

# PLANTA DE PRODUCCIÓ DE FORMALDEHID

PROJECTE FI DE GRAU

Enginyeria Química

Juny 2026



Cesc Anguera Llàcer, Isis Blanco Casahuga, Matilde Granwehr de Sousa,  
Oriol Fortuny Gómez, Jose Ignacio Esquivel Silva

TUTOR: Antoni Sánchez Ferrer



# PLANTA DE PRODUCCIÓ DE FORMALDEHID

PROJECTE FI DE GRAU

Enginyeria Química

Juny 2026

## CAPÍTOL 1: ESPECIFICACIONS



Cesc Anguera Llàcer, Isis Blanco Casahuga, Matilde Granwehr de Sousa,  
Oriol Fortuny Gómez, Jose Ignacio Esquivel Silva

TUTOR: Antoni Sánchez Ferrer



## TAULA DE CONTINGUTS

|             |                                                         |           |
|-------------|---------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1.1</b>  | <b>ESPECIFICACIONS DEL PROJECTE</b>                     | <b>1</b>  |
| 1.1.1       | BASES DEL PROJECTE                                      | 1         |
| 1.1.2       | ABAST DEL PROJECTE                                      | 1         |
| 1.1.3       | LOCALITZACIÓ DE LA PLANTA                               | 2         |
| 1.1.4       | PARÀMETRES D'EDIFICACIÓ DE LA PLANTA                    | 3         |
| 1.1.4.1     | <i>Plànol de la parcela</i>                             | 3         |
| 1.1.5       | SERVEIS DISPONIBLES A PLANTA                            | 4         |
| 1.1.6       | ACCESSIBILITAT DE LA PLANTA                             | 5         |
| 1.1.7       | ABREVIACIONS                                            | 7         |
| <b>1.2</b>  | <b>CARÀCTERÍSTIQUES DELS REACTIUS I PRODUCTES</b>       | <b>7</b>  |
| 1.2.1       | METANOL                                                 | 7         |
| 1.2.2       | OXIGEN                                                  | 8         |
| 1.2.3       | NITROGEN                                                | 8         |
| 1.2.4       | FORMALDEHID                                             | 9         |
| 1.2.5       | AIGUA                                                   | 10        |
| <b>1.3</b>  | <b>DESCRIPCIÓ DEL PROCÉS DE PRODUCCIÓ</b>               | <b>10</b> |
| <b>1.4</b>  | <b>BALANÇ DE MATÈRIA</b>                                | <b>15</b> |
| <b>1.5</b>  | <b>CONSTITUCIÓ DE LA PLANTA</b>                         | <b>19</b> |
| 1.5.1       | EMMAGATZEMATGE DE LES MATÈRIES (A-100)                  | 20        |
| 1.5.2       | MESCLA I PREPARACIÓ PER A LA REACCIÓ (A-200)            | 20        |
| 1.5.3       | REACCIÓ (A-300)                                         | 21        |
| 1.5.4       | SEPARACIÓ DEL PRODUCTE (A-400)                          | 21        |
| 1.5.5       | EMMAGATZEMATGE DEL PRODUCTE (A-500)                     | 22        |
| 1.5.6       | SALA DE CONTROL (A-600)                                 | 22        |
| 1.5.7       | SERVEIS (A-700)                                         | 23        |
| 1.5.7.1     | <i>Serveis de fred</i>                                  | 23        |
| 1.5.7.2     | <i>Serveis de calor</i>                                 | 23        |
| 1.5.7.3     | <i>Servei d'inertització amb nitrogen</i>               | 24        |
| 1.5.7.4     | <i>Servei aire comprimit</i>                            | 24        |
| 1.5.8       | ZONA CÀRREGA I DESCÀRREGA CAMIONS (A-800)               | 25        |
| 1.5.9       | SALA DE LABORATORIS (A-900)                             | 25        |
| 1.5.10      | OFICINES (A-1000)                                       | 25        |
| 1.5.11      | ZONA TREBALLADORS (A-1100)                              | 26        |
| 1.5.12      | TALLER DE MANTENIMENT (A-1200)                          | 26        |
| 1.5.13      | ZONA DE CÀRREGA DE RESIDUS (A-1300)                     | 26        |
| 1.5.14      | TRACTAMENT DE GASOS (A-1400)                            | 26        |
| 1.5.15      | PLANTA PILOT (A-1500)                                   | 27        |
| 1.5.16      | PROTECCIÓ CONTRA INCENDIS (A-1600)                      | 27        |
| 1.5.16.1    | <i>Sistema de Protecció Contra Incendis i Seguretat</i> | 27        |
| 1.5.16.2    | <i>Reserva d'aigua i xarxa d'extinció</i>               | 28        |
| 1.5.16.3    | <i>Disponibilitat i tipologia d'extintors</i>           | 29        |
| 1.5.16.4    | <i>Senyalització de seguretat</i>                       | 29        |
| <b>1.6.</b> | <b>PLANIFICACIÓ TEMPORAL</b>                            | <b>29</b> |
| <b>1.7.</b> | <b>BIBLIOGRAFIA</b>                                     | <b>32</b> |

