *Bill of materials* (BOM) che riporta in modo esaustivo il dettaglio di tutti gli strumenti, le apparecchiature e i carichi elettrici che costituiranno l'impianto P2G/L. Oltre alle principali specifiche operative in termini di temperature e pressioni di esercizio e di progetto, sono riportati modelli e casa costruttrice, tipologia di materiale e di connessione sia meccanica che elettrica, oltre alla tipologia di connessione analogica e digitale di ogni singolo strumento.

2.1 Sezione di alimentazione

La progettazione della sezione di alimentazione fa riferimento alle seguenti norme:

- DM 81/08 Testo unico in materia di salute e sicurezza nei luoghi di lavoro (TUSL).
- 97/23/CE Direttiva PED - "Pressure Equipment Directive".
- DM 37/08 Dichiarazioni di conformità.

In base all'art. 5 comma 1 del DM 37/08, per l'installazione dell'impianto in oggetto deve essere redatto un progetto che rientra nelle casistiche del comma 2 del medesimo articolo (Tabella 2.1) e pertanto necessita di essere redatto e firmato da un professionista iscritto agli albi professionali.

Tabella 2.1. Applicazione del DM 37/08 all'impianto in oggetto.

DM 37/08	Descrizione	Applicazione
Art. 1, comma 2, lettera e	Impianti per la distribuzione e l'utilizzazione di gas di qualsiasi tipo, comprese le opere di evacuazione dei prodotti della combustione e ventilazione ed aerazione dei locali.	Sezione di alimentazione dell'impianto P2G/L
Art. 5, comma 2, lettera g	Impianti di cui all'articolo 1, comma 2, lettera e), relativi alla distribuzione e l'utilizzazione di gas combustibili con portata termica superiore a 50 kW o dotati di canne fumarie collettive ramificate, o impianti relativi a gas medicali per uso ospedaliero e simili, compreso lo stoccaggio.	Idrogeno > 14 Nm ³ /h

La sezione di alimentazione è costituita da un impianto di decompressione, distribuzione e regolazione della portata dei seguenti gas puri necessari ad alimentare l'impianto: anidride carbonica (CO₂), idrogeno (H₂) e azoto (N₂). L'alimentazione per ciascuno di tali gas avviene tramite due pacchi bombole. Il sistema è predisposto per il cambio di uno dei due pacchi senza interruzione nell'erogazione del gas. La Tabella 2.2 riporta la tipologia di stoccaggio dei gas del sistema di alimentazione. La Tabella 2.3 riporta i dati di progetto.

Tabella 2.2. Stoccaggio dei gas del sistema di alimentazione.

Gas	Pacco bombole	Stato	Pressione	Quantità	Modalità di prelievo
CO₂	16 bombole	Liquido	60 barg (@23 °C)	ca. 480 kg	In forma liquida
H₂	16 bombole	Gassoso	200 barg	ca. 160 m ³	In forma gassosa
N₂	16 bombole	Gassoso	200 barg	ca. 160 m ³	In forma gassosa

Tabella 2.3. Dati di progetto del sistema di alimentazione.

Gas		CO ₂	H ₂	N ₂
Pressione massima di erogazione pacco	[barg]	60 (@23°C)	200	200
Pressione minima di erogazione pacco	[barg]	45 (@11 °C)	50	50
Temperatura minima prelievo gas	[°C]	> 11 °C	ambiente	ambiente
Titolo	[%]	99,9	99,999	99,999
Portata volumetrica massima	[Nm ³ /h]	7,6	33,4	13,4
Portata volumetrica minima	[Nm ³ /h]	1,6	4,7	2,8
Portata massica massima	[kg/h]	15,0	3,0	16,7
Pressione massima al punto di fornitura	[barg]	60 (@23°C)	80	80

L'impianto di alimentazione è costituito dai seguenti sistemi:

- Linea dell'anidride carbonica.
- Linea dell'idrogeno.
- Linea dell'azoto.
- Sistema di rilevazione dell'idrogeno.

Linea CO₂

La linea della CO₂ è costituita dai seguenti componenti:

- Pacchi bombole: L'anidride carbonica è contenuta in pressione e allo stato liquido in due pacchi bombole.
- Unità di connessione e vaporizzazione: È costituita da due collettori ad alta pressione collegati con due flessibili ai rispettivi pacchi bombole. Il collettore è dotato di valvola di radice, valvola di spurgo e di un indicatore di pressione che permettono di compiere le opportune operazioni di cambio pacchi manualmente. Due trasmettitori di pressione rendono disponibile la pressione all'interno dei pacchi con un segnale di uscita 4÷20 mA. Completano tale unità tre riscaldatori elettrici (uno per ogni pacco più uno a monte del riduttore) di 3 kW ciascuno, che vaporizzano il fluido portandolo alle condizioni per essere regolato in pressione.
- Sistema di regolazione della pressione: Una valvola di regolazione autoazionata riduce e regola la pressione del fluido dal valore di equilibrio propria dello stoccaggio a quella necessaria al processo.
- Linea di adduzione e punto di utilizzo: È da 3/8", realizzata in acciaio inossidabile AISI 316L e termina al limite di batteria con un insieme costituito da: indicatore di pressione, trasduttore, valvola di non ritorno e valvola di intercettazione manuale. Tutti i componenti sono dimensionati per il massimo valore della pressione dello stoccaggio.

Linea H₂

La linea dell'H₂ è costituita dai seguenti componenti:

- Pacchi bombole: L'idrogeno è contenuto in pressione allo stato gassoso in due pacchi bombole.
- Unità di connessione: È costituita da una centrale semiautomatica di decompressione di alta pressione collegata con due flessibili ai rispettivi pacchi bombole. La centrale è dotata di valvole di radice, valvole di spurgo e da indicatori di pressione che permettono di compiere le opportune operazioni di cambio pacchi. Due trasmettitori di pressione rilevano il grado di riempimento dei pacchi e rendono 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 dell'idrogeno, composto da una valvola di non ritorno e una valvola di intercettazione manuale.
- Sistema di regolazione della pressione: Due valvole di regolazione della pressione 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. L'operazione di sostituzione del pacco esaurito viene quindi completata con la manovra manuale di riarmo della centrale, per permettere la successiva alternanza tra il pacco in erogazione e quello in attesa senza alcuna interruzione dell'erogazione.
- Linea di adduzione e punto di utilizzo: È da ½", realizzata in acciaio inossidabile AISI 316L interamente saldata e termina al limite di batteria con un insieme costituito da: indicatore di pressione, trasduttore, valvola di non ritorno e valvola di intercettazione manuale. Tutti i componenti sono dimensionati per il massimo valore della pressione dello stoccaggio.
- Valvola di arresto in emergenza: Sulla linea di adduzione idrogeno è prevista l'installazione di una valvola pneumatica di arresto.

Linea N₂

La linea dell'N₂ è costituita dai seguenti componenti:

- Pacchi bombole: L'azoto è contenuto in pressione allo stato gassoso in due pacchi bombole.
- Unità di connessione: È costituita da una centrale semiautomatica di decompressione di alta pressione collegata con due flessibili ai rispettivi pacchi bombole. La centrale è dotata di valvole di radice, valvole di spurgo e da indicatori di pressione che permettono di compiere le opportune operazioni di cambio pacchi. Due trasmettitori di pressione rilevano il grado di riempimento dei pacchi e rendono disponibile un segnale 4÷20 mA.
- Sistema di regolazione della pressione: Due valvole di regolazione della pressione assicurano l'erogazione al valore richiesto dal processo. Il sistema garantisce lo scambio dal pacco in erogazione a quello in attesa attraverso il sistema semiautomatico senza intervento da parte dell'operatore. L'operazione di sostituzione del pacco esaurito è completata con la manovra manuale di riarmo della centrale.
- Linea di adduzione e punto di utilizzo: È da 3/8", realizzata in acciaio inossidabile AISI 316L e termina al limite di batteria con un insieme costituito da: indicatore di pressione, trasduttore, valvola di non ritorno e valvola di intercettazione manuale. Tutti i componenti sono dimensionati per il massimo valore della pressione dello stoccaggio.
- Linea per alimentazione aria strumenti: Dalla linea principale è derivata una utenza con apposito riduttore di pressione per alimentare la strumentazione pneumatica e l'azoto di lavaggio della linea idrogeno. A valle del riduttore di pressione è presente una valvola di sfiato opportunamente dimensionata.
- Vent: Per il convogliamento in zona sicura dello scarico della valvola di sfiato e della linea di lavaggio.

Sistema di rilevazione H₂

In prossimità del box di stoccaggio dell'idrogeno verrà installato un sistema per la rilevazione di eventuali perdite di idrogeno. Il sistema sarà così composto:

- Centralina di gestione a 4 canali: La centrale gestisce le informazioni che riceve dal sensore e ha la possibilità di gestire in uscita segnali 4÷20 mA e relè.
- Sensore di rilevazione H₂.
- Elettrovalvola ATEX.

Il segnale in uscita dalla centrale gestirà l'azoto strumenti che alimenta l'elettrovalvola installata sulla valvola pneumatica di arresto. In caso di rilevazione di idrogeno, l'elettrovalvola scarica l'azoto e la valvola pneumatica arresta l'erogazione dell'idrogeno a valle della centrale di decompressione.

L'impianto è concepito per funzionare in maniera autonoma e garantire l'erogazione del gas alle portate e pressioni richieste. La modalità di marcia è sempre prevista con un pacco bombole in erogazione e l'altro disponibile in attesa. Lo scambio tra il pacco in esaurimento e quello in attesa pieno avviene in modo semiautomatico per H₂ e N₂, e manuale per CO₂. La sostituzione del pacco vuoto può essere effettuata continuando ad erogare con il pacco pieno.

Per la linea idrogeno è necessario inoltre effettuare l'inertizzazione con azoto prima di immettere l'idrogeno. Per tale operazione è predisposto uno stacco per il collegamento temporaneo di azoto, da utilizzare esclusivamente per le operazioni di inertizzazione. L'inertizzazione con azoto avviene tramite l'immissione del gas inerte e lo scarico al punto predisposto collegato al *vent*, per eliminare eventuali residui d'aria dall'impianto. Qualora necessario ai fini del processo, il gas inerte sarà eliminato mediante lavaggio con idrogeno.

Per le linee azoto e anidride carbonica è sufficiente inviare il gas specifico nelle linee per eliminare l'aria.

Una volta terminate questa attività, il sistema di alimentazione è pronto ad erogare gas per l'utilizzo finale. I fluidi passano nelle tubazioni attraverso i vari componenti e vengono decompressi alla pressione desiderata mediante i riduttori installati in corrispondenza dello stoccaggio e prima di ogni linea. Tutte le linee di erogazione sono progettate per poter resistere alla massima pressione ammissibile.

Sui collettori delle centrali di decompressione sono presenti dei trasmettitori di pressione che permettono di rilevare i valori delle pressioni all'interno dei pacchi tramite un segnale 4÷20 mA.

In caso di periodi di lunga inattività dell'impianto o della linea dell'idrogeno, verrà effettuato lo scarico della stessa e la pressurizzazione con azoto. Questa prassi consente alla linea di restare in pressione in sicurezza e di scongiurare perdite di gas infiammabile o il rischio di formazione di miscele esplosive in caso di pressurizzazione con idrogeno al riavvio.

Nella Figura 2.5 si riporta una pianta con il posizionamento dei gas del sistema di alimentazione. La CO₂ e l'N₂ (indicate in rosso in figura) trovano alloggio su una platea a ridosso dell'impianto, su uno spazio indicativamente di dimensioni 5 x 1,5 m. Le linee dell'anidride carbonica e dell'azoto hanno una lunghezza indicativamente pari a 30 m ciascuna e collegano i gruppi di riduzione di ciascun pacco bombole a un punto di utilizzo situato ai limiti di batteria dell'impianto P2G/L. Il passaggio delle tubazioni avviene in quota ad un'altezza di circa 3 m, con sostegno su una struttura preesistente.

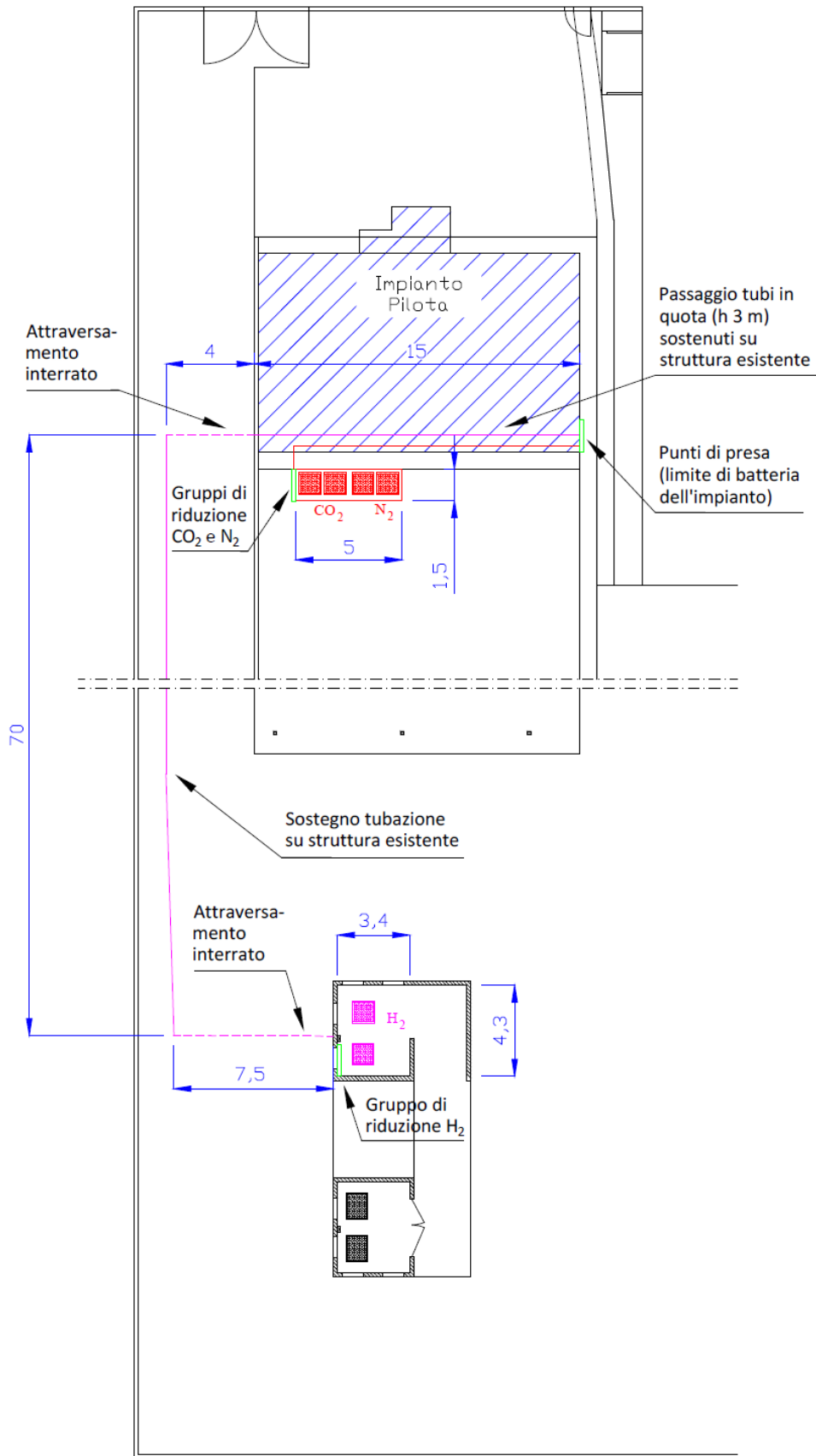


Figura 2.5. Schema semplificato della linea del sistema di alimentazione (misure in metri).

L'idrogeno (indicato in magenta in figura) trova alloggio in un apposito box certificato già esistente, di dimensioni interne di 4,3 x 3,4 m. La linea dell'idrogeno ha una lunghezza di circa 150 m complessivi ed è caratterizzata da un primo attraversamento interrato di circa 7,5 m, un tratto di circa 70 m con sostegno su rack preesistente, un secondo attraversamento interrato di circa 4 m, e un tratto finale di circa 15 m in quota ad un'altezza di circa 3 m con sostegno su struttura preesistente. Gli attraversamenti interrati sono realizzati in appositi cunicoli prefabbricati ed ispezionabili.

La Tabella 2.4 riporta un elenco dei principali componenti del sistema di alimentazione. I materiali e i riduttori di pressione, le linee di distribuzione e gli accessori sono stati selezionati in considerazione della compatibilità chimica con i gas e delle pressioni massime di utilizzo.

Tabella 2.4. Componenti del sistema di alimentazione.

Componente	Produttore	Modello/Serie
Centrale di decompressione	Air Liquide	CENT CLSA2 200-50-100
Raccordo anti-sbandieramento con filtro	Air Liquide	RACC. ENTRATA CENTRALI FILT. M20X1,5
Riduttore di pressione	Air Liquide	RID DLM 300-15-50
Riscaldatore elettrico	Air Liquide	RISCALDATORE GHT6-450 CO2
Serpentina	Air Liquide	SERP BOMB
Valvola d'arresto	Air Liquide	VALVOLA DVA-A 1,5-0,12
Attuatore pneumatico	Adler	APM
Valvola a sfera	Adler	FS2
Valvola di intercettazione	Ham-Let	H-500
Valvola di ritegno	Ham-Let	H-400HP
Valvola di sfiato	Ham-Let	H-900HP
Elettrovalvola a due vie	Nadi	L54.Ex
Valvola di blocco e sfiato	Wika	IV20
Manometro	Wika	232.50
Unità di controllo gas	Recom Industriale	GasScreen 40
Sensore di gas	Recom Industriale	Explorer RTE

2.2 Sezione di miscelazione

Al limite di batteria dell'impianto, le linee del sistema di alimentazione sono connesse con le linee di impianto. Per ciascuno dei tre gas CO₂, N₂ e H₂, la linea è costituita da una tubazione di diametro 3/8" fornita nell'ordine di una valvola di intercettazione, un filtro da 7 µm, un trasduttore di pressione, una valvola di sfiato per sovrappressione (impostata a 85,3 bar), un regolatore di pressione preceduto e seguito da una misura di pressione, un regolatore di portata massica ad effetto *Coriolis*, una valvola di intercettazione e una valvola di ritegno. In Figura 2.6 viene riportato il P&ID derivante dalla progettazione di dettaglio della sezione di alimentazione e miscelazione.

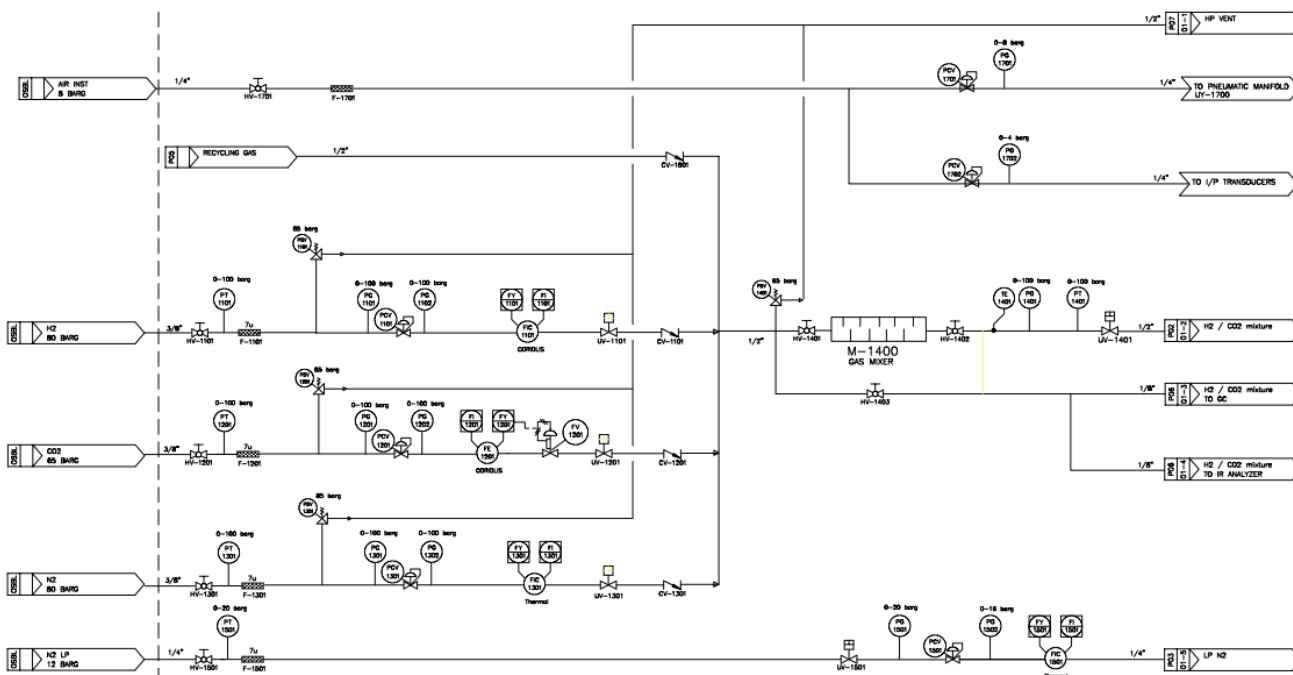


Figura 2.6. P&ID della sezione di alimentazione e miscelazione.

La Tabella 2.5 riporta le condizioni operative della sezione di alimentazione.

Tabella 2.5. Condizioni operative della sezione di alimentazione.

Gas	Pressione massima (barg)	Temperatura (°C)	Portata (kg/h)
CO ₂	60	Ambiente	15,0
H ₂	80	Ambiente	3,0
N ₂	80	Ambiente	4,0

I gas vengono miscelati in un gas mixer insieme al flusso di ricircolo proveniente dal reattore. Il miscelatore è dotato internamente di setti alternati per favorire il miscelamento dei gas. Il componente è progettato per una temperatura e pressione operative di 30 °C e 60 bar e una temperatura e pressione massime di 100 °C e 80 bar ed è identificato, nel P&ID di impianto sopra riportato, con la sigla M-1400. La linea del miscelatore è costituita da una tubazione di diametro 1/2" fornita nell'ordine di una valvola di sfiato per sovrappressione (impostata a 64 bar), il miscelatore preceduto e seguito da una valvola di intercettazione, una termocoppia di tipo K per il rilievo della temperatura, un misuratore di pressione, un trasduttore di pressione e una valvola di intercettazione. La Tabella 2.6 riporta un elenco dei principali componenti previsti nelle linee di ciascun gas e nella linea del miscelatore.