## 1.1 Especificacions del projecte

### 1.1.1 Bases del projecte

L'objectiu del projecte MethaForm, és el disseny tècnic i l'estudi de viabilitat d'una planta química destinada a la producció de 100.000 tones anuals de formaldehid. El producte final es presentarà en forma de solució aquosa al 37% en pes, estabilitzada amb un 10% de metanol per garantir-ne la conservació i evitar la polimerització.

El procés seleccionat per a aquest disseny és el procés FORMOX, basat en l'oxidació catalítica del metanol utilitzant un catalitzador d'òxid de ferro i molibdè (Fe-Mo).

La planta operarà en règim continu seguint les següents directrius:

- **Capacitat de producció:** 100.000 Tn/any de formaldehid al 37%.
- **Règim de funcionament:** La instal·lació estarà operativa durant 330 dies a l'any.
- **Planificació de manteniment:** Es preveuen 35 dies de parada anuals, dividits en una parada principal de 25 dies a l'estiu (agost) per al canvi de catalitzador i una parada tècnica de 10 dies a l'hivern (gener) per a manteniment preventiu i neteja de bescanviadors.
- **Logística de producte:** L'expedició es realitzarà a granel mitjançant camions cisterna amb una capacitat de 33 tones per unitat.

### 1.1.2 Abast del projecte

El projecte d'enginyeria MethaForm recull el desenvolupament tècnic i conceptual d'una planta química per a la producció de 100.000 tones anuals de formaldehid en solució aquosa al 37% en pes (formalina).

Per garantir un disseny eficient i funcional de la planta, el projecte integra la definició del procés, el dimensionament dels equips, els sistemes de control, els balanços de matèria i les especificacions tècniques pertinents.

A continuació es detallen els requisits fonamentals per a la consecució del projecte, els quals serviran de full de ruta per a la redacció d'aquesta memòria.

- El disseny de la planta parteix de la recepció de metanol líquid com a matèria prima.
  - El disseny abasta l'etapa de vaporització de metanol i mescla amb aire, la reacció d'oxidació catalítica, i la posterior etapa d'absorció en contracorrent amb aigua per a l'obtenció del producte final, incloent el seu condicionament i estabilització abans de l'emmagatzematge definitiu.

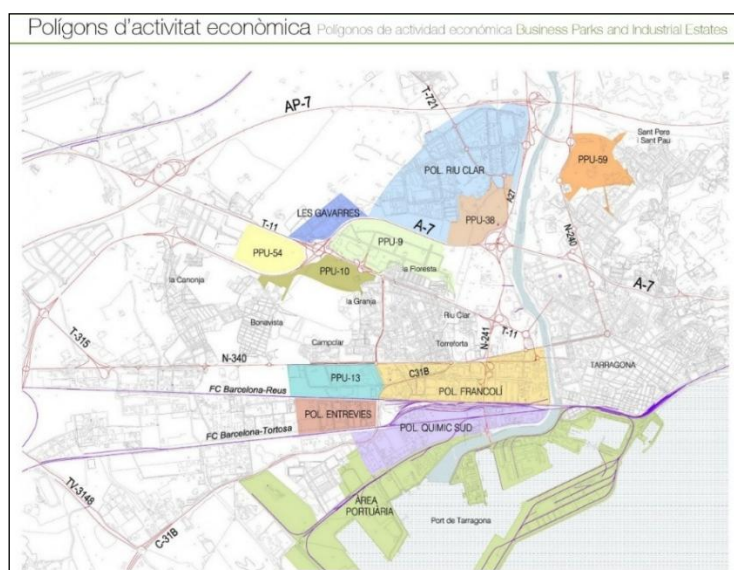
- El dimensionament dels principals equips de procés, com ara bescanviadors de calor, tancs d'emmagatzematge i altres equips auxiliars necessaris per al funcionament de la planta.
- Disseny dels llaços de control (P&ID), establiment de la nomenclatura segons norma ISA 5.1 i especificació d'equips de decisió i elements finals de control per garantir l'estabilitat de les variables crítiques.
- Determinació dels requeriments per a l'Autorització Ambiental Integrada (AAI) i aplicació de les Millors Tècniques Disponibles (MTD) des del disseny de la instal·lació. S'inclou el disseny d'un Oxidador Catalític (CatOx) per al tractament d'emissions.
- Estimació econòmica i estudi de rendibilitat, es desglossen els costos d'inversió de capital (CAPEX), incloent l'adquisició d'equips i obra civil, i els costos d'operació (OPEX).
- Una guia de referència per al procés de posada en marxa de la planta, així com per a la gestió de les diferents situacions d'aturada que es poden produir durant l'operació. Igualment, inclou la definició de l'organització operativa i funcional de la planta.

### 1.1.3 Localització de la planta

La planta s'ubicarà en una parcel·la del Polígon Industrial "Satèl·lits", situat al terme municipal de Tarragona. Aquesta zona destaca per la seva excel·lent infraestructura logística i la proximitat al clúster petroquímic més important del sud d'Europa.

Tarragona, amb una població aproximada de 143.000 habitants l'any 2025, se situa com la setena ciutat més poblada de Catalunya i un referent industrial a la costa mediterrània. La seva posició estratègica es veu reforçada per una excel·lent connectivitat logística que inclou el Port de Tarragona, l'eix viari format per l'AP-7 i l'A-7, així com una xarxa ferroviària de gran capacitat i la proximitat a instal·lacions aeroportuàries.

A continuació a la *Figura 1.1*, s'observa el complex industrial de Tarragona.



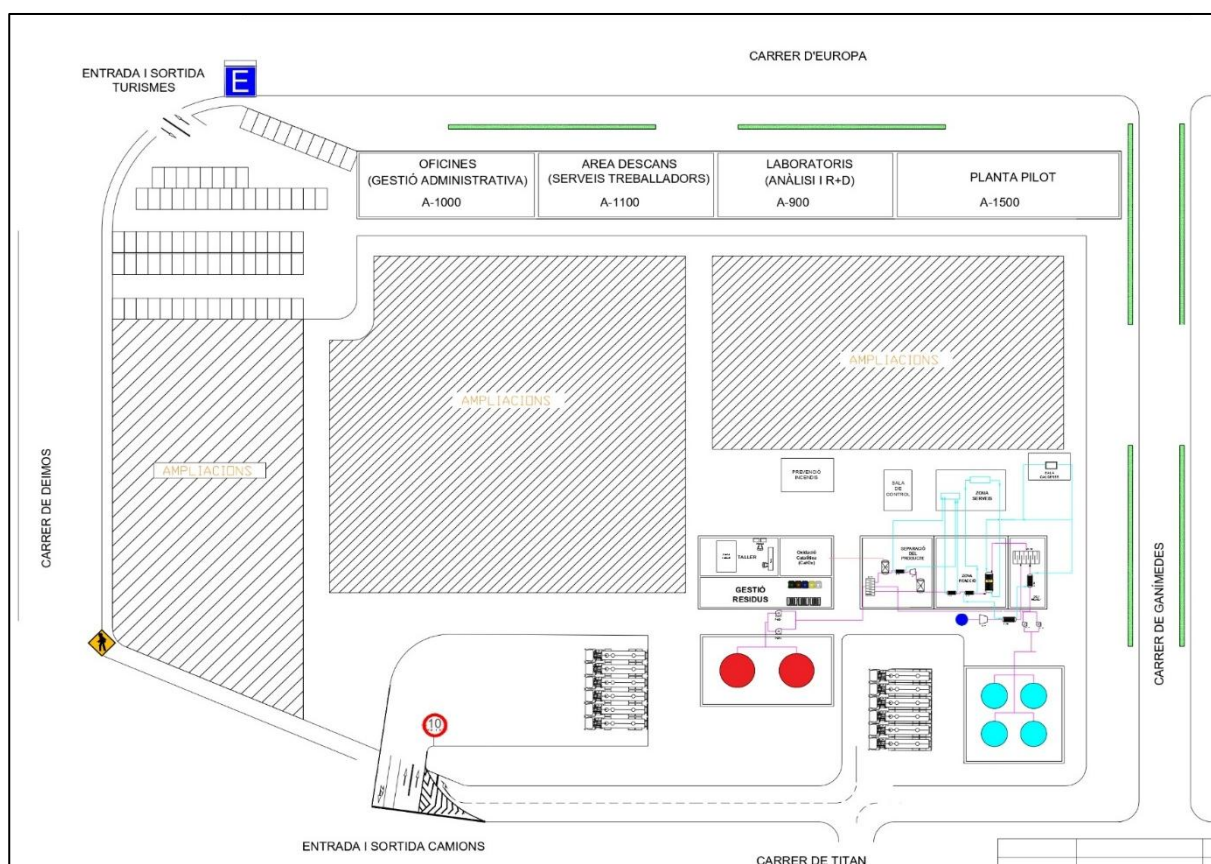
*Figura 1.1 Polígons amb activitat industrial a Tarragona.*