Tabella 2.6. Componenti del sistema di alimentazione lato impianto.

Componente	Produttore	Modello/Serie
<i>Linee dei gas</i>		
Valvola di intercettazione	Ham-Let	H-800KL
Trasduttore di pressione	ESI	GS4200
Filtro 7 μm	Ham-Let	H-600
Valvola di sfiato	HOKE	MR6032
Misuratore di pressione	Ham-Let	IMPG63
Regolatore di pressione	Swagelok	KCP
Regolatore di portata massica	Bronkhorst	M14V10I
Valvola di ritegno	Ham-Let	H-400HP
<i>Linea del miscelatore</i>		
Valvola di sfiato	HOKE	MR6032
Valvola di intercettazione	Ham-Let	H-800KL
Termocoppia tipo K	TC Direct	405-335
Misuratore di pressione	Ham-Let	IMPG10
Trasduttore di pressione	ESI	GS4200

2.3 Sezione di reazione

La sezione di reazione costituisce il cuore dell'intero impianto. È infatti all'interno dei reattori che avvengono le reazioni di interesse e si formano i prodotti desiderati. Per tale motivo, già durante la progettazione di massima 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. Sono stati presi in considerazione diversi fattori per la corretta progettazione della sezione di reazione: la rispondenza alle condizioni operative dettate dai processi di idrogenazione coinvolti, la flessibilità operativa e la scalabilità dei risultati ottenuti. Inoltre, dal punto di vista prettamente tecnico, sono stati presi in considerazione diversi parametri fondamentali e imprescindibili, quali:

- Natura delle fasi presenti nel sistema.
- Aspetti termodinamici e cinetici.
- Range di pressione e temperatura di esercizio.
- Proprietà e caratteristiche di reagenti, prodotti e catalizzatori (proprietà chimico-fisiche, stabilità termica, aggressività chimica, fenomeni di esplosività).
- Qualità desiderata dei prodotti.
- Caratteristiche di scambio e di controllo termico.
- Resistenza meccanica e chimica dei materiali.

L'analisi termodinamica eseguita in fase di progettazione preliminare ha fornito due indicazioni fondamentali ai fini della progettazione del reattore. La prima è la quantità di calore, prodotta o assorbita, e la seconda è il massimo grado di avanzamento raggiungibile dalla reazione. D'altro canto, l'analisi cinetica ha definito le variabili che influenzano la velocità della reazione, cioè la quantità di prodotto ottenibile nell'unità di tempo.

I processi di idrogenazione catalitica per la sintesi di metano, metanolo e DME coinvolgono reazioni di tipo esotermico, perciò il reattore è stato progettato per consentire un controllo efficiente della temperatura. Il processo di produzione del metano è più severo per quanto riguarda le temperature di esercizio, mentre quello del metanolo/DME opera invece a pressioni molto maggiori. È comprensibile come il design del reattore debba rispondere alle esigenze primarie sia in termini di temperatura che di pressione.

A seguito dell'approfondita analisi condotta sulla tipologia dei processi considerati in termini di condizioni operative e, al fine di garantire la necessaria flessibilità operativa, l'impianto è stato pensato e studiato attraverso l'impiego di due differenti reattori. Nello specifico, la configurazione individuata di 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 riportate nella Tabella 2.7 per entrambi i processi (60 barg @ 350 °C e 30 barg @ 450 °C). Sotacarbo ha infatti individuato gli intervalli di pressione e temperatura ottimali per i diversi tipi di processo a seguito sia dell'evidenza sperimentale ottenuta su scala di laboratorio, sia dell'intensiva analisi bibliografica su processi simili su scala pilota, dimostrativa e industriale.

Tabella 2.7. Condizioni operative dei processi di produzione di metanolo, dimetiletere e metano.

	Processo di sintesi del metanolo e DME	Processo di sintesi del metano
Pressione nominale	35 barg	8 barg
Pressione massima	60 barg	30 barg
Temperatura nominale	250 °C	325 °C
Temperatura massima	350 °C	450 °C

Nello specifico, si è optato per reattori multifunzionali, ovvero adatti sia per la sintesi del metanolo/DME, che per la reazione di metanazione, in modo da rendere l'intero impianto altamente flessibile. Per entrambe le configurazioni, è stato individuato un design del reattore con un rapporto L/D molto elevato e una regolazione della temperatura tramite circolazione del fluido con doppia camicia: la combinazione di questi parametri può garantire un funzionamento isoterma anche con reazioni altamente esotermiche.

In Figura 2.7 viene riportato il P&ID derivante dalla progettazione di dettaglio dell'intera sezione di reazione. Esso contempla i due reattori (multitubolare e a singolo tubo), gli scambiatori di calore, il riscaldatore del fluido insieme alla pompa di circolazione, il separatore del fluido e tutte le strumentazioni e le apparecchiature di controllo del processo.

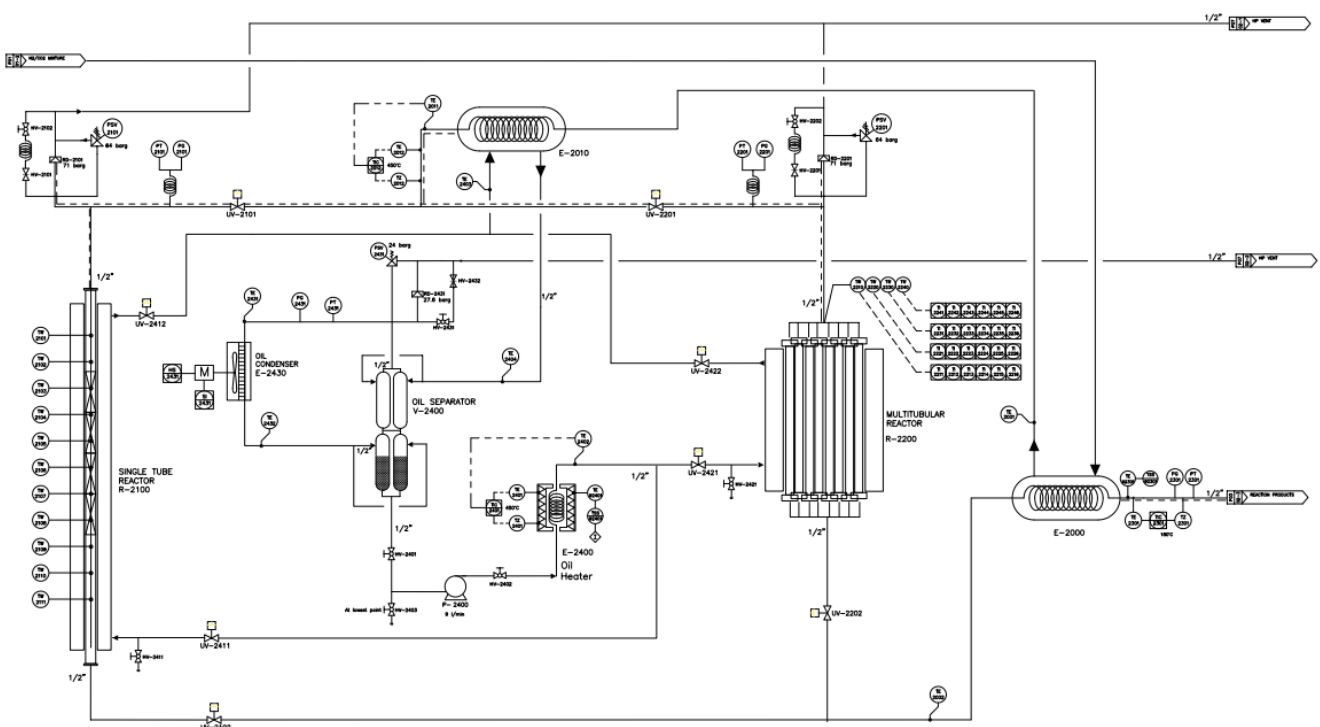


Figura 2.7. P&ID della sezione di reazione.

Il controllo della temperatura assume particolare importanza nelle reazioni di idrogenazione catalitica di interesse per il progetto. Nella maggior parte dei reattori a letto fisso su scala industriale, l'apporto e/o la rimozione diretta o indiretta di calore dal letto catalitico sono impiegati per regolare il profilo di temperatura in modo tale da raggiungere un profilo di reazione ottimale. Come già preliminarmente avviato in fase di progettazione di massima, è stato individuato il miglior sistema di regolazione della temperatura e dei flussi di calore. Il risultato della progettazione definitiva ha portato alla scelta di un modulo innovativo per una regolazione rapida ed efficiente della temperatura dei reattori, combinando il riscaldamento e il raffreddamento attraverso la circolazione di un fluido apposito attraverso la doppia camicia del reattore. Il riscaldamento del fluido avviene tramite un riscaldatore elettrico, mentre il raffreddamento viene effettuato inviando il fluido circolante ad uno scambiatore di calore.

Nello specifico il modulo di regolazione della temperatura è costituito da (Figura 2.8):

- due preriscaldatori, ovvero due scambiatori di calore in contro-corrente operanti a una temperatura operativa di 450 °C e una pressione di 60 bar (temperatura e pressione di progetto di 500 °C e 80 bar, rispettivamente);
- un riscaldatore del fluido circolante, costituito da un riscaldatore a immersione con potenza di 5 kW, operante a una temperatura operativa di 450 °C e una pressione di 20 bar;
- un "oil cooler" funzionante con un raffreddamento a convezione forzata con aria;
- una pompa di circolazione del fluido (pompa per liquidi ad alte prestazioni) con una portata di 7 l/min, operante fino a una temperatura di 450 °C e a una pressione di 15 bar;
- quattro separatori del fluido costituiti da quattro vessel della capacità di 8 litri ciascuno, operanti a una temperatura operativa di 450 °C e una pressione di 15 bar (temperatura e pressione di progetto di 500 °C e 80 bar, rispettivamente).

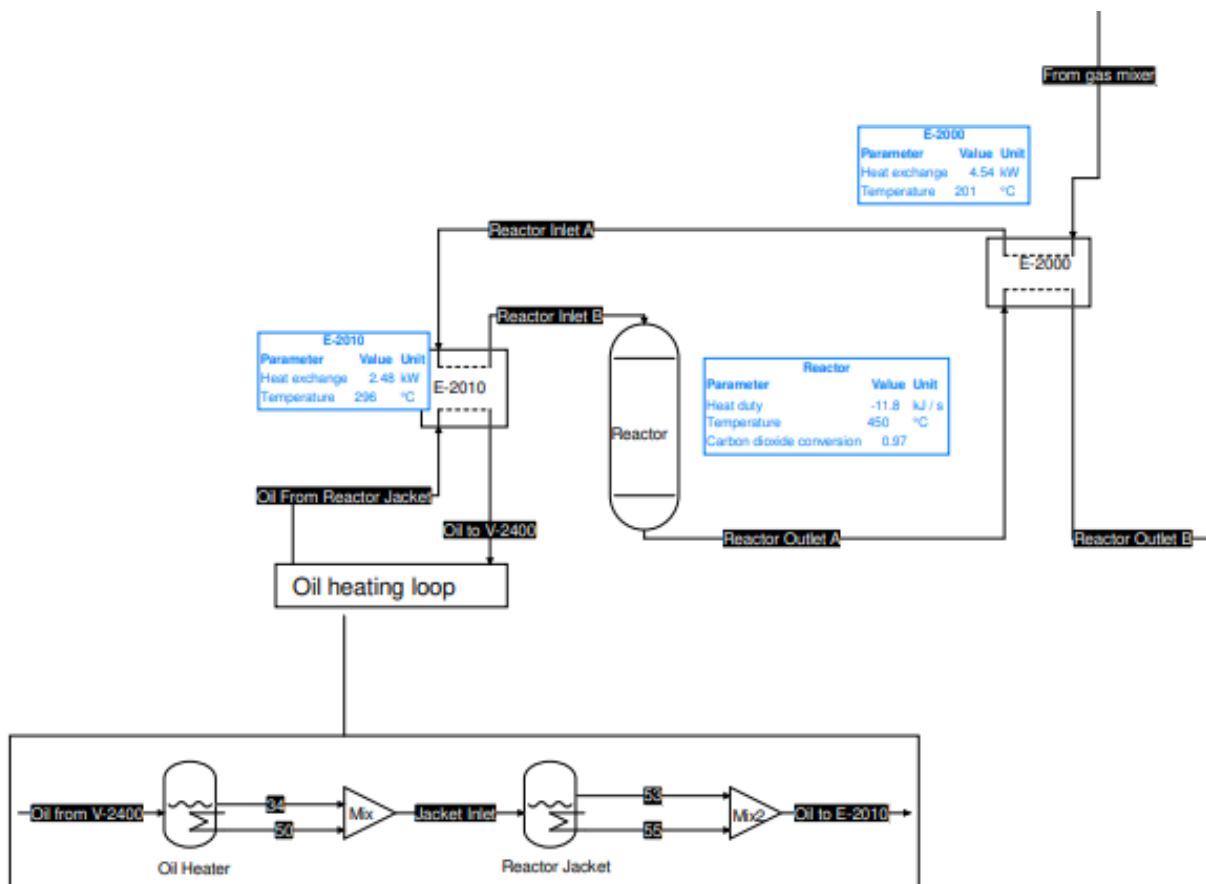


Figura 2.8. Rappresentazione schematica del modulo di regolazione della temperatura.

Viene di seguito descritta la modalità di funzionamento del modulo integrato. La miscela gassosa, prima di entrare nel reattore, viene preriscaldata attraverso uno scambiatore di calore (E-2000) operante a una temperatura di 450 °C e una pressione di 60 barg che scambia a sua volta il calore con l'olio uscente dalla camicia del reattore. È da sottolineare che tutta la linea in ingresso al reattore è elettroriscaldata e isolata termicamente. A monte dei reattori è presente una serie di valvole automatizzate che permettono, in base alla loro apertura o chiusura, l'ingresso della miscela di alimentazione al reattore monotubolare o multitubolare. Questo sistema controlla e gestisce la direzione del fluido di riscaldamento impiegato per garantire l'isotermicità del reattore. Quest'ultimo avviene tramite un circuito chiuso costituito da un *loop* di riscaldamento composto da una serie di serbatoi contenenti il fluido, una pompa ad alte prestazioni, un riscaldatore elettrico e un condensatore/raffreddatore ad aria. Al variare della temperatura operativa, la pressione di questo sistema chiuso viene variata per garantire il punto di ebollizione del fluido. Il calore prodotto dalle reazioni esotermiche di idrogenazione viene assorbito dal fluido e convertito in calore di vaporizzazione; parte di questo vapore è ricondensato nello scambiatore di calore E-2010 anch'esso operante a 450 °C e 60 barg, ed il restante induce un aumento di pressione del vessel. Per evitare quest'ultimo fenomeno, una valvola di controllo della pressione si apre permettendo di far fluire il gas al condensatore dell'olio E-2430 (Figura 2.7).

Configurazione multitubolare

La configurazione a multitubo si basa sull'impiego di un reattore multitubolare composto da diversi tubi gestiti in modalità parallela. Questo tipo di reattore consente di realizzare rapporti sufficientemente elevati tra superficie di scambio e volume di reazione, e sono quindi particolarmente adatti per la conduzione di reazioni ad elevata e media termicità. A seguito dell'attenta verifica della matrice "temperatura/pressione" è stata definita la tipologia di materiale più adatta costituente i singoli tubi. Inoltre, a seguito della progettazione di dettaglio, è stato eseguito il dimensionamento finale dell'apparecchiatura, aumentando il numero di tubi che andranno ad ospitare il catalizzatore. Si è infatti passati da una configurazione iniziale a 10 tubi, ad una finale di 12 tubi paralleli. Nella Tabella 2.8 si riportano, a seguito dei bilanci di massa dei diversi processi, le caratteristiche tecniche e operative definitive del reattore multitubolare.

Tabella 2.8. 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

Va sottolineato che il reattore multitubolare è progettato e fabbricato in conformità alla direttiva PED/2014/68/EU e ove richiesto in conformità con la norma ANSI B31.3. È stata definita la disposizione finale del reattore che avrà un'orientazione verticale e in cui la testa superiore dei singoli tubi (A1-A12) rappresenta l'ingresso dei gas di processo e la parte inferiore (B1-B12) costituisce l'uscita dei prodotti di reazione e dei gas non convertiti (Figura 2.9). Il reattore multitubolare è inoltre corredato da un ingresso del fluido di riscaldamento/raffreddamento e dalla corrispettiva uscita. Esso sarà inoltre dotato di valvole di sicurezza a

disco di rottura per evitare sovrappressioni che saranno settate a una pressione di esercizio del 2% eccedente quella massima.

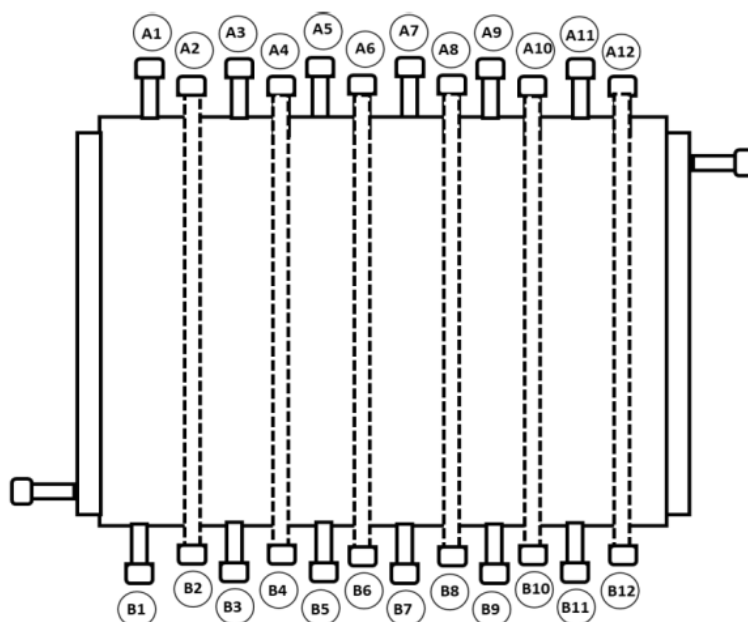


Figura 2.9. Rappresentazione grafica della configurazione reattoristica multitubolare.

Configurazione monotubolare

Come già definito in fase di progettazione di massima, al fine di facilitare lo *scale-up* della tecnologia, è stata individuata una configurazione reattoristica costituita da un singolo reattore tubolare (monotubolare) con dimensioni confrontabili alla scala industriale. Anche in questo caso, a seguito dello studio della matrice “temperatura/pressione” è stata definita la tipologia di materiale più adatta al singolo reattore. È stato quindi effettuato il dimensionamento finale dell’apparecchiatura che ha portato a definire le caratteristiche tecnico-operative riportate in Tabella 2.9. Il reattore progettato avrà un’altezza massima di quasi 7 metri.

Tabella 2.9. 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

Anche in questo caso il reattore a singolo tubo è progettato e fabbricato in conformità alla direttiva PED/2014/68/EU e in conformità con la norma ANSI B31.3. La disposizione finale del reattore avrà un’orientazione verticale e in cui la testa superiore del reattore (contrassegnata con la lettera A in figura) rappresenta l’ingresso dei gas di processo e la parte inferiore (contrassegnata con la lettera B in figura) costituisce l’uscita dei prodotti di reazione e dei gas non convertiti (Figura 2.10).

Il reattore monotubolare è inoltre corredato da un ingresso del fluido di riscaldamento/raffreddamento e dalla corrispettiva uscita. Esso sarà inoltre dotato di valvole di sicurezza a disco di rottura per evitare sovrappressioni che saranno settate a una pressione di esercizio del 2% eccedente quella massima.

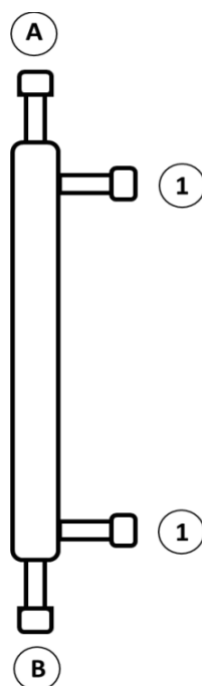


Figura 2.10. Rappresentazione grafica della configurazione reattoristica a singolo reattore (monotubolare).

Entrambi i reattori confluiscono in uscita in una trappola per cere, realizzata in acciaio, che viene raffreddata al fine di consentire l'eventuale condensazione di prodotti pesanti, e la loro facile rimozione una volta che il test sperimentale è terminato. I reattori sono inoltre dotati di sensori per monitorare la caduta di pressione e diverse termocoppie multipunto per monitorare la temperatura interna del letto catalitico lungo tutto l'asse del reattore. Per motivi di sicurezza, e per evitare sovrappressioni, entrambi i reattori sono dotati di valvola di sicurezza della pressione con disco di rottura. All'uscita dei reattori sarà predisposto un sistema di filtraggio per polveri, in modo da evitare l'eventuale trascinarsi di particelle di catalizzatore lungo tutte le sezioni dell'impianto.

2.4 Sezione di ricircolo

L'idrogenazione catalitica della CO_2 , con particolare riferimento alla produzione di metanolo e DME, a causa della limitata conversione all'equilibrio, richiede la presenza di una sezione che consenta il ricircolo dei composti non reagiti, realizzando in questo modo un processo di idrogenazione *multistep*. All'uscita dei reattori i reagenti e i prodotti sono miscelati tra loro; per tale motivo, i prodotti di reazione devono venire separati in modo da recuperarli ed eventualmente sottoporli ad ulteriore purificazione. In questo modo, la rimanente porzione dei composti non reagiti può essere ricircolata. Nello specifico, i principali prodotti di reazione attesi nel processo di sintesi del metanolo/DME sono metanolo, dimetiletere e acqua. Inoltre, l'uso di un ricircolo permette di avere condizioni di reazione più favorevoli rispetto ad una configurazione a singolo passo in termini di: *i*) alte velocità di reazione a causa della presenza del monossido di carbonio insieme ad una minore pressione parziale dell'acqua; *ii*) rimozione del calore più efficiente a causa della maggiore velocità del gas; *iii*) conversione finale più alta; *iv*) possibilità di variare il rapporto molare H_2/CO_2 nel reattore, rendendolo sovrastechiometrico. Infatti, quest'ultimo è il solo parametro operativo che ha il potenziale di aumentare la conversione della CO_2 .

A seguito della progettazione definitiva, la Figura 2.11 riporta il P&ID dell'intera sezione di ricircolo.

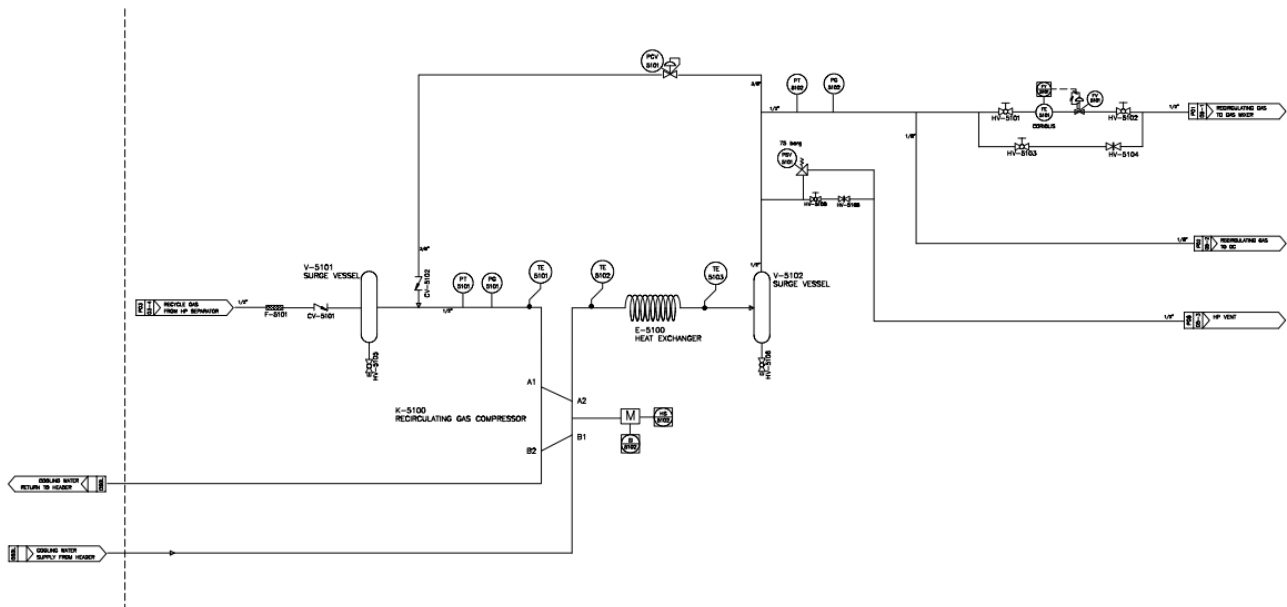


Figura 2.11. P&ID della sezione di ricircolo.

Nello specifico il modulo di ricircolo sarà costituito da:

- 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 operanti a una temperatura operativa di 30 °C e una pressione di 70 bar (temperatura e pressione di progetto di 100 °C e 80 bar, rispettivamente);
- controllori di flusso massico ad effetto *Coriolis* per la misura e il controllo della portata di gas ricircolato.

Fin dall'inizio, ma soprattutto durante la progettazione di massima, è stato approfondito l'argomento riguardante tale sezione in virtù della pericolosità degli eventuali trafileamenti del monossido di carbonio, derivante dalla reazione collaterale di Reverse Water Gas Shift (RWGS) ricircolato. Per tale motivo il compressore individuato è un compressore elettrico a due teste non lubrificato, per evitare trascinalamenti di olio nel flusso di ricircolo, che funzionerà in modalità "loop-mode" in modo da consentire un ampio intervallo di portate di ricircolo. Il compressore individuato è in grado di garantire un livello di trafileamento compreso tra 10^{-6} e 10^{-4} scc/s di elio (come da standard di prova). Le caratteristiche tecniche del compressore di ricircolo derivanti dal dimensionamento finale sono riportate in Tabella 2.10 insieme al disegno tecnico (Figura 2.12).

Tabella 2.10. 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

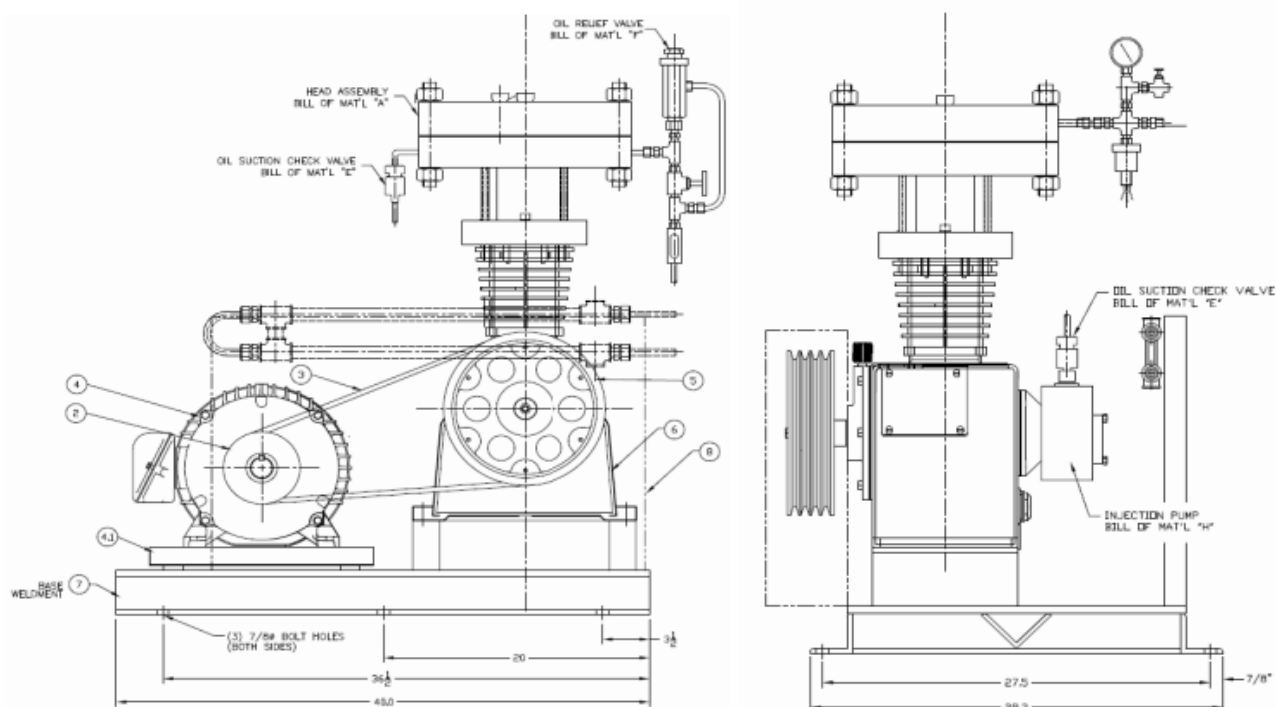


Figura 2.12. Disegno tecnico del compressore di ricircolo.

A seguito del dimensionamento finale, le specifiche tecniche di dettaglio del controllare di portata massico sono riportate in Tabella 2.11.

Tabella 2.11. Caratteristiche tecniche e operative di dettaglio del controllare massico di portata del sistema di ricircolo.

Tipologia	Ad effetto Coriolis
Portata	10 kg/h
Pressione massima	80 barg
Accuratezza	±0.5% sul valore misurato

Il funzionamento del modulo di ricircolo si basa sull'invio del gas di ricircolo proveniente dal separatore di alta pressione (la cui descrizione è riportata nella sezione 2.5) al compressore che lavora in "spill-back loop". Successivamente la quantità di gas compresso da rinviare alla sezione di ricircolo viene gestita attraverso un controllore di flusso massico. I due vasi espansori posizionati a monte e a valle del compressore sono usati per smorzare le pulsazioni indotte dalla compressione del gas.

In fase di progettazione è stato inoltre dato risalto al massimo grado di automazione possibile di questa sezione; infatti, essendo la sezione di ricircolo altamente dinamica e dipendente dalla composizione dei prodotti in uscita dai reattori e dall'alimentazione "fresca", si è scelto di dotare la sezione di un blocco logico, direttamente interfacciato al sistema *online* di analisi gas, che consenta la regolazione della portata dei gas freschi sulla base del rapporto stechiometrico (H_2/CO_2 o $H_2/(CO_2+CO)$) presente nel gas di ricircolo. Nello specifico, il sistema di controllo sarà in grado, a seconda dei valori di concentrazione di H_2 , CO_2 e CO rilevati dall'analizzatore gas *online*, di regolare in modo automatico i valori di *set-point* dei regolatori di portata in ingresso in modo da mantenere il rapporto stechiometrico prefissato e/o desiderato.

A tale scopo, a supporto della progettazione, sono stati condotti dei calcoli al fine della determinazione della composizione del gas di ricircolo e di quella che, una volta miscelato quest'ultimo con la corrente gassosa fresca, viene alimentata nuovamente al reattore. Inoltre, sulla base di tali calcoli, sono state condotte delle

campagne sperimentali simulanti l'effetto del ricircolo nell'impianto *bench-scale* XtL presente in Sotacarbo con un catalizzatore commerciale (per maggiori approfondimenti si rimanda al report "Messa a punto delle apparecchiature e sperimentazione" relativo alla linea di attività 3.20).

La corrente fresca viene unita alla corrente ricircolata; le due vengono miscelate e preriscaldare nella sezione descritta nel par. 2.2. Le condizioni operative sono state discusse e sono di seguito elencate:

- La composizione, in termini di frazioni molari, della corrente fresca è la seguente: $y_{CO_2} = 0.225$, $y_{H_2} = 0.675$, $y_{N_2} = 0.10$. Tale corrente contiene i due reagenti CO_2 e H_2 in rapporto stechiometrico e il 10% di N_2 .
- La corrente fresca e quella di ricircolo vengono portate alle condizioni operative di processo.

Nel separatore viene effettuato un *flash* della corrente di processo ad una determinata temperatura (che potrà essere variata e che è stata definita in fase di progettazione di dettaglio). La corrente liquida in uscita sarà una miscela costituita prevalentemente da metanolo, dimetiletere e acqua. La corrente gassosa in uscita dal separatore contiene prevalentemente le specie non condensabili, CO_2 , H_2 , CO e N_2 . Una frazione della corrente gassosa può essere spurgata o inviata ad analisi gascromatografica e la frazione rimanente viene ricompresa alla pressione desiderata dal compressore e ricircolata.

2.5 Sezione di separazione e raccolta dei prodotti

A valle della sezione di reazione è presente una zona di raccolta e separazione dei prodotti di reazione condensabili e incondensabili costituita da un sistema di separazione gas-liquido. Questo 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. Questa sezione ha la duplice finalità di consentire il recupero dei prodotti di interesse e la separazione dei gas che vengono reindirizzati alla sezione di ricircolo. Basandosi sull'esperienza maturata negli stessi processi su scala da laboratorio, la sezione di separazione e raccolta dei prodotti è stata dapprima proposta in fase di progettazione preliminare, e confermata poi nella progettazione di dettaglio; essa è costituita dai seguenti componenti principali:

- 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.
- 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.

A seguito della progettazione definitiva, la Figura 2.13 riporta il P&ID dell'intera sezione di separazione dei prodotti di reazione.

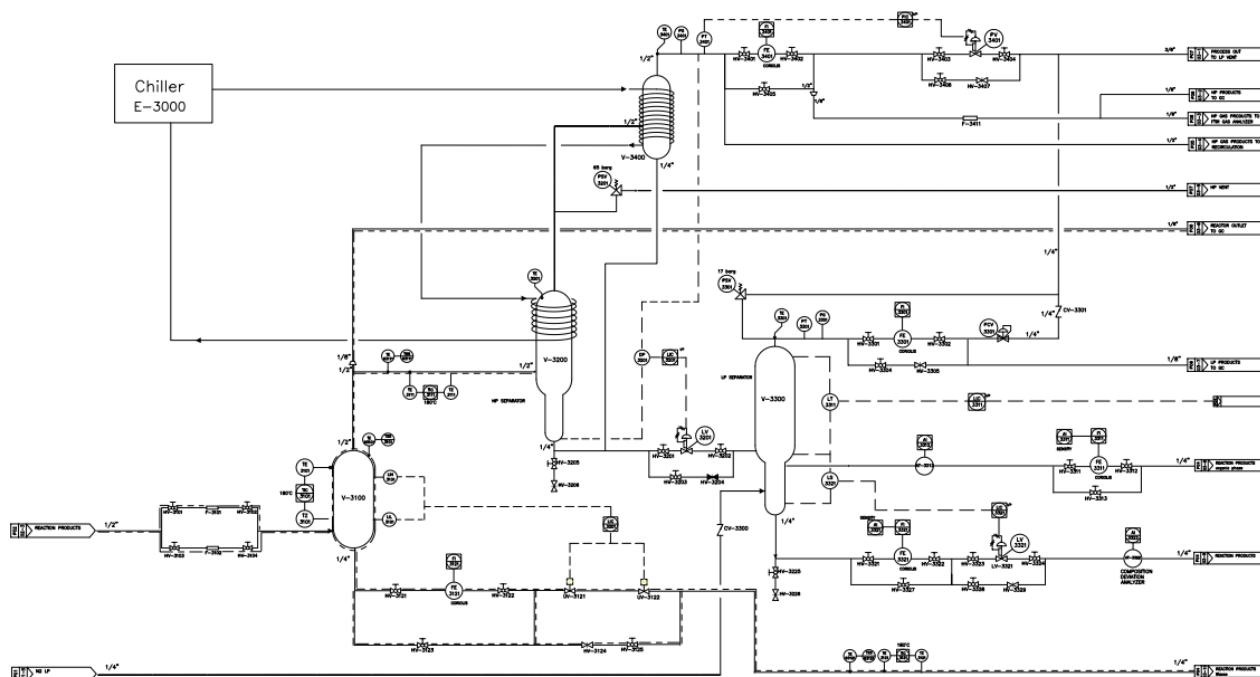


Figura 2.13. P&ID della sezione di separazione dei prodotti di reazione.

Il principio di funzionamento di tale sezione viene di seguito descritto. L'effluente gassoso caldo in uscita dal reattore scambia, come visto nel paragrafo 2.4, il calore con l'alimentazione fresca, e viene inviato successivamente alla trappola per cere. Questa viene mantenuta a una temperatura di 180 °C, 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, ha il compito di condensare l'acqua, il metanolo e il 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 spingere ulteriormente la separazione gas-liquido; questo viene fatto attraverso il raffreddamento indotto da un gruppo *chiller* a circuito chiuso, così che la temperatura possa essere regolata per permettere una separazione il più spinta possibile. I gas in uscita dal condensatore vengono inviati in parte al *loop* di ricircolo e in parte al *vent* di processo; inoltre, una piccola porzione di questi

è inviata per l'analisi quali/quantitativa gascromatografica. In uscita dal condensatore è presente una valvola di controllo per la regolazione della pressione. 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 (quest'ultima quando presente). A supporto dello *stripping* dal liquido viene inviato un piccolo flusso di azoto a bassa pressione per consentire il massimo recupero del gas, eventualmente dissolto nel liquido.

Nei processi di produzione del metanolo e del metano non dovrebbero formarsi sottoprodotti organici; d'altronde in condizioni critiche o con l'impiego di catalizzatori scarsamente selettivi, è stata contemplata in fase di progettazione la possibile formazione di idrocarburi. Tuttavia, nel caso dell'idrogenazione catalitica della CO₂ a DME, la porzione organica separata consiste proprio nel DME, che viene successivamente indirizzato verso il sistema di campionamento e, se non conservato, inviato in torcia. Acqua e metanolo, gli altri due composti attesi nell'effluente liquido, vengono inviati al sistema di campionamento a pressione ambiente e stoccati in un apposito serbatoio. Infine, le cere eventualmente recuperate nell'apposita trappola vengono inviate tramite una linea riscaldata al sistema di campionamento a pressione atmosferica e successivamente stoccate in un serbatoio in vetro da 5 litri.

Vengono di seguito riportate le caratteristiche tecnico/operative dei diversi componenti costituenti la sezione di separazione dei prodotti.

Trappola per cere

La trappola per cere è costituita da un contenitore in acciaio inossidabile (SS316) della capacità di circa 2 litri, posto in uscita del sistema di reazione e comune sia al reattore monotubolare che multitubolare, con la funzione di separare e recuperare eventuali sottoprodotti ad elevato peso molecolare. Nei processi di produzione del metanolo/DME e del metano tali sottoprodotti non dovrebbero di norma formarsi, ma per sicurezza e per ragioni di flessibilità operativa dell'impianto si è optato per includere anche tale dispositivo. Infatti, come accennato, in condizioni critiche o con l'impiego di catalizzatori scarsamente selettivi, è stata contemplata la possibile formazione di idrocarburi pesanti in fase di progettazione: in tal caso la trappola recupererebbe tali sottoprodotti, evitando di trascinarli lungo il *piping* dell'impianto con potenziali rischi dovuti a problemi di condensazione nei punti freddi, che potrebbero costituire delle ostruzioni in alcune linee o intere sezioni dell'impianto.

La Tabella 2.1 riporta le caratteristiche tecniche e operative di dettaglio della trappola per cere.

Tabella 2.12. Caratteristiche tecniche e operative di dettaglio della trappola per cere.

Materiale	Acciaio inox SS316L
Pressione di progetto	80 barg
Pressione di esercizio	60 barg
Temperatura di progetto	250 °C
Temperatura di esercizio	180 °C
Lunghezza	358,6 mm
Diametro interno	114 mm
Volume totale	1950 cm ³

In Figura 2.14 viene riportata la rappresentazione grafica della trappola per cere con gli ingressi e le uscite di gas e liquidi. Nello specifico l'ingresso contrassegnato con "A" rappresenta l'ingresso dei gas, "B" lo scarico dei liquidi, "C" un ulteriore ingresso di gas, "E" e "F" i controllori del livello del liquido.

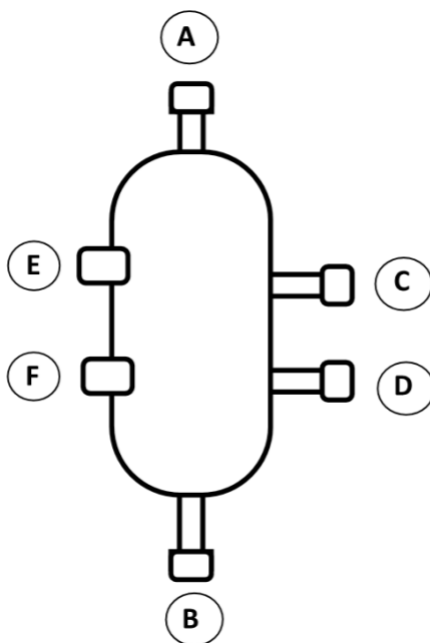


Figura 2.14. Rappresentazione grafica della trappola per cere.

Separatore gas-liquido ad alta pressione

Questo componente è in grado di separare i prodotti gassosi non reagiti durante la normale marcia dell'impianto dalla fase liquida permanente, minimizzando il trascinamento di particelle liquide nel gas. La condensazione dei liquidi all'interno del separatore viene effettuata tramite la circolazione di acqua di rete all'interno della doppia camicia posta nella parte superiore del separatore o tramite un fluido derivante da bagno termostato. Le specifiche tecniche individuate per questo componente sono riportate in Tabella 2.13.

Tabella 2.13. Caratteristiche tecniche e operative di dettaglio del separatore gas-liquido ad alta pressione.

Materiale	Acciaio inox SS316L
Pressione di progetto	80 barg
Pressione di esercizio	60 barg
Temperatura di progetto	200 °C
Temperatura di esercizio	Da 5 °C a 50 °C
Lunghezza	1098mm
Diametro interno	102,26 mm
Volume totale	8000 cm ³

La Figura 2.15 riporta la rappresentazione grafica del separatore gas-liquido di alta pressione con gli ingressi e le uscite di gas e liquidi. L'ingresso contrassegnato con "C" rappresenta il gas in ingresso proveniente dalla trappola per cere, "A" l'uscita dei gas non condensabili, "B" l'uscita del liquido condensato.

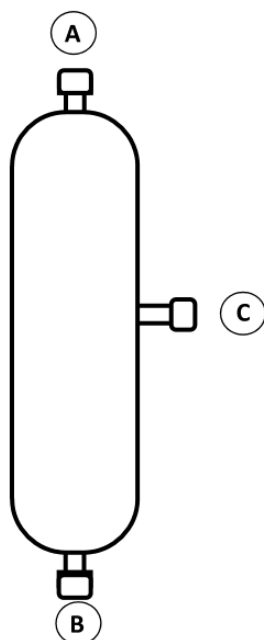


Figura 2.15. Rappresentazione grafica del separatore gas/liquido di alta pressione.

La fase gassosa viene recuperata in modo continuo dal separatore ad alta pressione e inviata al condensatore di alta pressione (Tabella 2.14), anch'esso raffreddato tramite un sistema *chiller*, costituito da un tubo spiralato di lunghezza pari a 6 metri, seguito da un contenitore per recuperare la fase liquida, che viene poi rinviata al fondo del separatore di alta pressione.

Tabella 2.14. Caratteristiche tecniche e operative di dettaglio del condensatore ad alta pressione.

Materiale	Acciaio inox SS316L
Pressione di progetto	80 barg
Pressione di esercizio	60 barg
Temperatura di progetto	100 °C
Temperatura di esercizio	Da 5 °C a 20 °C
Volume totale	8000 cm ³

I prodotti incondensabili recuperati nella parte superiore del condensatore, a seguito del passaggio in un controllore massico ad effetto *Coriolis*, possono essere inviati alla sezione di ricircolo, in cui vengono compressi e rinviati al reattore, o ad un analizzatore online (gascromatografo), o essere spurgati e inviati alla torcia. Le caratteristiche tecnico/operative del controllore massico sono riassunte nella Tabella 2.15.

Tabella 2.15. Caratteristiche tecniche e operative di dettaglio del controllore massico in uscita dal condensatore.

Materiale	Acciaio inox SS316L
Pressione di esercizio	60 barg
Temperatura di esercizio	30 °C
Portata	340 ÷ 17000 g/h

Separatore gas-liquido a bassa pressione

Una volta che la fase liquida è recuperata nella parte inferiore del separatore ad alta pressione, viene inviata al separatore a bassa pressione. Questo componente consente la separazione di tre distinte fasi, una gassosa e due liquide: queste ultime potrebbero formarsi dalle più comuni reazioni di idrogenazione dando origine ad una fase idrofilica e una idrofobica. In questo modo sarà possibile spillare in tutta sicurezza, e separatamente in diversi contenitori, i due liquidi immiscibili tra loro. L'unità sarà dotata di un *loop* di controllo del livello del liquido attraverso un set di valvole di controllo poste sulla linea di prelievo del liquido.

Tabella 2.16. Caratteristiche tecniche e operative di dettaglio del separatore a bassa pressione.

Materiale	Acciaio inox SS316L
Pressione di progetto	20 barg
Pressione di esercizio	5 barg
Temperatura di progetto	100 °C
Temperatura di esercizio	30 °C
Lunghezza	1032 mm
Diametro interno	108,2 mm
Volume totale	10000 cm ³

Al fine di incrementare l'efficienza di separazione, questa unità è dotata di un'iniezione supplementare di azoto a bassa pressione per migliorare lo *stripping* tra la fase gas e quella liquida. Ciascuna fase liquida viene recuperata separatamente, quantificata attraverso controllori massici ad effetto *Coriolis*, e spillata attraverso una serie di valvole pneumatiche in un apposito sistema di campionamento. Lo spillamento del liquido sarà effettuato in maniera automatizzata.

La Figura 2.16 riporta la rappresentazione grafica del separatore gas/liquido di bassa pressione con gli ingressi e le uscite di gas e liquidi. L'ingresso contrassegnato con "C" rappresenta l'ingresso del liquido di processo, "B" è l'uscita dei prodotti di reazione in fase acquosa, "E" quella dei prodotti di reazione in fase organica, "D" l'uscita del gas di bassa pressione e "A" rappresenta il trasmettitore di livello.

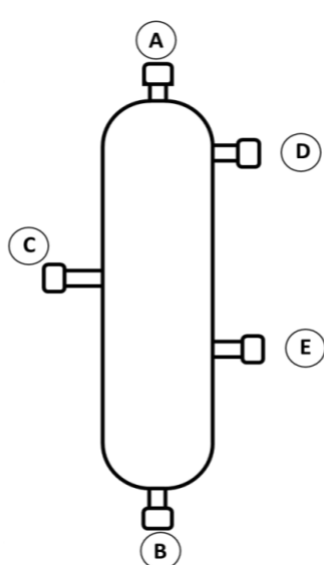


Figura 2.16 . Rappresentazione grafica del separatore gas/liquido di bassa pressione.

Una volta che tutti i prodotti sono stati separati, i differenti effluenti vengono inviati verso il sistema di raccolta. A seguito della progettazione definitiva, la Figura 2.17 riporta il P&ID della sezione di raccolta dei prodotti di reazione.

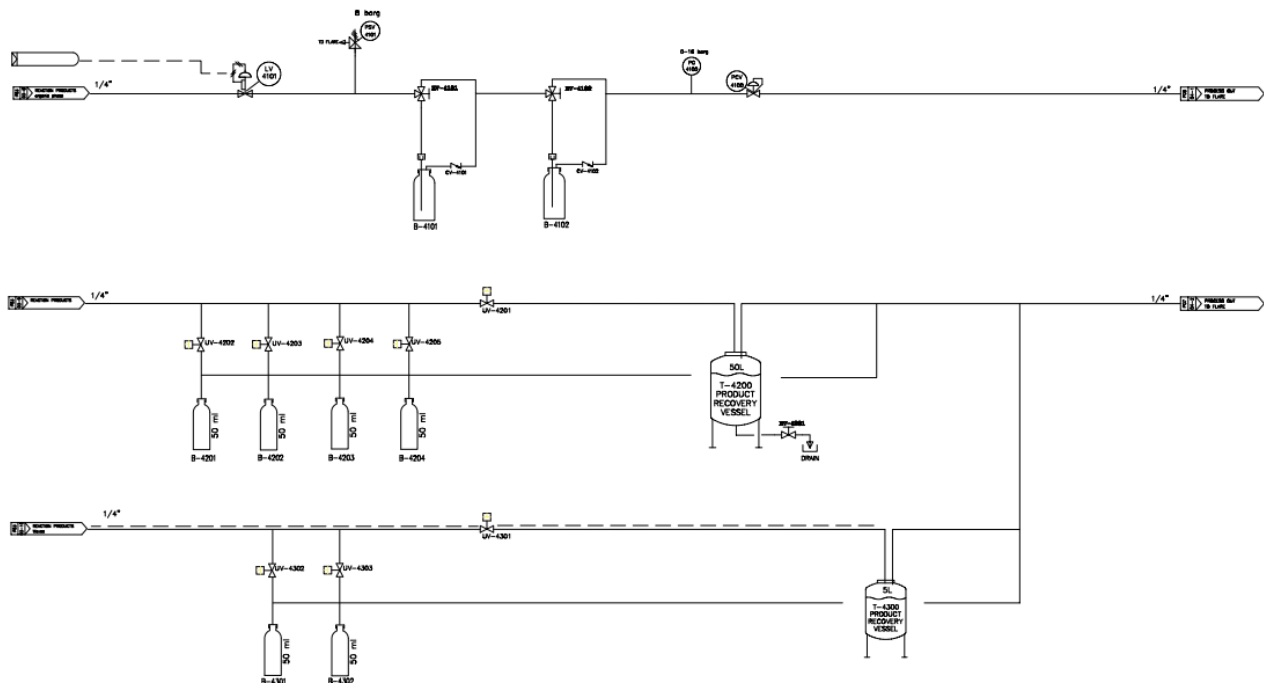


Figura 2.17. P&ID della sezione di raccolta dei prodotti.

La sezione di raccolta è stata 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 vessel di raccolta con capacità di 50 litri. La terza linea di campionamento, destinata alla raccolta delle eventuali cere prodotte, è totalmente elettroriscaldata convogliando il prodotto in un serbatoio in vetro da 5 litri.

2.6 Sistema di campionamento e analisi dei prodotti

Una sezione fondamentale dell'impianto sperimentale P2G/L riguarda il campionamento e l'analisi dei fluidi nelle varie fasi del processo, al fine di conoscere in tempo reale e con precisione come questo stia evolvendo. Perciò il sistema di campionamento e analisi deve permettere una misurazione delle concentrazioni delle specie coinvolte nel processo che sia costante, affidabile e sicura, senza influenzare il processo stesso. A tal fine verranno realizzati opportuni punti di campionamento compatibili con le condizioni operative (temperatura e pressione) dell'impianto e provvisti, dove occorra, di sistemi di pulizia in modo da consentire la successiva corretta misurazione dei fluidi da analizzare. Di seguito si riporta (Tabella 2.17) il dettaglio dei fluidi coinvolti nel processo di idrogenazione della CO₂ e dei punti di campionamento delle singole specie.

Tabella 2.17. Specie coinvolte nella reazione di idrogenazione della CO₂ e punti di campionamento.

Stato fisico	Specie	Punti di campionamento (stream)		Gas Cromatografo (GC-4400)	Analizzatore gas (AT-4500)
		In uscita da	In ingresso a		
REAGENTI					
Gas	CO ₂ , CH ₄ , CO, H ₂ , N ₂	- Linee Gas	- Miscelatore Gas	x	x
		- Testa trappola cere	- Separatore gas-liquido HP	x	x
		- Testa separatore HP	- Torcia	x	x
		- Testa condensatore LP	- Miscelatore di gas (ricircolo), sistema di analisi e torcia	x	x
		- Testa separatore LP	- Torcia	x	
PRODOTTI					
Gas	CH ₃ OH, CH ₃ OCH ₃ , H ₂ O, altri Idrocarburi leggeri	- Testa trappola cere	- Separatore gas-liquido HP	x	
		- Testa separatore LP	- Torcia	x	
		- Testa condensatore HP	- Miscelatore di gas (ricircolo), sistema di analisi e torcia	x	
Liquido	CH ₃ OH, H ₂ O, altri Idrocarburi (C ₄ /C ₅)	- Fondo separatore LP	- Vessel recupero prodotti	x	

Sulla base delle caratteristiche dell'impianto e della specificità dei componenti in ingresso e in uscita, sono necessarie due diverse tipologie di sistema di analisi in linea per tutte le specie coinvolte nella reazione i cui punti di campionamento sono mostrati in Figura 2.18.

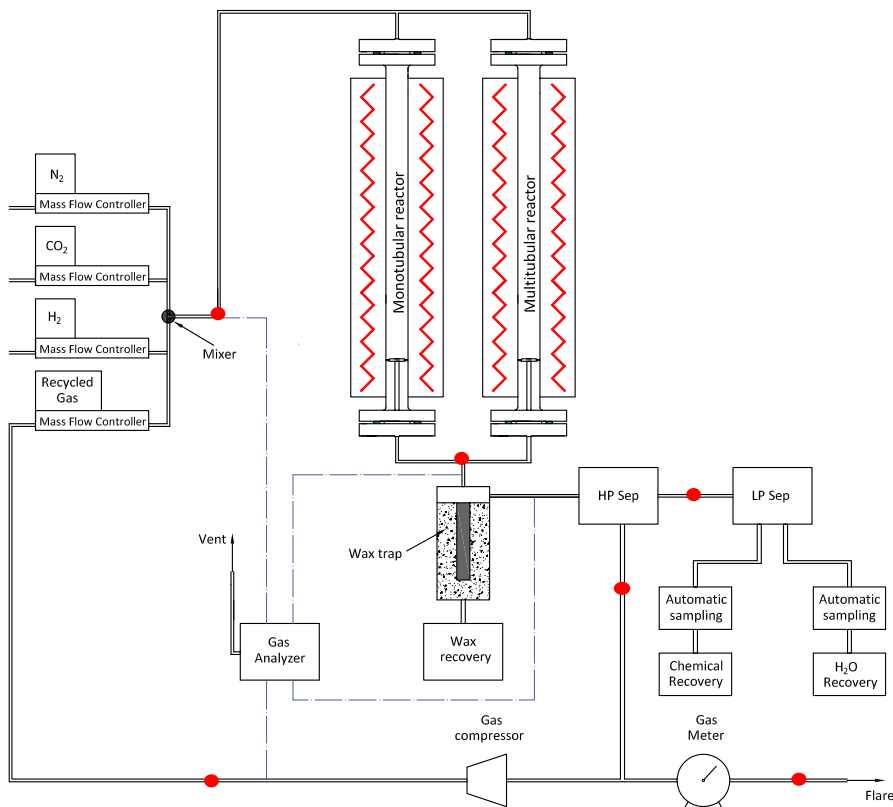


Figura 2.18. Schema semplificato del processo con i punti di campionamento gas (simbolo ●).

A seguito della progettazione di dettaglio, la Figura 2.19 riporta il P&ID della sezione di analisi.

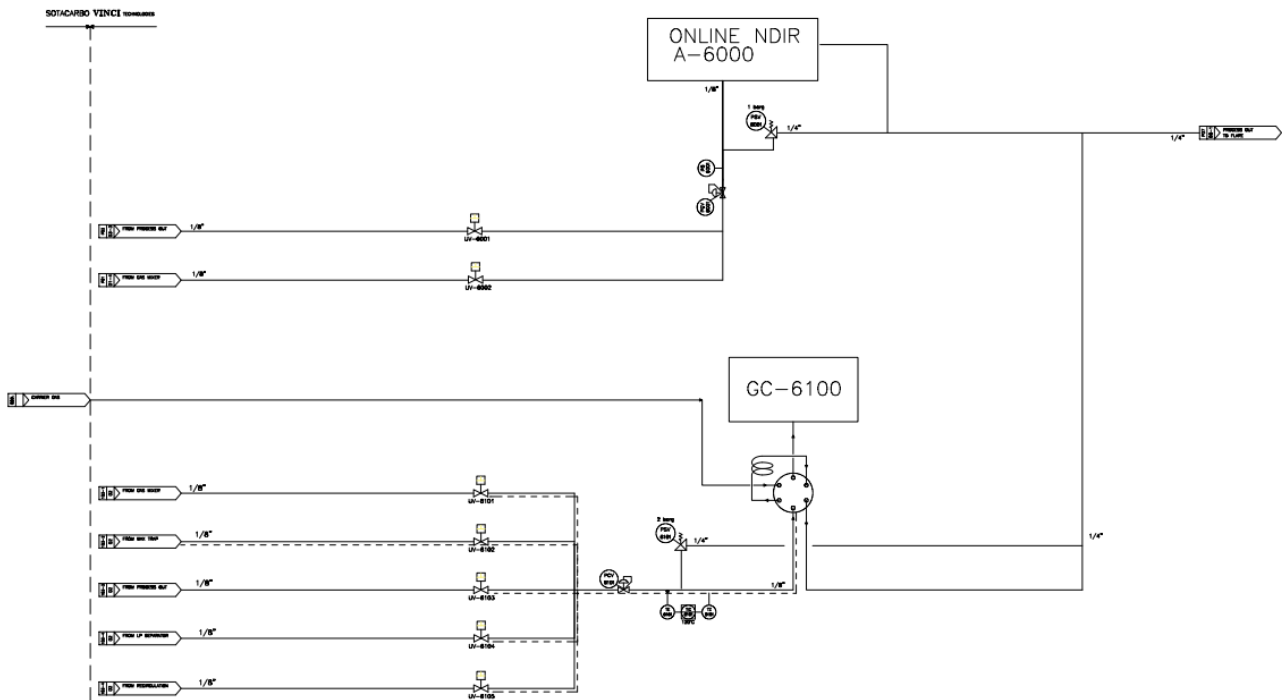


Figura 2.19. P&ID della sezione di analisi.

Il primo sistema consente un monitoraggio in tempo reale delle variazioni di concentrazione delle specie gassose coinvolte (CO , CH_4 , CO_2 e H_2) attraverso l'utilizzo di detector del tipo *Non-Dispersive Infrared (NDIR)* e a *Termoconducibilità (TCD)*. Il secondo sfrutta la tecnica di separazione Gas Cromatografica (GC) al fine di rilevare, oltre le specie gassose sopra elencate, anche i prodotti di reazione quali metanolo, dimetiletere, acqua e idrocarburi leggeri che si potrebbero eventualmente formare.

L'analizzatore NDIR (A-6000) consente la misurazione con una notevole sensibilità, oltre a fornire un'elevata stabilità per lunghi periodi di tempo. I componenti principali sono la sorgente di infrarossi, una camera del gas campione, un filtro per la lunghezza d'onda ed un rivelatore a infrarossi. La concentrazione viene rilevata in modo elettro-ottico tramite l'assorbimento del gas mentre il segnale d'uscita del rivelatore è direttamente proporzionale all'assorbimento della luce infrarossa allo specifico numero d'onda. La determinazione dell' H_2 , effettuata col rivelatore di conducibilità termica (TCD) mette a confronto la conducibilità di due flussi di gas: il *gas carrier* puro (riferimento) e il campione. Le variazioni nella temperatura dei cavi del rivelatore riscaldati elettricamente sono influenzate dalla conducibilità termica del gas che fluisce attorno al detector. Le variazioni relative alla conducibilità termica vengono rilevate come variazioni della resistenza elettrica e come tali vengono misurate. Al fine di garantire una misura più accurata possibile, è necessario prevedere la possibilità di utilizzare analizzatori differenti o con doppie celle di misura, specie per la determinazione della concentrazione di quelle specie con più ampio range di misura. Oltre alla misurazione in tempo reale, risulta indispensabile un grado di precisione minimo del $\pm 4\%$ per ciascun componente. Le portate e le pressioni in ingresso all'analizzatore online necessarie per il corretto funzionamento devono essere rispettivamente comprese tra 0,7 e 1,2 L/min e tra 2 e 50 kPa.

Nella Tabella 2.18 sono riportati i range di concentrazione per le specie coinvolte.

Tabella 2.18. Gas da analizzare con analizzatori online (NDIR e TCD) e relativi range di concentrazioni.

Gas	CO ₂	CH ₄	CO	H ₂
Concentrazione (%vol)	0÷50	0÷100	0÷40	0÷100

La tecnica della gascromatografia, la più appropriata per raggiungere gli obiettivi di precisione e affidabilità delle misure, si basa sulla ripartizione dei componenti di una miscela da analizzare tra una fase stazionaria e una fase mobile gassosa, in funzione della diversa affinità di ogni componente della miscela con le fasi.

Il gascromatografo (GC-6100) ad iniezione di gas deve essere posto a valle dell'impianto, per consentire l'analisi qualitativa e quantitativa delle specie gassose quali H₂, O₂, N₂, H₂O, CH₄, CO, CO₂, CH₃OH, DME e idrocarburi sino C₄/C₅ prodotte nel processo di idrogenazione catalitica della CO₂ e riassunte nella Tabella 2.19. Il sistema eseguirà automaticamente anche il bilancio di massa. Per consentire la rilevazione delle specie gassose sopra elencate, devono essere installati due rivelatori collegati in serie: il primo è un rivelatore a termoconducibilità (TCD) a singolo filamento con microcella e temperatura operativa fino a 400 °C, per l'analisi di specie quali H₂, N₂, CH₄, CO₂, CO; il secondo è un rivelatore a ionizzazione di fiamma (FID) e temperature di esercizio fino a 450 °C, che decompone composti quali CH₃OH, DME, C₄/C₅. Il sistema prevede l'utilizzo di argon o azoto come gas carrier. È caratterizzato da un forno ad altissima efficienza, in grado di operare da +4 a 450 °C con una programmata di temperatura sino a 20 rampe, e incrementi di 120 °C/min al massimo. Per l'applicazione in oggetto, devono essere installate due tipi di colonne collegate in serie. La prima è una colonna capillare Pora-PLOT (30m-0.53mm) e la seconda è una colonna capillare Molesieve 5A (30m-0,53mm) per la separazione di CO₂, CH₃OH, DME, C₄/C₅ e H₂, N₂, CH₄, CO, rispettivamente.

Tabella 2.19. Gas da analizzare con GC e relativi range di concentrazioni.

Gas	(%vol)
H ₂	0÷80
CO ₂	0÷50
N ₂	0÷100
CO	0÷30
CH ₄	0÷100
CH ₃ OCH ₃	0÷90
CH ₃ OH	0÷90
Idrocarburi leggeri	0÷10

Lo scopo della colonna e del forno è infatti quello di separare il campione iniettato nei singoli componenti mentre attraversa la colonna. I rivelatori permettono invece di identificare mediante confronto con i tempi di ritenzione la presenza dei composti all'uscita dalla colonna. Quando ciascun composto arriva al rivelatore, quest'ultimo genera un segnale elettrico proporzionale alla quantità di composto presente che successivamente viene inviato ad un sistema di analisi dati, rappresentato come un picco nel cromatogramma. Lo strumento è in grado di controllare e regolare automaticamente la pressione impostata con una elevata accuratezza e precisione (0,001 psi – 6,894 Pa). La configurazione del GC deve comprendere due valvole pneumatiche, la prima destinata al campionamento dei gas, e la seconda (detta *Column Isolation*) necessaria per isolare la colonna Molesieve. L'estremità di ciascuna colonna è collegata all'iniettore, dal quale viene immesso il campione all'interno, mentre l'altra estremità è collegata al rivelatore. La lunghezza, il diametro e il rivestimento delle colonne dipendono dal tipo di composti da separare e sono state attentamente selezionate.

Lo strumento sarà dotato di un pannello di controllo frontale costituito da un display che permette la visualizzazione dello stato del GC, dei valori di regolazione e di eventuali messaggi di errore, insieme a degli indicatori sullo stato generale e sulle attività in corso. Le linee dei gas in ingresso al gascromatografo devono essere riscaldate per evitare la condensazione dei prodotti più altobollenti che compongono la miscela (metanolo e acqua). Questa soluzione renderà più semplice ed affidabile la determinazione gascromatografica sia per il calcolo del bilancio di massa al carbonio del processo (inclusi metanolo che DME), sia per l'analisi quantitativa online dell'intero effluente in uscita dall'impianto (compresi i gas prodotti e/o non reagiti). Le analisi GC saranno programmate e avviate dal PLC dell'impianto.



Figura 2.20. Esempio di gascromatografo ad iniezione di gas.

Entrambi gli strumenti devono essere dotati di appositi software per la loro gestione e vista la notevole quantità di dati, i risultati saranno fruibili in un formato tabellare, in modo da renderne agevole l'elaborazione. I valori di concentrazione in tempo reale (NDIR/TCD) di H_2 , CO_2 e CO permetteranno di regolare i valori di *setpoint* dei regolatori di flusso dei gas in ingresso in modo tale da mantenere il rapporto $H_2/(CO+CO_2)$ desiderato.

Si precisa che la necessità di un doppio sistema di analisi è fondamentale, oltre che per la completa quantificazione dei componenti, anche per una valutazione più accurata dell'andamento del processo, con una doppia misura ripetuta (e con tecniche analitiche differenti) delle specie coinvolte.

Gli analizzatori (GC e NDIR/TCD), come anche i componenti fondamentali per il loro funzionamento, saranno alloggiati in un apposito armadio che troverà posto in un box dedicato.

Rispetto alla progettazione di massima, in cui era stato previsto un sistema per l'analisi offline di campioni liquidi, nella progettazione di dettaglio è prevista l'introduzione di linee riscaldate dei gas in ingresso al GC, che eviterà l'integrazione del sistema di analisi con un GC da banco accoppiato a uno spettrometro di massa. Questa configurazione evita il campionamento manuale da parte di un operatore e semplifica la gestione dell'analisi dei prodotti.

2.7 Strumentazione

La strumentazione di misura è parte integrante della progettazione di dettaglio dell'impianto P2G/L. Essa è necessaria a misurare le temperature, le pressioni, le portate e i livelli dell'impianto P2G/L e, grazie al contributo del sistema di controllo, a monitorare e regolare i principali parametri di processo.

Sull'impianto P2G/L sarà installata la seguente strumentazione:

- 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 P2G/L hanno un'elevata classe di precisione. In Figura 2.21 e Figura 2.22 si riportano le fotografie relative ad alcune delle strumentazioni di misura implementate nell'impianto P2G/L.



Figura 2.21. Esempio di strumentazioni dell'impianto P2G/L



Figura 2.22. Esempio di strumentazione di misura montata sull'impianto P2G/L.

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

In fase di progettazione di dettaglio, particolare attenzione è stata data al controllo puntuale della temperatura nelle varie sezioni dell'impianto P2G/L, dove saranno installate circa 60 termocoppie. Anche sui reattori sarà presente un sistema per il controllo accurato della temperatura. In particolare: sul reattore singolo saranno installate 10 termocoppie; sul reattore multi-tubo saranno installate 24 termocoppie per verificare l'isotermicità delle reazioni. Un altro parametro fondamentale per il controllo del processo è la pressione; pertanto, in fase di progettazione di dettaglio, è stata prevista l'installazione di circa 30 misuratori di pressione.

I misuratori di portata saranno otto e saranno prevalentemente concentrati nella zona di adduzione del gas, nella quale saranno presenti anche mass flow controller, misuratori e controllori di portata.

2.8 Sistema di regolazione e controllo

Il sistema di regolazione e controllo consentirà la regolazione e il monitoraggio continuo dei diversi parametri di processo e sarà in grado di misurare e registrare in tempo reale le grandezze fisiche rilevate dalla strumentazione in campo (portate, pressioni, temperature, etc.).

Inoltre il sistema di controllo sarà dotato di logiche per un intervento automatico in caso di emergenza per garantire un elevato grado di sicurezza.

L'architettura di base del sistema di controllo risulta essere estremamente semplice e altamente funzionale, in modo da adattarsi perfettamente alle complesse esigenze di controllo del processo, gestita tramite una apposita interfaccia grafica Human Machine Interface (HMI).

La perfetta integrazione dell'hardware e del software del sistema di controllo consente una supervisione altamente affidabile dei parametri operativi per un funzionamento automatizzato.

La workstation di controllo è dedicata alla configurazione del processo, al controllo dell'operatore, alla gestione degli allarmi, alla visualizzazione dei trend e degli storici, al backup dei dati, alla generazione di report e alla ricerca della cronologia degli eventi dell'operatore. Il database storico consentirà una rapida analisi e l'estrapolazione dei dati.

La progettazione dell'impianto include la configurazione iniziale del software (versione Run Time) per l'acquisizione dei dati e la supervisione dell'impianto. Nello specifico il software è in grado di svolgere le seguenti operazioni:

- Acquisizione di misure e di dati grezzi (temperatura, pressione, portate ecc...).
- Visualizzazione continua delle misure sotto forma, ad esempio, di linee di tendenze.
- Registrazione delle misure nel computer.
- Visualizzazione del sinottico generale del sistema e indicazione dello stato di ciascun componente principale, i valori della misurazione e i set point.



Figura 2.23. Indice del sistema di controllo.

Il sistema di controllo fornito dalla ditta è organizzato secondo lo schema visibile in Figura 2.23, nello specifico:

- *Feed section* (sezione di alimentazione) visibile in Figura 2.24.
- *Reactor section* (sezione di reazione).
- *Separator section* (sezione di separazione).
- *Gas Analysis* (sezione di analisi dei gas).
- *Trends* (sezione di registrazione e visualizzazione dei dati).
- *Alarm* (sezione dedicata alla visualizzazione degli allarmi).
- *Overview* (sezione di visione generale dell’impianto) visibile in Figura 2.25.

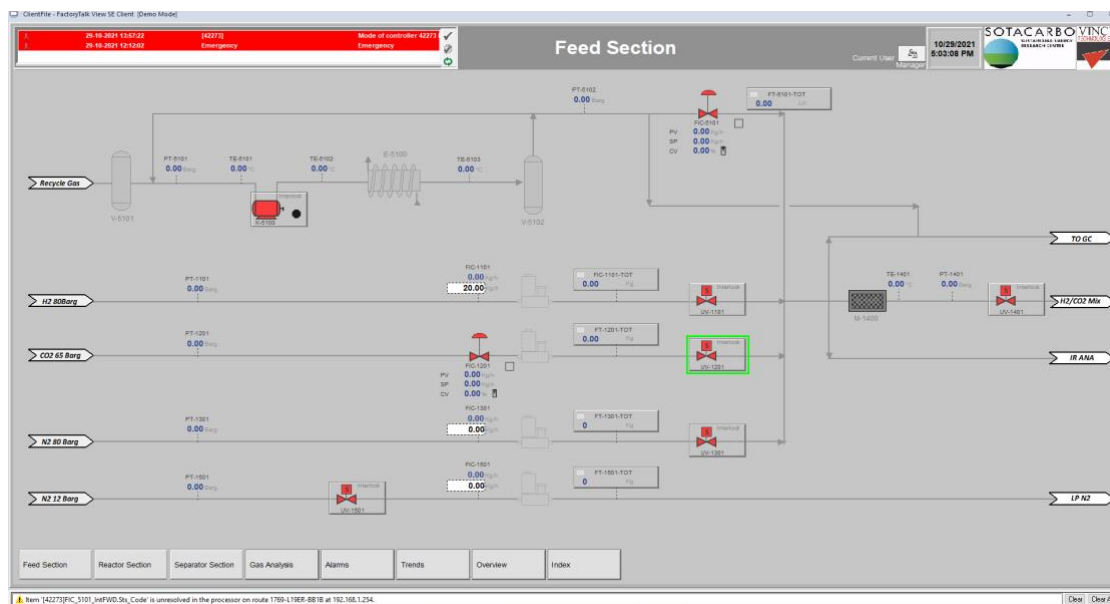


Figura 2.24. Sinottico della sezione di alimentazione.

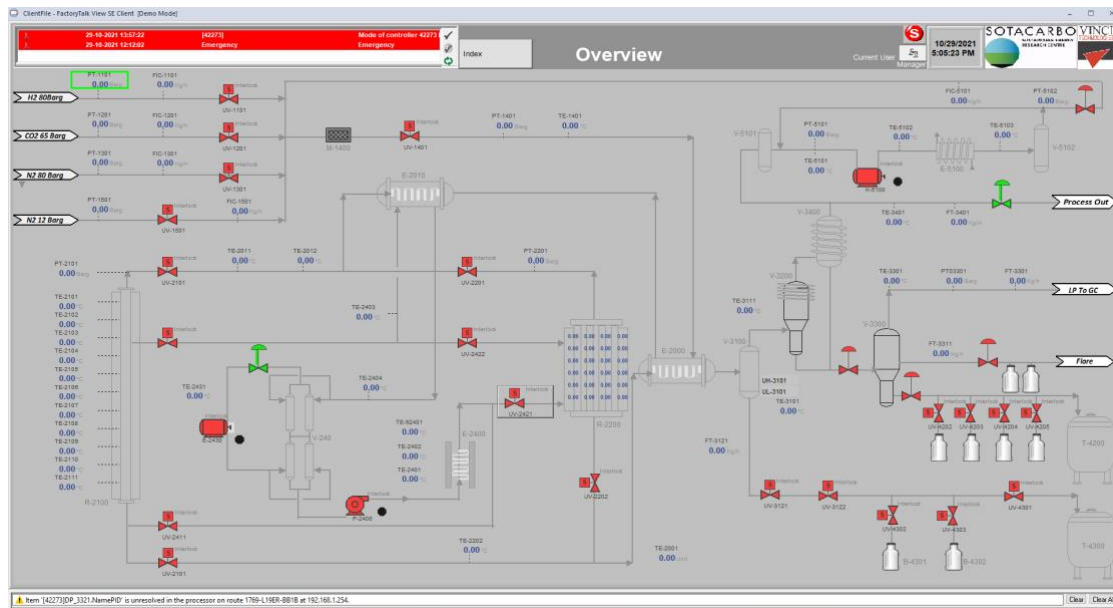


Figura 2.25. Sinottico generale dell'impianto.

Ogni pagina grafica consente di agire sull'impianto a livello "operatore", con la modifica dei principali parametri operativi del processo.

Nello specifico, sarà possibile:

- Impostare i set point di temperatura, pressione e portata dei singoli componenti.
- Accendere o spegnere le apparecchiature elettriche (motori, pompe, etc...).
- Visualizzare, registrare ed esportare i dati provenienti dai sensori presenti sul campo.
- Visionare, in tempo reale, eventuali anomalie grazie alla visualizzazione di appositi allarmi.

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 visibile in figura Figura 2.26.

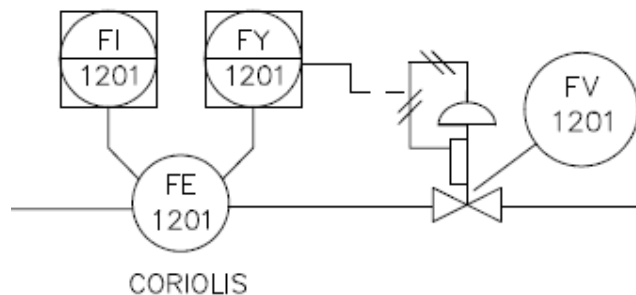


Figura 2.26. Loop di controllo della CO₂ nell'impianto P2G/L.

Portata di 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 visibile in Figura 2.27.

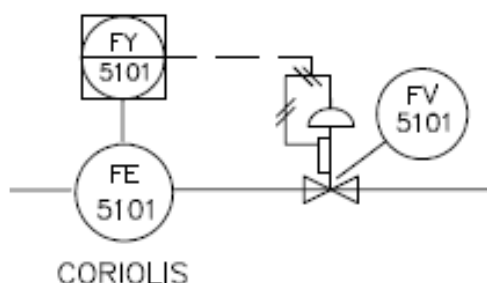


Figura 2.27. Loop di controllo della portata di ricircolo

Temperatura in ingresso ai reattori

Il gas proveniente dal mixer attraversa lo scambiatore di calore E-2010 (visibile in Figura 2.28) 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.

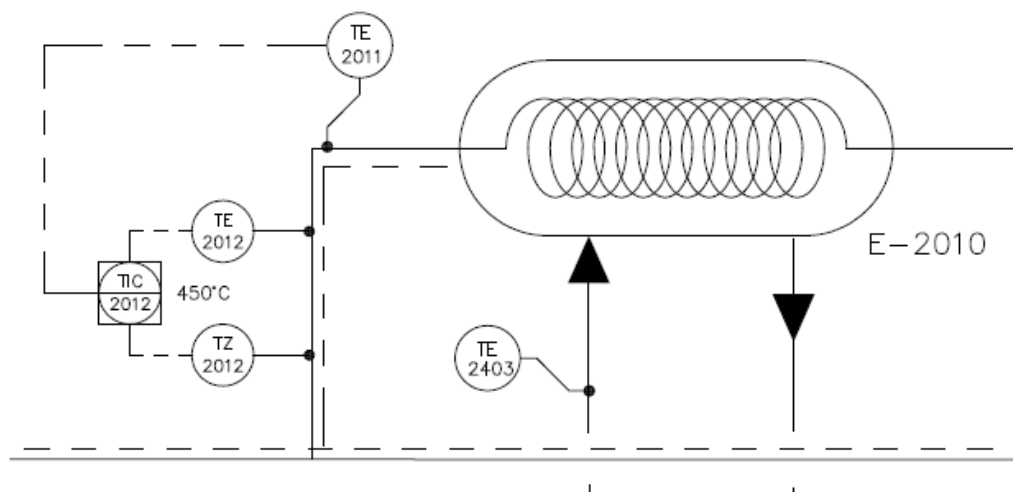


Figura 2.28. Loop di controllo della temperatura in uscita dal riscaldatore E-2010

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 il calore di evaporazione dell'olio). Il riscaldatore E-2400 (visibile in Figura 2.29) 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).

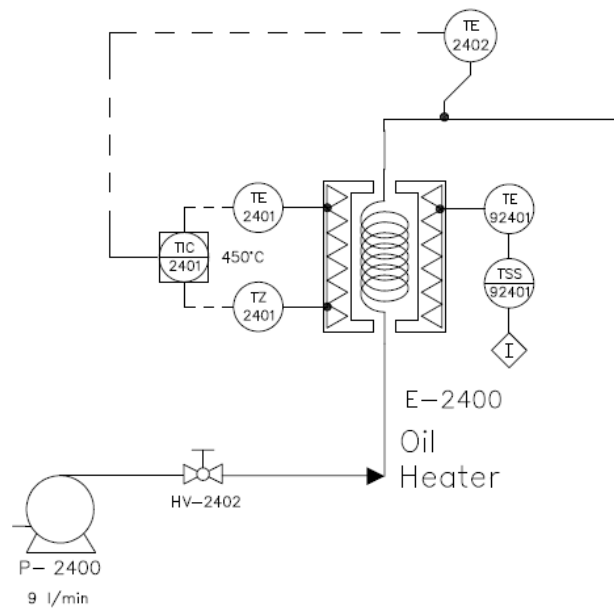


Figura 2.29. Loop di controllo del riscaldatore dell'olio diatermico E-2400

Temperatura in uscita dal reattore

Il gas uscente dal reattore attraversa uno scambiatore di calore (E-2000, visibile Figura 2.30) 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.

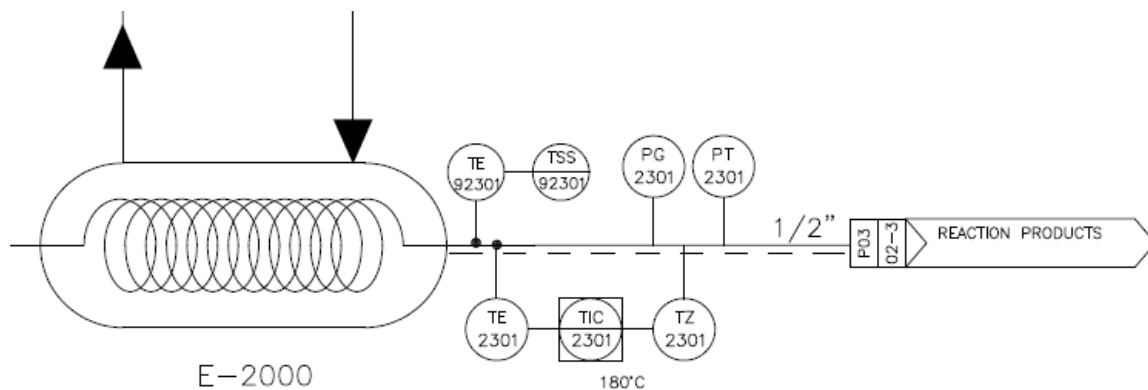


Figura 2.30. Loop di controllo in uscita dal riscaldatore E-2000

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

Pressione di processo

Il gas proveniente dalla sezione di separazione (visibile in Figura 2.31) 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.

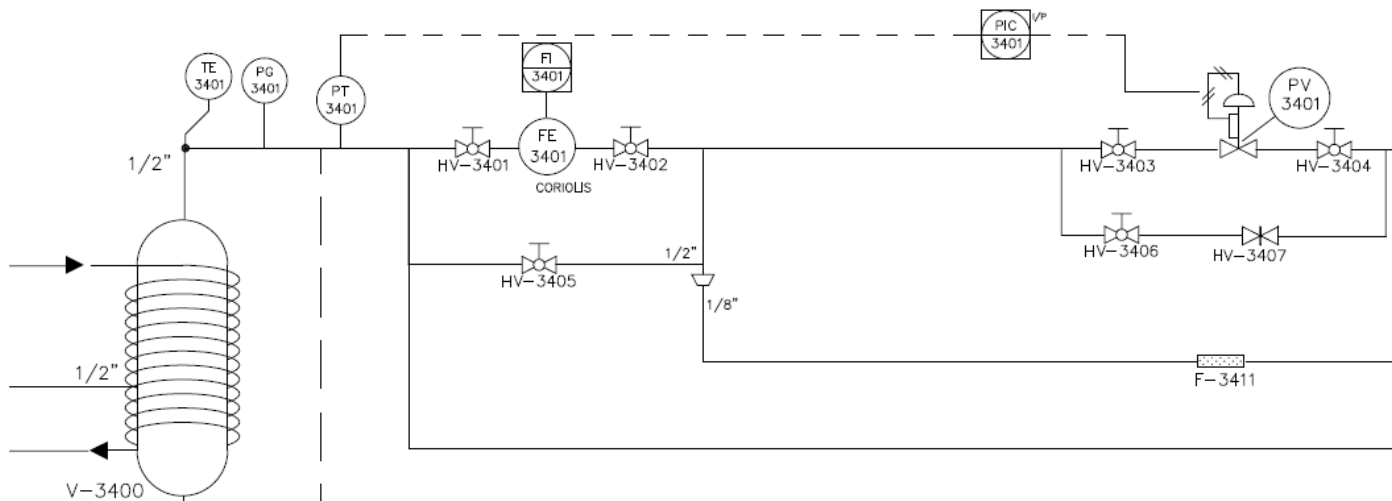


Figura 2.31. Loop di controllo della pressione in uscita dalla sezione di separazione

Livello del separatore ad alta pressione

La quantità di liquido che fluisce nel separatore ad alta pressione (V-3200, visibile in Figura 2.32) 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.

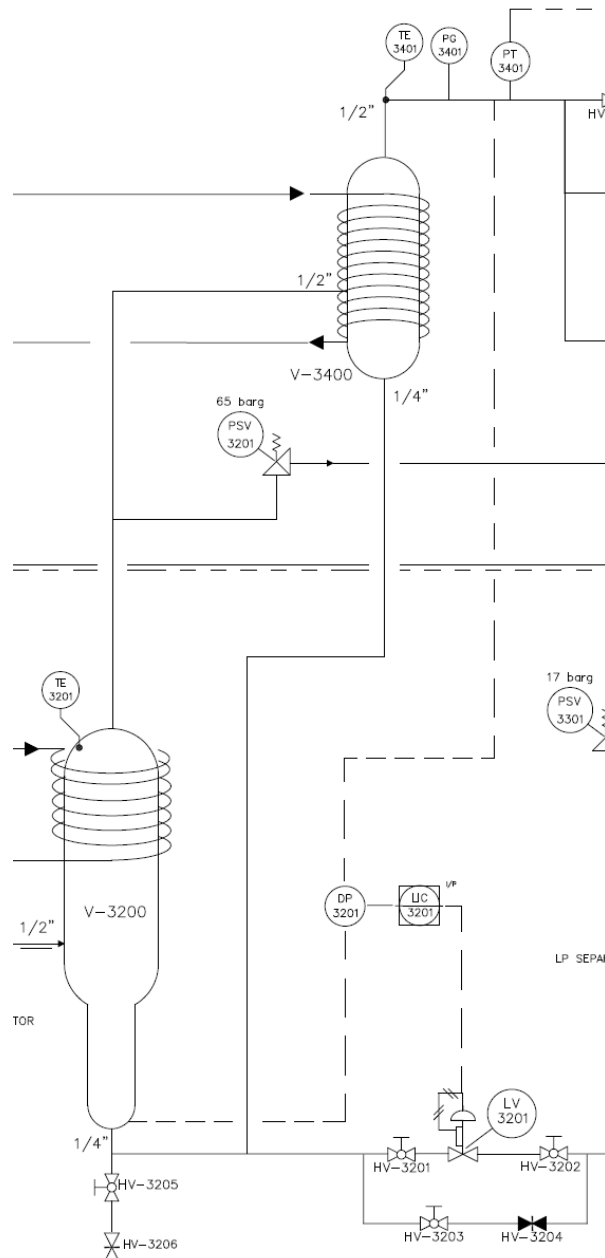


Figura 2.32. Loop di controllo del livello del separatore in alta pressione

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 A-6000 che consente al PLC di regolare la portata di H_2 tramite il FIC-1101 (Figura 2.33).

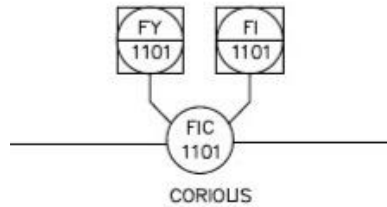


Figura 2.33. Regolatore H₂ dell'impianto P2G/L.

2.9 Progettazione strutturale e meccanica dell'infrastruttura

Ai fini dell'installazione dell'impianto prototipale P2G/L, è stata progettata una nuova struttura per accogliere e sostenere i reattori, le apparecchiature ed il *piping* che lo costituiscono. Questa opera è composta da un castelletto in carpenteria metallica costituito da colonne e travi saldate tra loro in profili tubolari 80x80x4 cm e formata da tre strutture modulari connesse tra di loro tramite giunzioni bullonate (Figura 2.34).

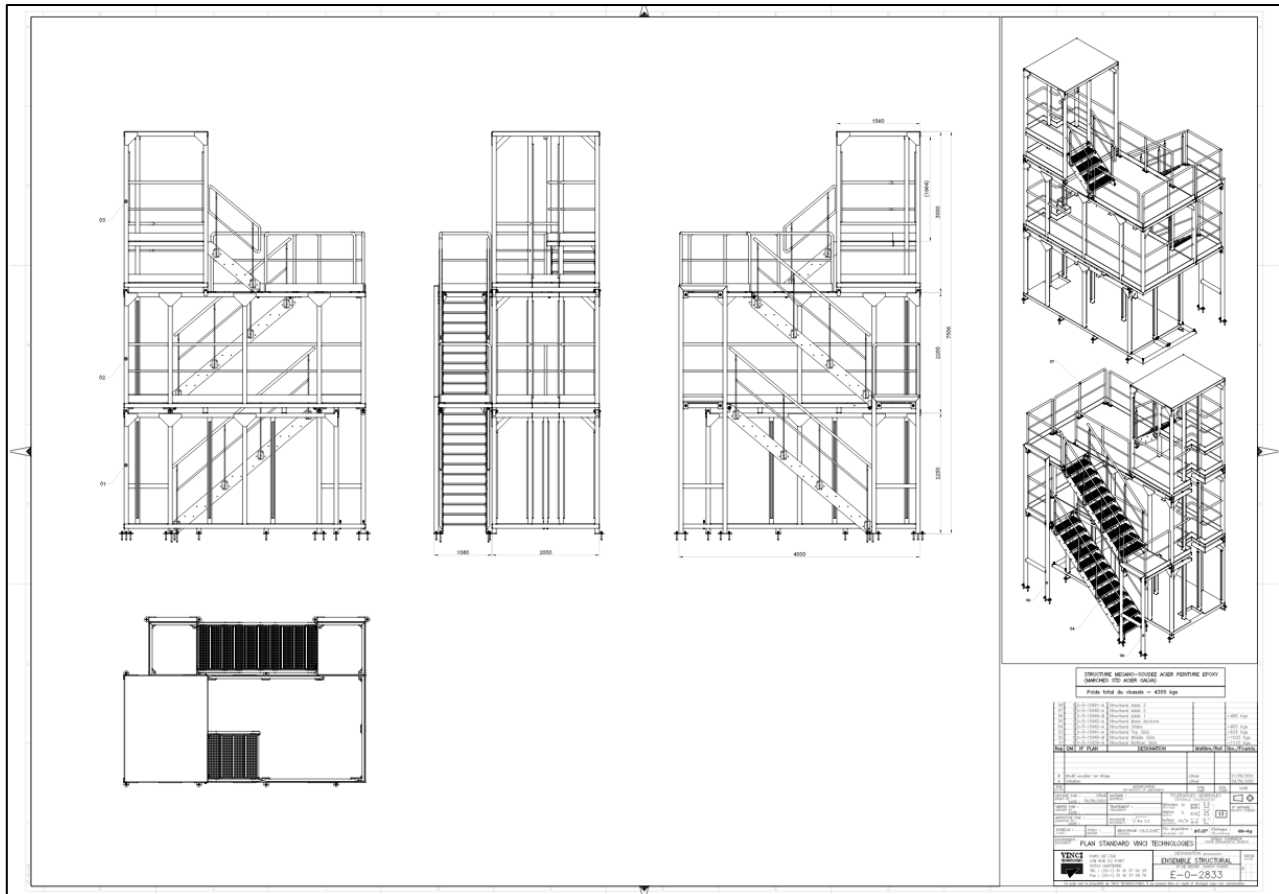


Figura 2.34. Struttura metallica di supporto dell'impianto

La struttura presenta uno sviluppo in pianta di 3x4,5 m ed è destinata esclusivamente ad uso di tipo industriale; pertanto, è stata progettata nel rispetto delle Norme Tecniche per le Costruzioni NTC2018.

Per quanto riguarda la normativa di riferimento, sono state prese in considerazione:

- D.M. LL. PP. 11-03-88: Norme Tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione ed il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione.
- Circolare Ministeriale del 24-07-88, n. 30483/STC.
- Legge 02-02-74 n. 64, art. 1 - D.M. 11-03-88: Norme Tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione ed il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione.
- Norme Tecniche per le Costruzioni - D.M. 17-01-18: Sicurezza e prestazioni attese (cap.2), Azioni sulle costruzioni (cap.3), Costruzioni in calcestruzzo (par.4.1), Costruzioni in legno (par.4.4), Costruzioni in muratura (par.4.5), Progettazione geotecnica (cap.6), Progettazione per azioni sismiche (cap.7), Costruzioni esistenti (cap.8), Riferimenti tecnici (cap.12), EC3.
- Circolare 7 21-01-19 C.S.LL. PP: Istruzioni per l'applicazione dell'Aggiornamento delle N.T.C. di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018.

La procedura progettuale adottata può essere così schematizzata:

- Individuazione della classe d'uso dell'opera e della sua vita utile.
- Definizione delle azioni agenti in condizione statiche e dinamiche attraverso l'individuazione delle condizioni di carico.
- Predisposizione delle combinazioni di carico (con i relativi coefficienti di combinazione) allo SLU, SLE, SLV e SLD.
- Stima dell'inviluppo delle azioni agenti.
- Pre-dimensionamento delle membrature strutturali.
- Applicazioni dei criteri della gerarchia delle resistenze e scelta delle soluzioni strutturali che impediscono rotture fragili.
- Verifica della funzionalità allo stato limite di danno delle strutture progettate.

La garanzia della sicurezza e delle prestazioni è ottenuta a seguito di verifica degli stati limite sopra definiti in funzione dell'utilizzo della struttura, della sua vita nominale e di quanto stabilito dalle norme; in particolare si è verificata:

- La sicurezza nei riguardi degli stati limite ultimi (SLU e SLV) che possono provocare eccessive deformazioni permanenti, crolli parziali o globali, dissesti, che possono compromettere l'incolumità delle persone e/o la perdita di beni, provocare danni ambientali e sociali, mettere fuori servizio l'opera. Per le verifiche sono stati utilizzati i coefficienti parziali relativi alle azioni ed alle resistenze dei materiali in accordo a quanto previsto dalle NTC per i vari tipi di materiale.
- La sicurezza nei riguardi degli stati limite di esercizio (SLE) che possono limitare nell'uso e nella durata l'utilizzo della struttura per le azioni di esercizio. In particolare, di concerto con il committente e coerentemente alle norme tecniche si sono definiti i limiti riportati nel seguito.
- La sicurezza nei riguardi dello stato limite del danno (SLD) causato da azioni sismiche con opportuni periodi di ritorno definiti di concerto al committente ed alle norme vigenti per le costruzioni in zona sismica.
- La robustezza nei confronti di opportune azioni accidentali in modo da evitare danni sproporzionati in caso di incendi, urti, esplosioni, errori umani.

A seguito dei calcoli riguardanti le fasi costruttive intermedie la struttura non risulta sollecitata in maniera più gravosa rispetto alla fase finale. L'analisi strutturale condotta è stata del tipo statica lineare. La ricerca dei parametri di sollecitazione è stata fatta secondo le disposizioni di carico più gravose avvalendosi di codici di calcolo automatico per l'analisi strutturale. Tali codici sono di sicura ed accertata validità e sono stati impiegati conformemente alle loro caratteristiche. In particolare, è stato utilizzato il programma di calcolo SISMICAD 12.13, realizzato dalla società CONCRETE SRL. Si tratta di un programma di calcolo strutturale che, nella sua versione più estesa, è dedicato al progetto e alla verifica degli elementi in cemento armato, acciaio, muratura e legno di opere civili. Il programma utilizza come analizzatore e solutore del modello strutturale un proprio solutore agli elementi finiti tridimensionale. Il programma è sostanzialmente diviso in tre moduli:

- un preprocessore che consente l'introduzione della geometria e dei carichi e crea il file dati di input al solutore;
- il solutore agli elementi finiti;
- un post processore che a soluzione avvenuta elabora i risultati eseguendo il progetto e la verifica delle membrature e producendo i grafici ed i tabulati di output.

A seguito di una revisione dei calcoli strutturali durante la fase di progettazione di dettaglio è stato necessario prevedere un basamento in cemento armato (Figura 2.36) al fine di garantire un maggiore sostegno della struttura rispetto alla platea di fondazione preesistente. Essa sarà caratterizzata da dimensioni di 490x350x20 centimetri e da armatura in rete elettrosaldada ($\varnothing 12$, maglia 200x200 millimetri), sulla quale verranno inghisate le colonne del castelletto mediante l'installazione di opportune piastre metalliche. Questo basamento sarà reso solidale alla preesistente piastra di fondazione attraverso l'inghisaggio di ferri di

armatura con resina bicomponente e l'applicazione di adesivo epossidico bicomponente per riprese di getto tra vecchio e nuovo.

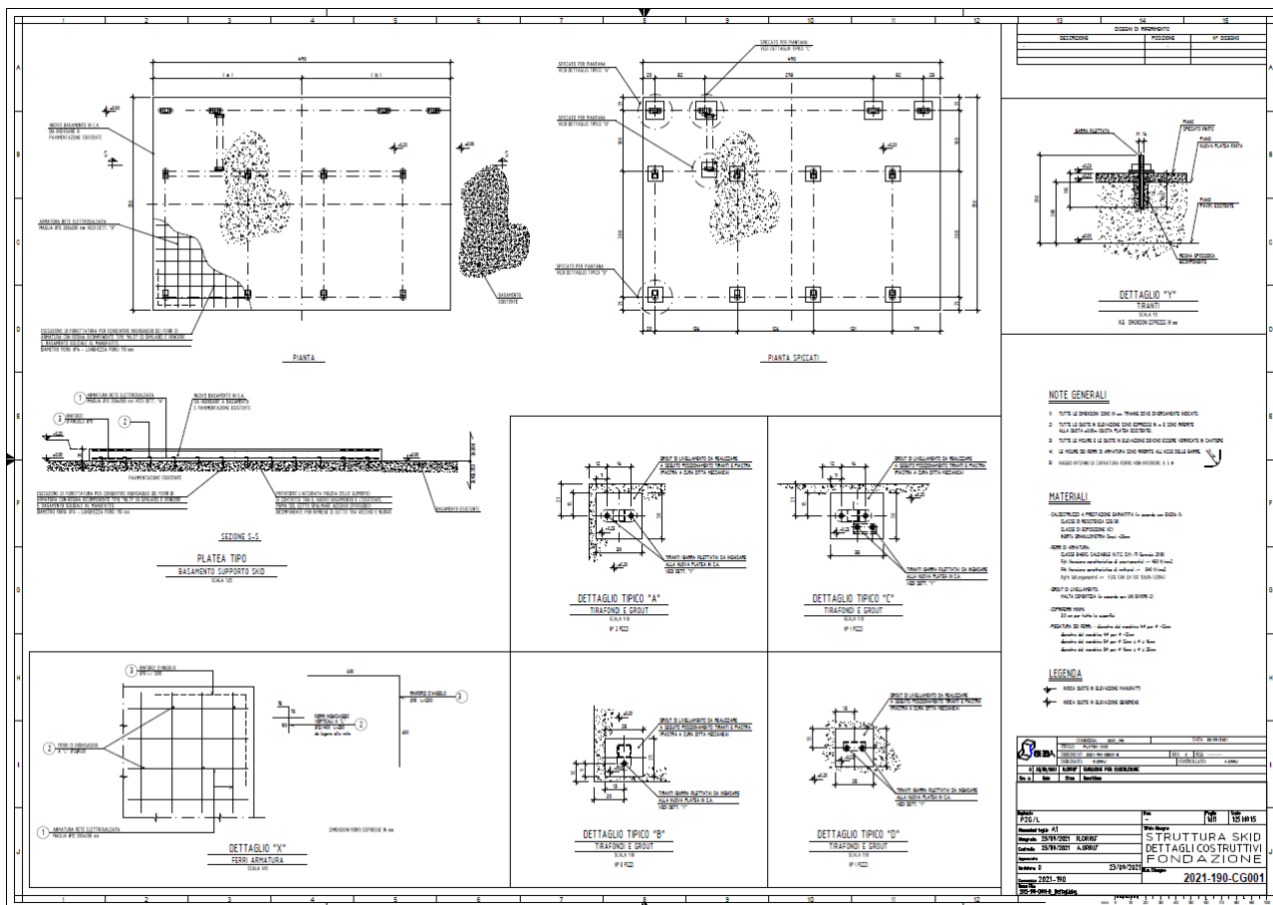


Figura 2.36. Disegno del basamento di rinforzo della platea.

2.10 Impianto elettrico e limiti di batteria

L'impianto P2G/L necessiterà esclusivamente di una alimentazione 400 V trifase a 50 Hz e sarà dotato di un quadro elettrico a bordo *skid* che gestirà nella globalità sia la parte di potenza che quella di controllo. Pertanto, in fase progettuale, è stata predisposta una linea di alimentazione dedicata alla fornitura di energia all'impianto P2G/L in base alle specifiche richieste dalla ditta aggiudicataria e di potenza pari a 35 kW e una alimentazione sotto UPS da 1 kW per la gestione del sistema di controllo e regolazione.

Si riportano, in Tabella 2.20, i carichi elettrici relativi alle apparecchiature presenti sull'impianto P2G/L.

Tabella 2.20. Carichi elettrici dell'impianto P2G/L

Tag	Apparecchiatura	Potenza [W]
TZ-2301	Linea elettro-riscaldare	700
TZ-3101	Linea elettro-riscaldare	800
TZ-3111	Linea elettro-riscaldare	700
TZ-3121	Linea elettro-riscaldare	700
TZ-2012	Linea elettro-riscaldare	800
TZ-2401	Linea elettro-riscaldare	5000
TZ-6001	Linea elettro-riscaldare	1000
GC-4400	Gas Cromatografo	1000
AT-4500	Analizzatore FTIR	1000
P-2400	Pompa dell'olio	550
E-2430	Raffreddatore dell'olio	5000
K-5100	Compressore di ricircolo del gas	11000
E-3000	Chiller	6000
	PLC e ESD (Sotto UPS)	600

In Figura 2.37 è riportato l'interno di un quadro elettrico di potenza (parte sinistra) e di controllo (parte destra) simile a quello progettato per l'impianto P2G/L.



Figura 2.37. Interno del quadro elettrico P2G/L.

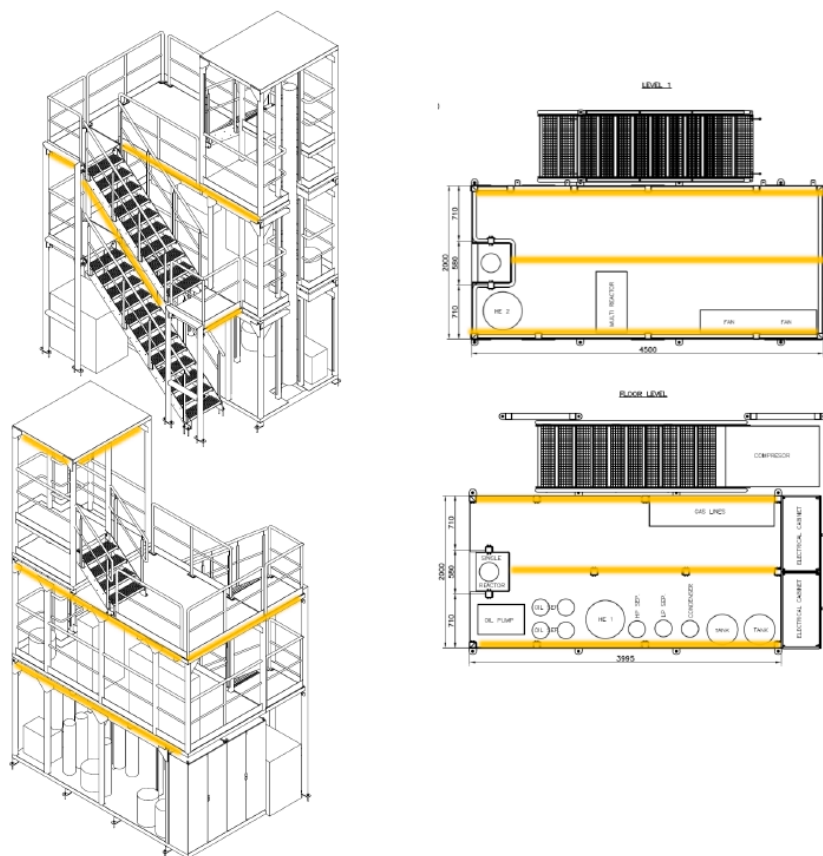


Figura 2.38. Schema del sistema di illuminazione dell'impianto P2G/L.

Per l'impianto è stato progettato un sistema di illuminazione a strisce LED (ATEX) disposto come visibile in Figura 2.38.

Queste luci saranno alimentate a 230 V e resteranno accese qualora la linea a 400 V subisse uno spegnimento accidentale. Inoltre, è stato progettato, come previsto dalla normativa, un sistema di illuminazione di emergenza in caso di spegnimento imprevisto dell'impianto, che dovrà rispettare il limite minimo di 5 lux nelle vie di percorrenza: scale, zone strettamente limitrofe all'impianto, vie di fuga. L'impianto P2G/L è interfacciato con i diversi ausiliari e fluidi in alimentazione attraverso delle connessioni che sono riportate in Tabella 2.21 e

Tabella 2.22.

Tabella 2.21. Limiti di batteria (flussi in ingresso).

Servizio	Connezione	Dimensione	Materiale	P&ID	Parametri
Aria	Doppia Ferula	1/4 in	SS 316	P01-F3	10 bar max
Idrogeno	Doppia Ferula	3/8 in	SS 316	P01-F2	80 bar max 0.04÷3 kg/h
CO ₂	Doppia Ferula	3/8 in	SS 316	P01-F2	65 bar max 0.3÷15 kg/h
Azoto	Doppia Ferula	3/8 in	SS 316	P01-F2	80 bar max 0.1÷ 4 Nm ³ /h
Azoto (Servizio)	Doppia Ferula	1/4 in	SS 316	P01-F1	15 bar max 6÷300 NI/h
Gas Carrier GC	Doppia Ferula	1/4 in	SS 316	P06-F2	-
Acqua refrigerata	Doppia Ferula	3/8 in	SS 316	P05-F2	4 bar max 4 m ³ /h

Tabella 2.22. Limiti di batteria (flussi in uscita).

Servizio	Connessione	Dimensione	Materiale	P&ID	Parametri
Acqua refrigerata	Doppia ferula	3/8 in	SS 316	P05-F1	4 bar max 4 m ³ /h
Vent alla torcia	Flangia	2 in	SS 317	P07-A3	0.1÷30 Nm ³ /h
Valvola di sicurezza	Flangia	1 in	SS 318	P07-A3	0.1÷30 Nm ³ /h
Vent dagli analizzatori	Tubo	1/8 in	SS 319	P06-A3	0.1÷1 l/h



Figura 2.39. Esempio di connessione a doppia ferula.

Il sistema a doppia ferula (Figura 2.39) garantisce una tenuta affidabile e viene utilizzata per i fluidi di processo.



Figura 2.40. Esempio di flangia.

In Figura 2.40 è riportato un esempio di flangia, con la quale sarà realizzata la connessione fra l'impianto P2G/L e la torcia dell'impianto pilota Sotacarbo, nonché la connessione della valvola di sicurezza in alta pressione.

3 Cronoprogramma per la realizzazione dell'impianto sperimentale P2G/L

Attività (mesi)	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
Realizzazione impianto prototipale Power-to-Gas e Power-to-Liquids (P2G/L)	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Predisposizione area installazione impianto P2G/L con modifica box compressori					■	■			
Adeguamento impianto elettrico esistente						■	■		
Realizzazione sistema di alimentazione gas a servizio dell'impianto P2G/L					■	■	■	■	■
Basamento ancoraggio della struttura dell'impianto P2G/L								■	■
Piping di collegamento impianto P2G/L e impianti e ausiliari Sotacarbo									■

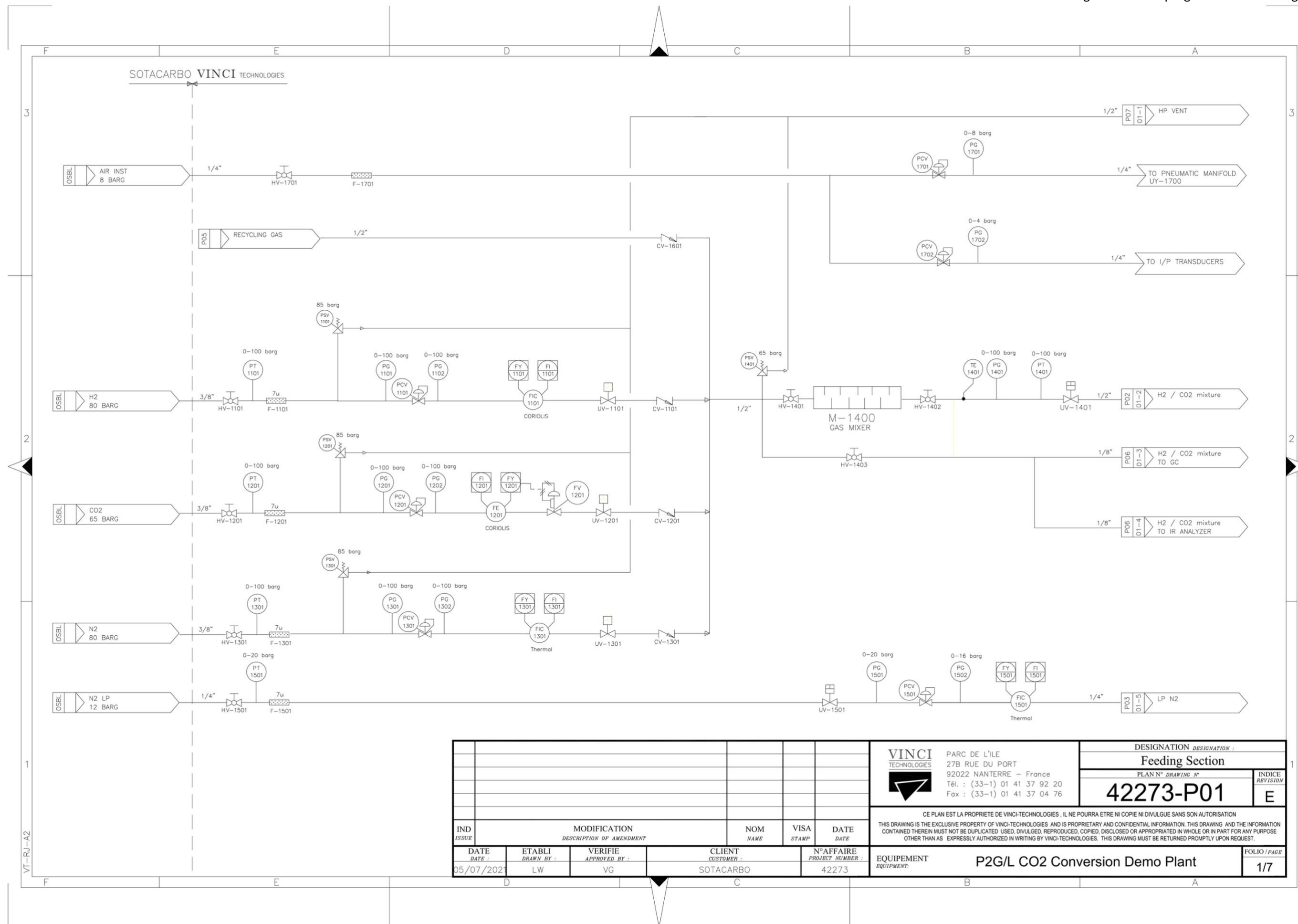
4 Conclusioni

Nel presente rapporto tecnico si riporta la progettazione di dettaglio dell'impianto sperimentale P2G/L per lo sviluppo dei 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 produzione elettrica da fonte rinnovabile.

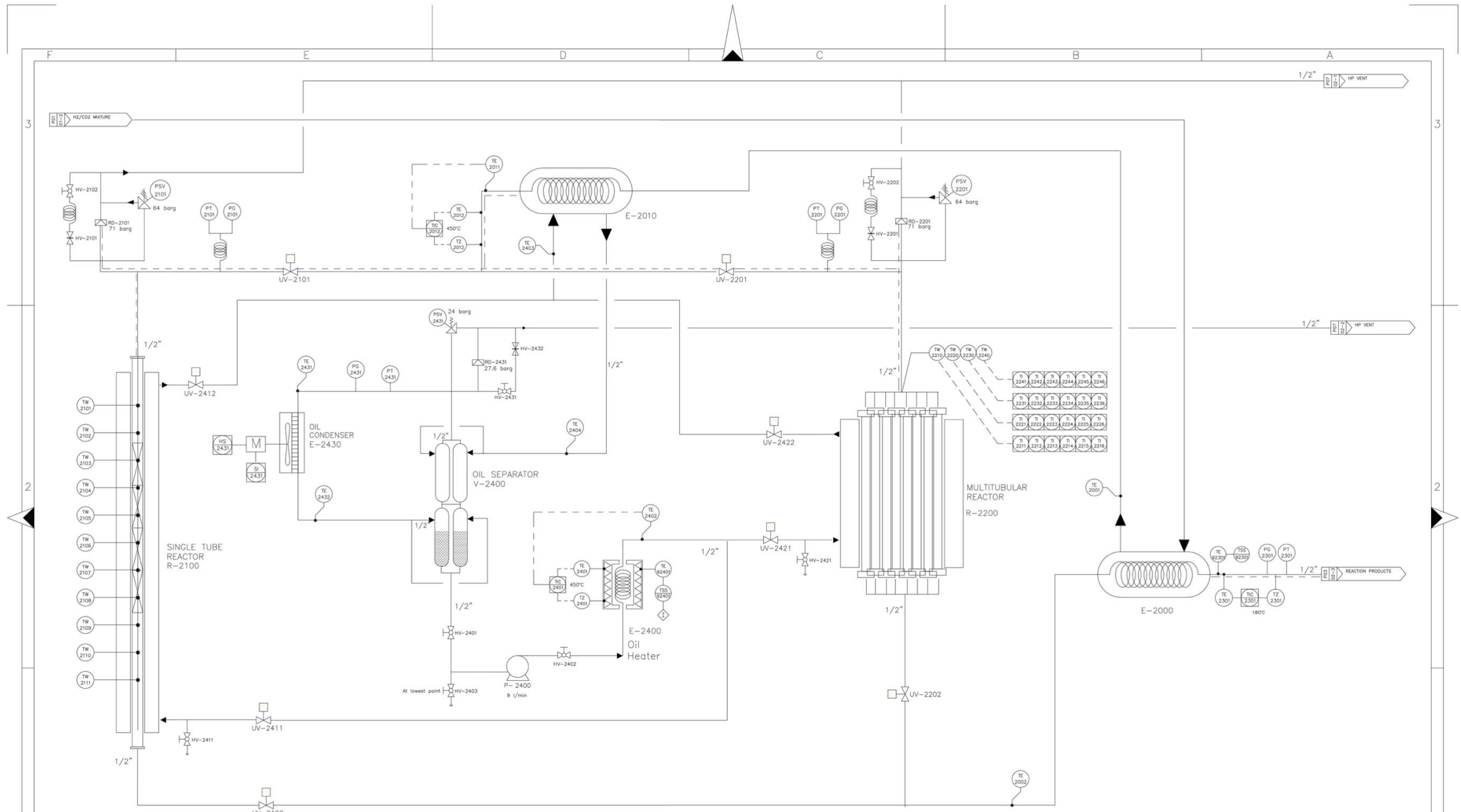
In particolare, sono stati ridefiniti il *Process Flow Diagram* (PFD) e i *Piping & Instrumentation Diagrams* (P&ID) delle diverse sezioni. Il progetto è stato completato con la progettazione strutturale e meccanica, l'automazione del processo e i modelli 2D e 3D dell'infrastruttura sperimentale.

L'impianto P2G/L è stato progettato per una produzione massima di 5 kg/h (120 kg/giorno) di prodotto finale. In particolare, è stata selezionata una configurazione estremamente flessibile (dotata di 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. Entrambi i reattori possono essere utilizzati per tutti i processi di interesse poiché progettati sulla base delle condizioni operative individuate sia per la sintesi di metanolo/DME che per il processo di metanazione (60 barg @ 350 °C e 30 barg @ 450 °C). La sezione di alimentazione è costituita da un impianto di decompressione, distribuzione e regolazione di anidride carbonica, idrogeno e azoto. Per quanto riguarda il controllo della temperatura, l'impianto è dotato di un sistema innovativo, basato su un design a doppia camicia, che consente una regolazione efficiente della temperatura anche con reazioni particolarmente esotermiche. La miscela gassosa, prima di entrare nel reattore, viene preriscaldata attraverso uno scambiatore di calore che scambia a sua volta il calore con il fluido 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 scegliere tra il reattore monotubolare e il multitubolare. Il reattore monotubolare ha lunghezza pari a circa 7 metri, mentre il reattore multitubolare è costituito da 12 reattori di lunghezza pari a 1,3 metri. 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 e un separatore gas-liquido a bassa pressione per dividere la fase gassosa dalle due fasi condensate (acquosa e organica). 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 progettazione comprende inoltre l'individuazione della strumentazione necessaria per il monitoraggio, controllo e analisi del processo. In questa fase del progetto, è stato predisposto il BOM che riporta in modo esaustivo il dettaglio di tutti gli strumenti, le apparecchiature e i carichi elettrici che costituiranno l'impianto P2G/L. Oltre alle principali specifiche operative in termini di temperature e pressioni di esercizio e di progetto, sono riportati modelli e casa costruttrice, tipologia di materiale e di connessione sia meccanica che elettrica, oltre alla tipologia di connessione analogica e digitale di ogni singolo strumento.

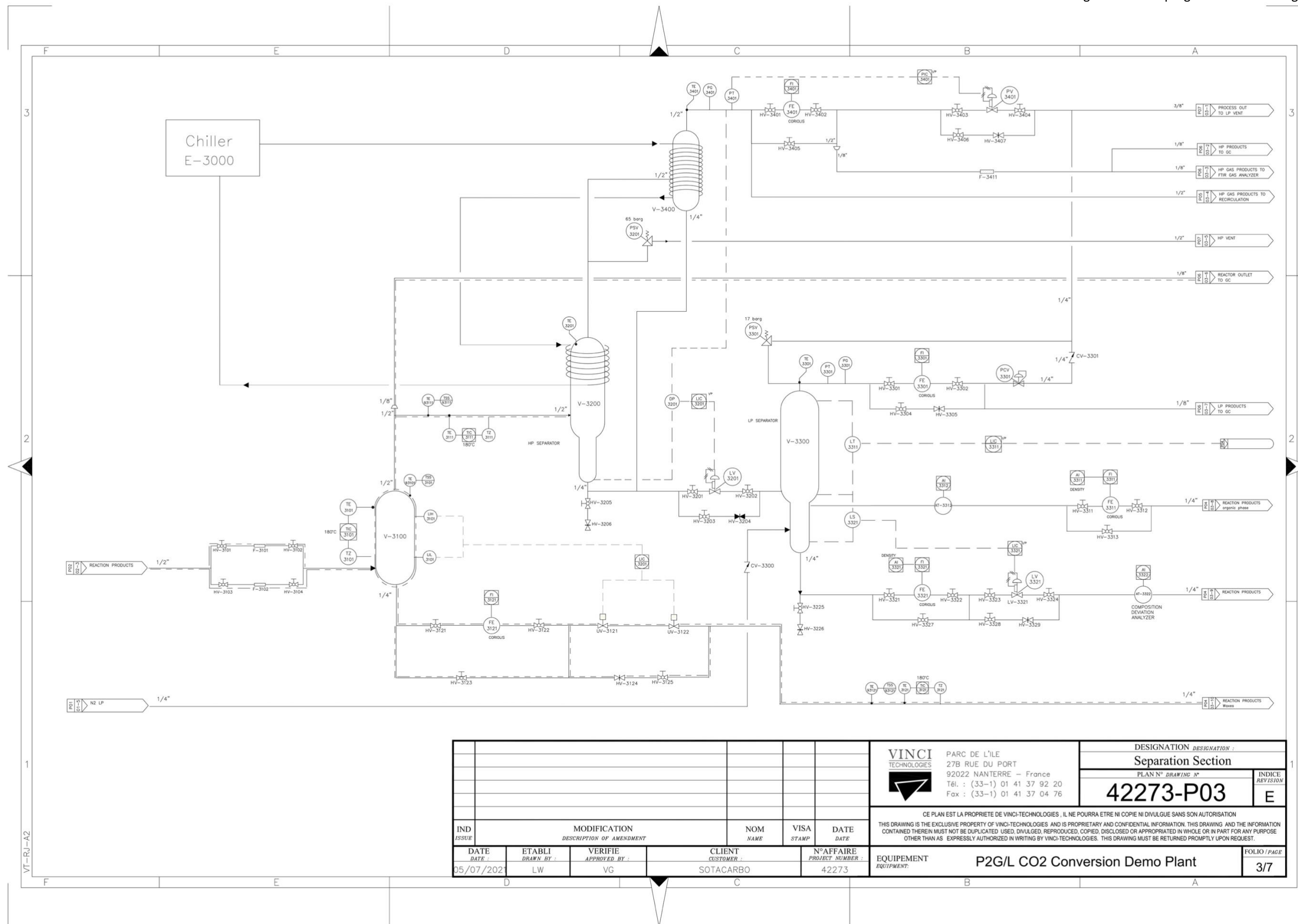
Infine, è stato definito il diagramma di *Gantt* per la realizzazione dell'impianto P2G/L.



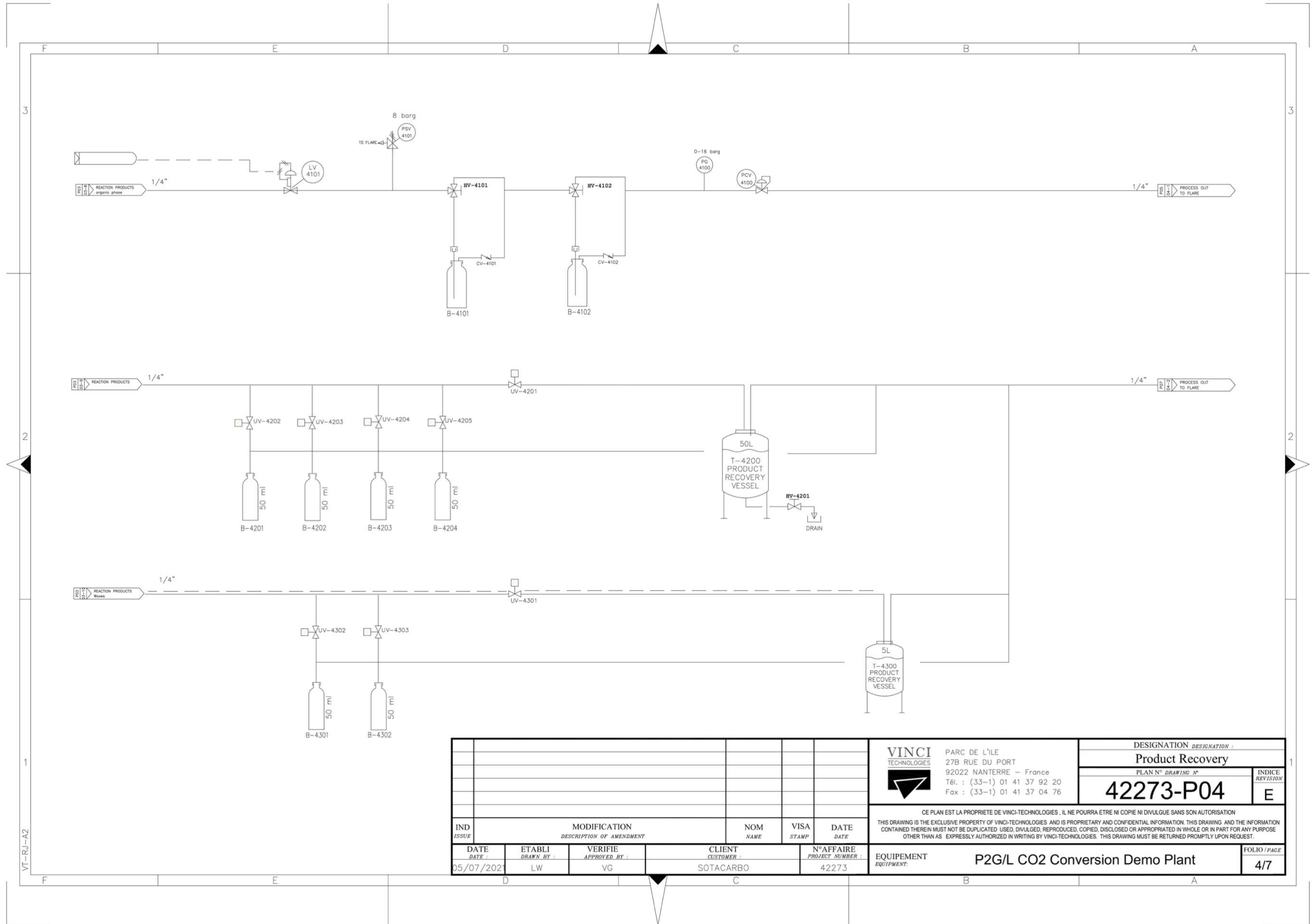
				VINCI TECHNOLOGIES PARC DE L'ILE 27B RUE DU PORT 92022 NANTERRE - France Tél. : (33-1) 01 41 37 92 20 Fax : (33-1) 01 41 37 04 76		DESIGNATION : Feeding Section PLAN N° DRAWING N° 42273-P01		INDICE E
CE PLAN EST LA PROPRIETE DE VINCI-TECHNOLOGIES, IL NE POURRA ETRE NI COPIE NI DIVULGUE SANS SON AUTORISATION THIS DRAWING IS THE EXCLUSIVE PROPERTY OF VINCI-TECHNOLOGIES AND IS PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL INFORMATION. THIS DRAWING AND THE INFORMATION CONTAINED THEREIN MUST NOT BE DUPLICATED, USED, DIVULGED, REPRODUCED, COPIED, DISCLOSED OR APPROPRIATED IN WHOLE OR IN PART FOR ANY PURPOSE OTHER THAN AS EXPRESSLY AUTHORIZED IN WRITING BY VINCI-TECHNOLOGIES. THIS DRAWING MUST BE RETURNED PROMPTLY UPON REQUEST.								
IND	MODIFICATION			NOM	VISA	DATE	EQUIPEMENT	
ISSUE	DESCRIPTION OF AMENDMENT			NAME	STAMP	DATE	P2G/L CO2 Conversion Demo Plant	
DATE	ETABLI	VERIFIE	CLIENT	N° AFFAIRE	EQUIPEMENT			FOLIO / PAGE
05/07/2021	LW	VG	SOTACARBO	42273	P2G/L CO2 Conversion Demo Plant			1/7



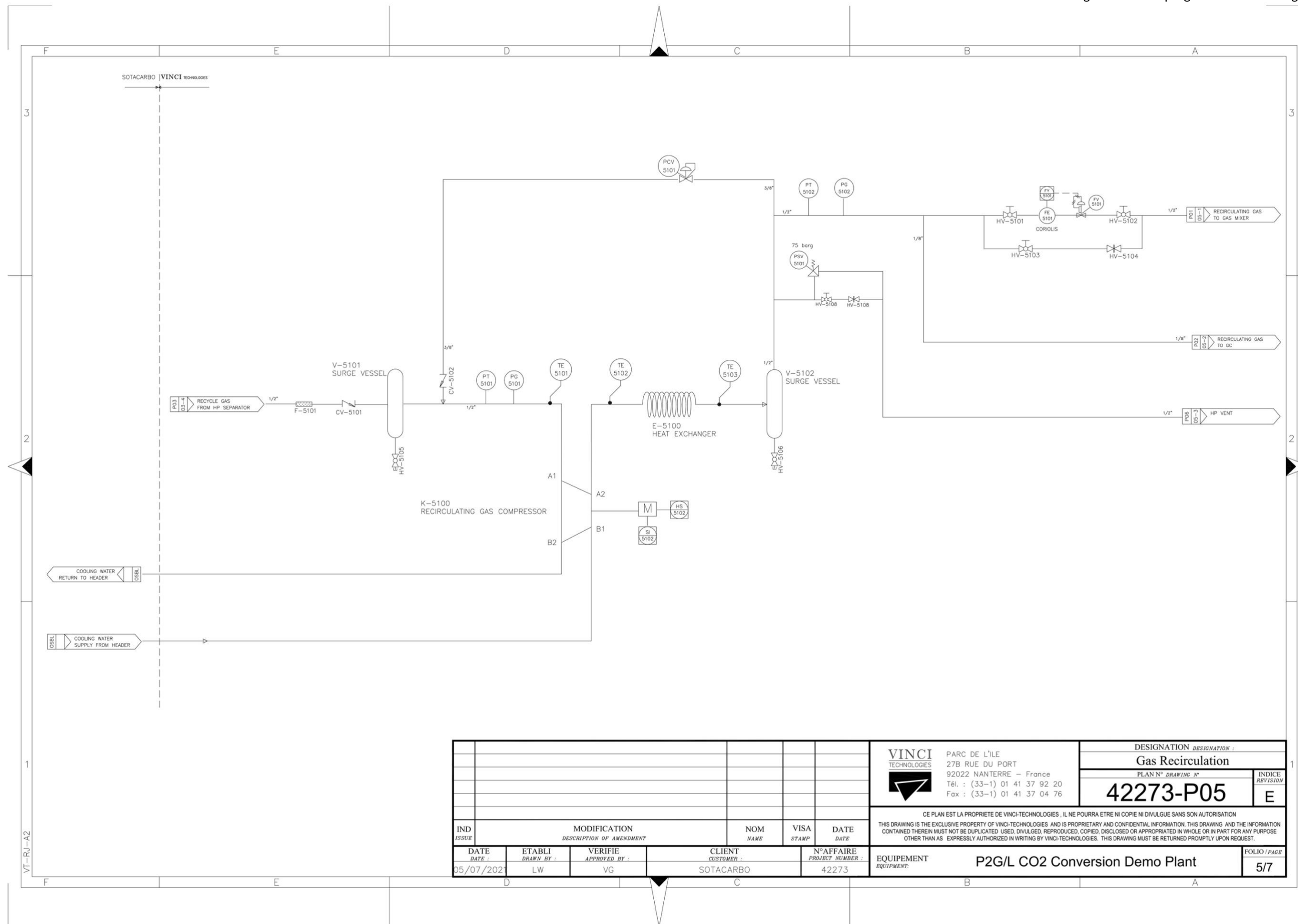
				VINCI TECHNOLOGIES PARC DE L'ILE 27B RUE DU PORT 92022 NANTERRE - France Tél. : (33-1) 01 41 37 92 20 Fax : (33-1) 01 41 37 04 76		DESIGNATION : Reaction	
				PLAN N° DRAWING N° 42273-P02		INDICE REVISION E	
CE PLAN EST LA PROPRIETE DE VINCI-TECHNOLOGIES. IL NE POURRA ETRE NI COPIE NI DIVULGUE SANS SON AUTORISATION THIS DRAWING IS THE EXCLUSIVE PROPERTY OF VINCI-TECHNOLOGIES AND IS PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL INFORMATION. THIS DRAWING AND THE INFORMATION CONTAINED THEREIN MUST NOT BE DUPLICATED, USED, DIVULGED, REPRODUCED, COPIED, DISCLOSED OR APPROPRIATED IN WHOLE OR IN PART FOR ANY PURPOSE OTHER THAN AS EXPRESSLY AUTHORIZED IN WRITING BY VINCI-TECHNOLOGIES. THIS DRAWING MUST BE RETURNED PROMPTLY UPON REQUEST.							
IND	MODIFICATION			NOM	VISA	DATE	
ISSUE	DESCRIPTION OF AMENDMENT			NAME	STAMP	DATE	
DATE	ETABLI	VERIFIE	CLIENT	N° AFFAIRE		EQUIPEMENT	
DATE :	DRAWN BY :	APPROVED BY :	CUSTOMER :	PROJECT NUMBER :		EQUIPMENT :	
05/07/2022	LW	VG	SOTACARBO	42273		P2G/L CO2 Conversion Demo Plant	
							FOLIO / PAGE
							2/7



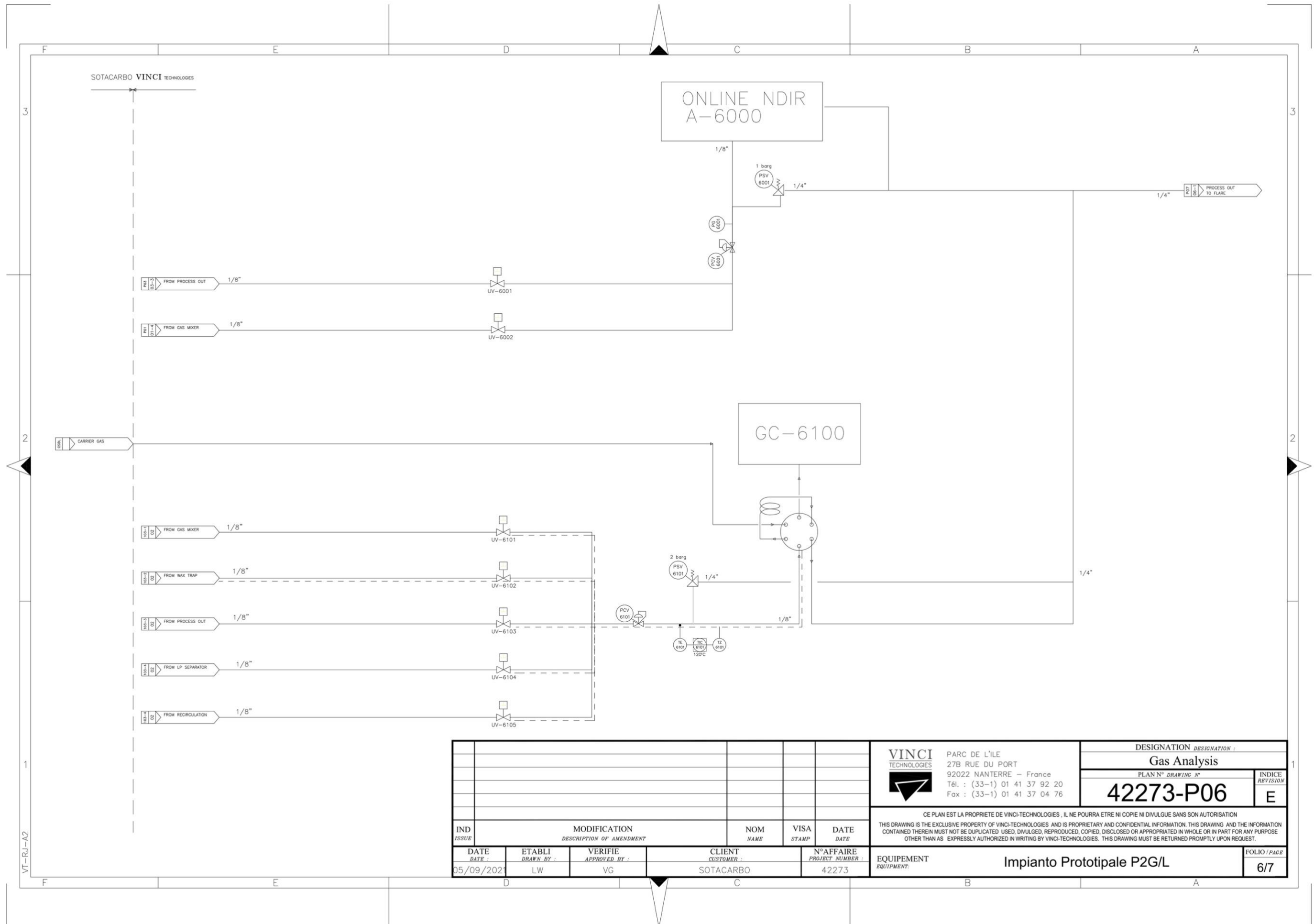
					VINCI TECHNOLOGIES PARC DE L'ILE 27B RUE DU PORT 92022 NANTERRE - France Tél. : (33-1) 01 41 37 92 20 Fax : (33-1) 01 41 37 04 76		DESIGNATION : Separation Section PLAN N° DRAWING N° 42273-P03		INDICE E	
CE PLAN EST LA PROPRIETE DE VINCI-TECHNOLOGIES, IL NE POURRA ETRE NI COPIE NI DIVULGUE SANS SON AUTORISATION THIS DRAWING IS THE EXCLUSIVE PROPERTY OF VINCI-TECHNOLOGIES AND IS PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL INFORMATION. THIS DRAWING AND THE INFORMATION CONTAINED THEREIN MUST NOT BE DUPLICATED, USED, DIVULGED, REPRODUCED, COPIED, DISCLOSED OR APPROPRIATED IN WHOLE OR IN PART FOR ANY PURPOSE OTHER THAN AS EXPRESSLY AUTHORIZED IN WRITING BY VINCI-TECHNOLOGIES. THIS DRAWING MUST BE RETURNED PROMPTLY UPON REQUEST.										
IND	MODIFICATION			NOM	VISA	DATE	EQUIPEMENT			FOLIO / PAGE
ISSUE	DESCRIPTION OF AMENDMENT			NAME	STAMP	DATE	CUSTOMER			PAGE
DATE	ETABLI	VERIFIE	CLIENT	N° AFFAIRE		EQUIPEMENT				FOLIO / PAGE
DATE :	DRAWN BY :	APPROVED BY :	CUSTOMER :	PROJECT NUMBER :		EQUIPMENT				PAGE
05/07/2021	LW	VG	SOTACARBO	42273		P2G/L CO2 Conversion Demo Plant				3/7



				VINCI TECHNOLOGIES PARC DE L'ILE 27B RUE DU PORT 92022 NANTERRE - France Tél. : (33-1) 01 41 37 92 20 Fax : (33-1) 01 41 37 04 76		DESIGNATION : Product Recovery	
				PLAN N° DRAWING N° 42273-P04		INDICE REVISION E	
CE PLAN EST LA PROPRIETE DE VINCI-TECHNOLOGIES . IL NE POURRA ETRE NI COPIE NI DIVULGUE SANS SON AUTORISATION THIS DRAWING IS THE EXCLUSIVE PROPERTY OF VINCI-TECHNOLOGIES AND IS PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL INFORMATION. THIS DRAWING AND THE INFORMATION CONTAINED THEREIN MUST NOT BE DUPLICATED, USED, DIVULGED, REPRODUCED, COPIED, DISCLOSED OR APPROPRIATED IN WHOLE OR IN PART FOR ANY PURPOSE OTHER THAN AS EXPRESSLY AUTHORIZED IN WRITING BY VINCI-TECHNOLOGIES. THIS DRAWING MUST BE RETURNED PROMPTLY UPON REQUEST.							
IND	MODIFICATION			NOM	VISA	DATE	
ISSUE	DESCRIPTION OF AMENDMENT			NAME	STAMP	DATE	
DATE	ETABLI	VERIFIE	CLIENT	N° AFFAIRE	EQUIPEMENT		
DATE :	DRAWN BY :	APPROVED BY :	CUSTOMER :	PROJECT NUMBER :	EQUIPMENT :		
05/07/2022	LW	VG	SOTACARBO	42273	P2G/L CO2 Conversion Demo Plant		
							FOLIO / PAGE
							4/7

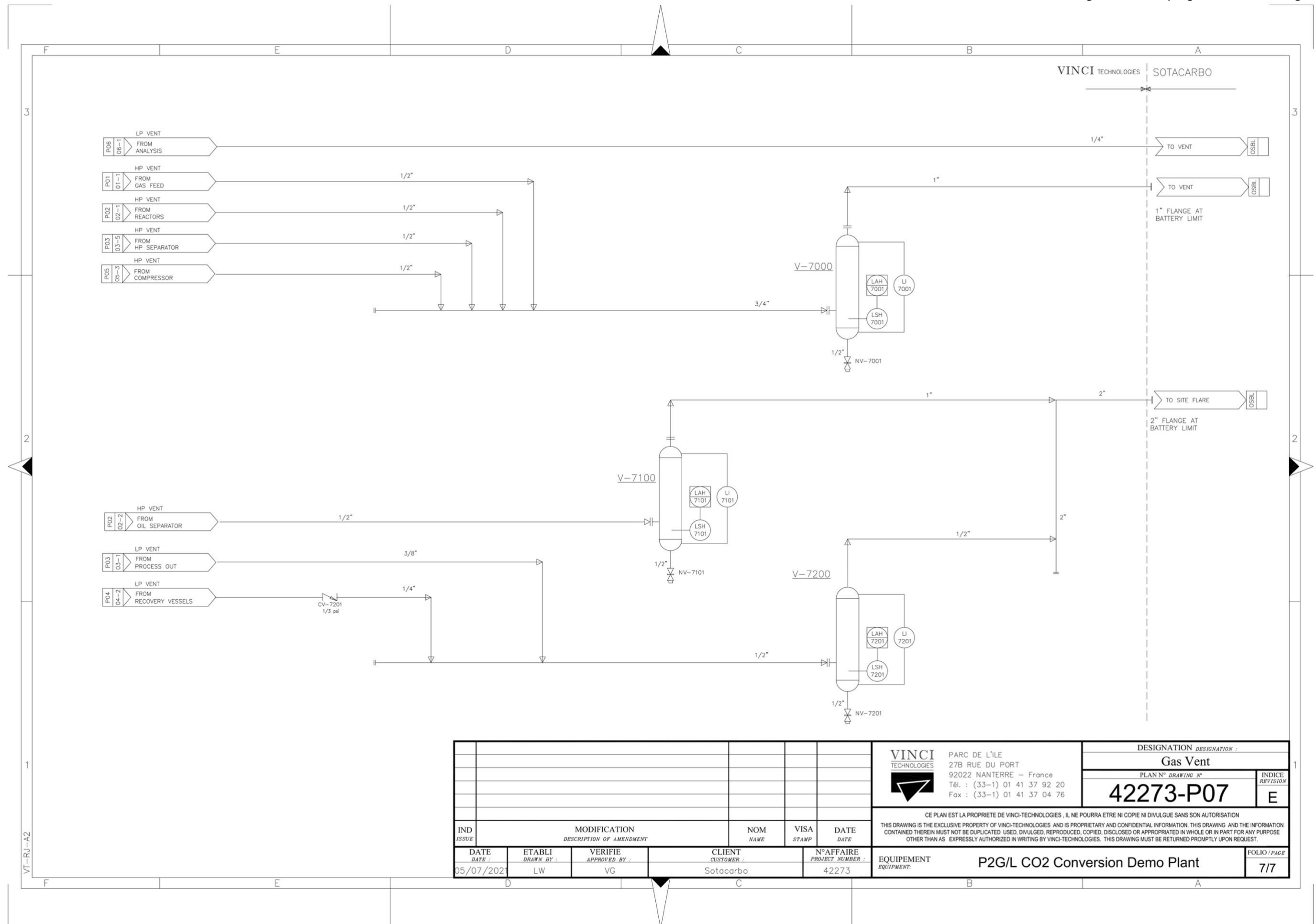


				VINCI TECHNOLOGIES PARC DE L'ILE 27B RUE DU PORT 92022 NANTERRE - France Tél. : (33-1) 01 41 37 92 20 Fax : (33-1) 01 41 37 04 76		DESIGNATION : Gas Recirculation PLAN N° DRAWING N° 42273-P05		INDICE REVISION E
CE PLAN EST LA PROPRIETE DE VINCI-TECHNOLOGIES, IL NE POURRA ETRE NI COPIE NI DIVULGUE SANS SON AUTORISATION THIS DRAWING IS THE EXCLUSIVE PROPERTY OF VINCI-TECHNOLOGIES AND IS PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL INFORMATION. THIS DRAWING AND THE INFORMATION CONTAINED THEREIN MUST NOT BE DUPLICATED, USED, DIVULGED, REPRODUCED, COPIED, DISCLOSED OR APPROPRIATED IN WHOLE OR IN PART FOR ANY PURPOSE OTHER THAN AS EXPRESSLY AUTHORIZED IN WRITING BY VINCI-TECHNOLOGIES. THIS DRAWING MUST BE RETURNED PROMPTLY UPON REQUEST.								
IND	MODIFICATION			NOM	VISA	DATE		
ISSUE	DESCRIPTION OF AMENDMENT			NAME	STAMP	DATE		
DATE	ETABLI	VERIFIE	CLIENT	N° AFFAIRE	EQUIPEMENT			FOLIO / PAGE
05/07/2021	LW	VG	SOTACARBO	42273	P2G/L CO2 Conversion Demo Plant			5/7

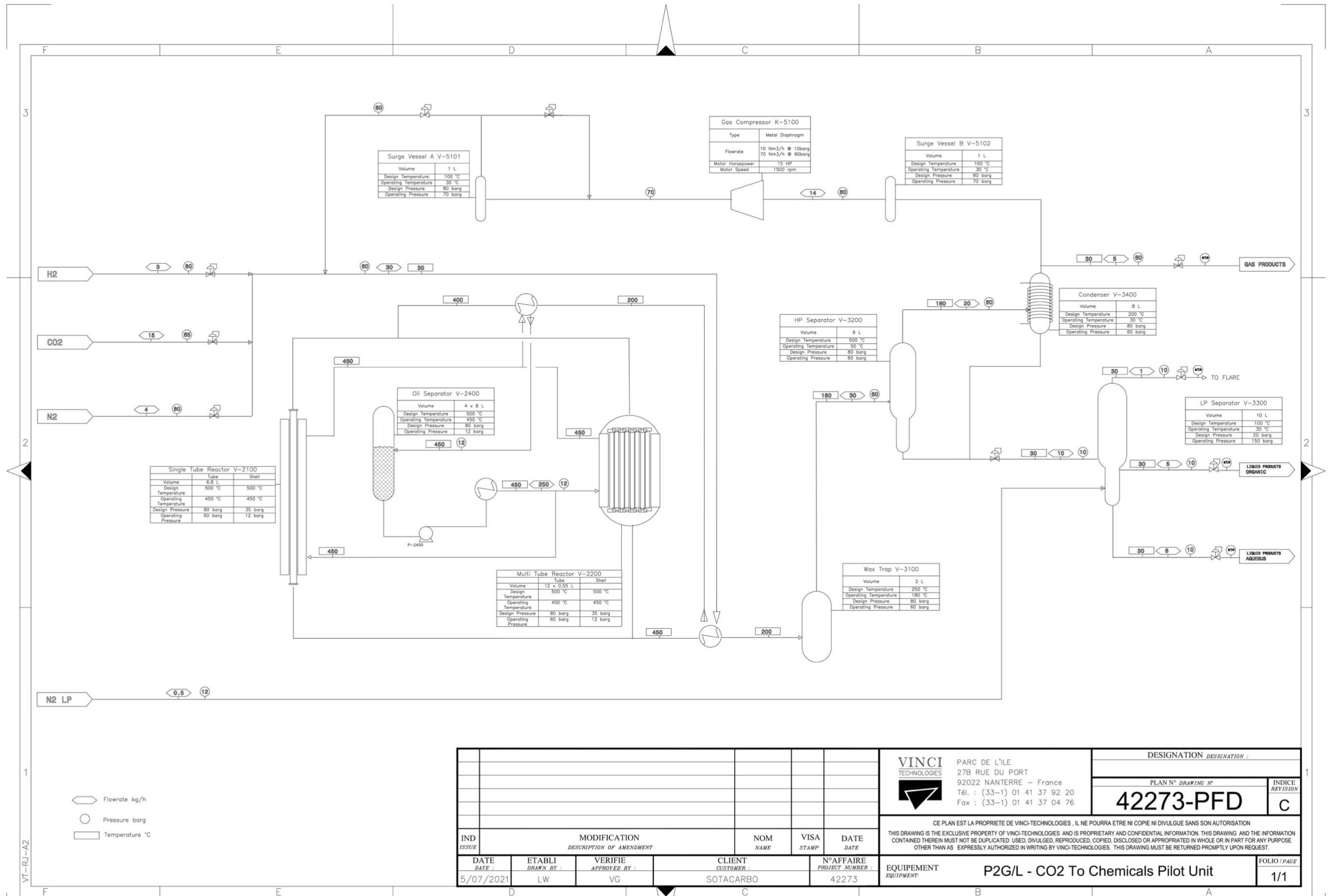


				PARC DE L'ILE 27B RUE DU PORT 92022 NANTERRE - France Tél. : (33-1) 01 41 37 92 20 Fax : (33-1) 01 41 37 04 76		DESIGNATION : Gas Analysis PLAN N° DRAWING N° 42273-P06		INDICE REVISION E
CE PLAN EST LA PROPRIETE DE VINCI-TECHNOLOGIES . IL NE POURRA ETRE NI COPIE NI DIVULGUE SANS SON AUTORISATION THIS DRAWING IS THE EXCLUSIVE PROPERTY OF VINCI-TECHNOLOGIES AND IS PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL INFORMATION. THIS DRAWING AND THE INFORMATION CONTAINED THEREIN MUST NOT BE DUPLICATED, USED, DIVULGED, REPRODUCED, COPIED, DISCLOSED OR APPROPRIATED IN WHOLE OR IN PART FOR ANY PURPOSE OTHER THAN AS EXPRESSLY AUTHORIZED IN WRITING BY VINCI-TECHNOLOGIES. THIS DRAWING MUST BE RETURNED PROMPTLY UPON REQUEST.								
IND	MODIFICATION			NOM	VISA	DATE		
ISSUE	DESCRIPTION OF AMENDMENT			NAME	STAMP	DATE		
DATE	ETABLI	VERIFIE	CLIENT	N° AFFAIRE	EQUIPEMENT			FOLIO / PAGE
05/09/2022	LW	VG	SOTACARBO	42273	Impianto Prototipale P2G/L			6/7

Allegato 1 – P&ID progettazione di dettaglio



				VINCI TECHNOLOGIES PARC DE L'ILE 27B RUE DU PORT 92022 NANTERRE - France Tél. : (33-1) 01 41 37 92 20 Fax : (33-1) 01 41 37 04 76		DESIGNATION : Gas Vent PLAN N° DRAWING N° 42273-P07		INDICE REVISION E
CE PLAN EST LA PROPRIETE DE VINCI-TECHNOLOGIES, IL NE POURRA ETRE NI COPIE NI DIVULGUE SANS SON AUTORISATION THIS DRAWING IS THE EXCLUSIVE PROPERTY OF VINCI-TECHNOLOGIES AND IS PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL INFORMATION. THIS DRAWING AND THE INFORMATION CONTAINED THEREIN MUST NOT BE DUPLICATED, USED, DIVULGED, REPRODUCED, COPIED, DISCLOSED OR APPROPRIATED IN WHOLE OR IN PART FOR ANY PURPOSE OTHER THAN AS EXPRESSLY AUTHORIZED IN WRITING BY VINCI-TECHNOLOGIES. THIS DRAWING MUST BE RETURNED PROMPTLY UPON REQUEST.								
IND	MODIFICATION			NOM	VISA	DATE	EQUIPEMENT	
ISSUE	DESCRIPTION OF AMENDMENT			NAME	STAMP	DATE	EQUIPMENT	
DATE	ETABLI	VERIFIE	CLIENT	N° AFFAIRE	EQUIPEMENT			FOLIO / PAGE
DATE :	DRAWN BY :	APPROVED BY :	CUSTOMER :	PROJECT NUMBER :	EQUIPMENT			
05/07/2021	LW	VG	Sotacarbo	42273	P2G/L CO2 Conversion Demo Plant			7/7



Flowrate kg/h
 Pressure barg
 Temperature °C

				PARC DE L'ILE 27B RUE DU PORT 92022 NANTERRE - France Tél. : (33-1) 01 41 37 92 20 Fax : (33-1) 01 41 37 04 76		DESIGNATION : PLAN N° DRAWING N° 42273-PFD		INDICE REVISION C
CE PLAN EST LA PROPRIETE DE VINCI-TECHNOLOGIES. IL NE POURRA ETRE NI COPIE NI DIVULGUE SANS SON AUTORISATION THIS DRAWING IS THE EXCLUSIVE PROPERTY OF VINCI-TECHNOLOGIES AND IS PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL INFORMATION. THIS DRAWING AND THE INFORMATION CONTAINED THEREIN MUST NOT BE DUPLICATED, USED, DIVULGED, REPRODUCED, COPIED, DISCLOSED OR APPROPRIATED IN WHOLE OR IN PART FOR ANY PURPOSE OTHER THAN AS EXPRESSLY AUTHORIZED IN WRITING BY VINCI-TECHNOLOGIES. THIS DRAWING MUST BE RETURNED PROMPTLY UPON REQUEST.								
IND	MODIFICATION	NOM	VISA	DATE	EQUIPEMENT		FOLIO / PAGE	
ISSUE	DESCRIPTION OF AMENDMENT	NAME	STAMP	DATE	EQUIPMENT		PAGE	
DATE	ETABLI	VERIFIE	CLIENT	N°AFFAIRE	EQUIPEMENT		FOLIO / PAGE	
DATE	DRAWN BY	APPROVED BY	CUSTOMER	PROJECT NUMBER	EQUIPMENT		PAGE	
5/07/2021	LW	VG	SOTACARBO	42273	P2G/L - CO2 To Chemicals Pilot Unit		1/1	

5 Riferimenti bibliografici

1. https://ec.europa.eu/clima/eu-action/international-action-climate-change/climate-negotiations/paris-agreement_en.
2. European Commission, “Renewable energy in Europe”, Department: Energy, 18 March 2020 Brussels.
3. C. Gúrsan, V. de Gooyert, “The systemic impact of a transition fuel: Does natural gas help or hinder the energy transition?”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 138, 2021, 110552.
4. IEA, “Net Zero by 2050”, 2021 Paris, <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>.
5. M. Sterner, M. Specht, “Power-to-Gas and Power-to-X—The History and Results of Developing a New Storage Concept”, *Energies*, 14 (20), 2021, 6594.
6. S. Bellocchi, M. De Falco, M. Gambini, M. Manno, T. Stilo, M. Vellini. Opportunities for power-to-Gas and Power-to-liquid in CO₂-reduced energy scenarios: The Italian case. *Energy*, 175, 2019, 847–861.

6 Abbreviazioni ed acronimi

ATEX	ATmosphere EXplosive
BOM	Bill of materials
DME	Dimetil etere
DP	Trasmittitore di pressione differenziale
F	Filtri vari
FE	Misuratori di portata
FIC	Misuratori regolatori di portata
FV	Valvole regolatrici di portata
GC	Gas Cromatografo
HP	High Pressure
L/D	rapporto Lunghezza/Diametro
LI/LT	Misuratori indicatori di livello
LP	Low Pressure
MFC	Mass Flow Controller
NDIR	Non-Dispersive Infrared
P&ID	Piping and Instrumentation Diagram
P2G/L	Power to Gas / Liquid
PCV	Valvole di controllo della pressione
PED	Pressure Equipment Directive
PFD	Process Flow Diagram
PG e PT	Trasmittitore e misuratore di pressione
PLC	Programmable Logic Controller
ppm	parti per milione
PtG	Power to Gas
PtL	Power to Liquid
PSV	Valvole di sicurezza
RD	Dischi di rottura
RWGS	Reverse Water Gas Shift
SNG	Synthetic Natural Gas
TCD	Thermal Conductivity Detector
TE	Termocoppie
TUSL	Testo unico in materia di salute e sicurezza nei luoghi di lavoro
UV	Valvole pneumatiche
XtL	Feed (coal, biomass, CO ₂ , ...) to Liquids

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 sostenere con studi e ricerche scientifiche l'attività delle miniere di carbone del 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.

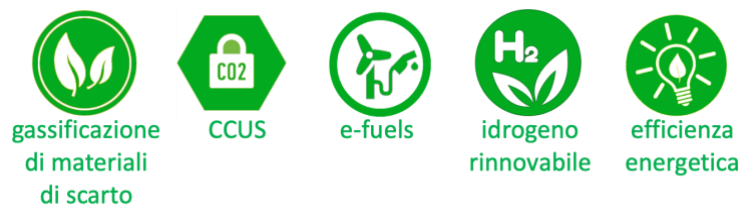


Figura 7.1. Schematizzazione delle tematiche di ricerca in corso presso Sotacarbo.

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 tecnici 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 intermedio 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.