#### 1.1.4 Paràmetres d'edificació de la planta

#### 1.1.4.1 Plànol de la parcel·la

La parcel·la seleccionada presenta una superfície total de 53.720 m<sup>2</sup>. El solar està delimitat pels carrers d'Europa, de Deimos, de Titan i de Ganimedes, fet que permet disposar de diversos punts d'accés i optimitzar el flux de transport pesat. L'espai està degudament qualificat per a ús industrial i compta amb una zonificació específica per a la implantació d'oficines, laboratoris, vestuaris i el taller de manteniment, assegurant una organització funcional de la planta.

Seguidament, a la *Figura 1.2* es mostra el plànol del terreny on es construirà la planta.



*Figura 1.2 Plànol del terreny on es construirà la planta.*

La parcel·la de 53.720 m<sup>2</sup> es regeix per les ordenances urbanístiques municipals de Tarragona, les quals imposen una sèrie de limitacions geomètriques i volumètriques que defineixen el polígon d'edificació aprofitable per al procés industrial tal i com es mostra a la *Taula 1.1*.

*Taula 1.1 Paràmetres d'edificació de la parcel·la*

| PARÀMETRE URBANÍSTIC         | ESPECIFICACIÓ TÈCNICA                                 |
|------------------------------|-------------------------------------------------------|
| EDIFICABILITAT               | 1,5 m <sup>2</sup> sostre / m <sup>2</sup> sòl        |
| OCUPACIÓ MÀXIMA DE PARCEL·LA | 75% de la superfície total                            |
| OCUPACIÓ MÍNIMA DE PARCEL·LA | 20% de la superfície d'ocupació màxima                |
| RETRANQUEJOS (SEPARACIONS)   | 5 m respecte a vials i veïns                          |
| ALÇADA MÀXIMA                | 16 m i 3 plantes (exceptuant justificació per procés) |
| ALÇADA MÍNIMA                | 4 m i 1 planta                                        |
| APARCAMENTS                  | 1 plaça per cada 150 m <sup>2</sup> construïts        |
| DISTÀNCIA ENTRE EDIFICIS     | 1/3 de l'alçada de l'edifici més alt (mínim 5 m)      |

La implantació física de la nau no només queda limitada pel paràmetre d'ocupació màxima (75%), sinó que està estrictament condicionada per la configuració del perímetre. La normativa estableix unes distàncies mínimes de 5 metres respecte a les alineacions de vial i les fites amb veïns. Aquesta franja perimetral de protecció actua com un filtre que redueix l'àrea neta on es pot edificar, garantint la seguretat, l'accessibilitat de vehicles d'emergència i la ventilació natural del complex industrial.

### 1.1.5 Serveis disponibles a planta

Per tal de garantir un ús i funcionament correcte de la planta, així com per complir amb la normativa vigent del polígon industrial on s'ubica, la parcel·la disposa d'una sèrie de serveis i subministraments bàsics a l'abast. A continuació, es detallen les característiques tècniques d'aquests serveis disponibles (veure *Taula 1.2*):

*Taula 1.2 Serveis disponibles de planta*

| PARÀMETRE         | ESPECIFICACIÓ TÈCNICA                    | OBSERVACIONS / REQUERIMENTS                                       |
|-------------------|------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| ENERGIA ELÈCTRICA | Connexió a línia de 20 kV                | Cal instal·lar estació transformadora (espai reservat al plànol). |
| GAS NATURAL       | Mitja pressió (1,5 kg/cm <sup>2</sup> )  | Connexió disponible a peu de parcel·la.                           |
| CLAVEGUERAM       | Xarxa unitària (Ø 800 mm)                | Ubicat al centre del carrer a 3,5 m de profunditat.               |
| AIGUA D'INCENDIS  | Pressió màxima: 4 kg/cm <sup>2</sup>     | Obligatori dissenyar estació de bombament i reserva pròpia.       |
| AIGUA DE XARXA    | Pressió: 4 kg/cm <sup>2</sup> (Ø 200 mm) | Escomesa disponible a peu de parcel·la.                           |
| TERRENY           | Resistència: 2 kg/cm <sup>2</sup>        | Valor a 1,5 m de profunditat sobre estrat de graves.              |

## 1.1.6 Accessibilitat de la planta

### Accés per carretera

La ubicació a Tarragona permet una connexió directa amb l'eix mediterrani i l'interior de la península (veure *Figura 1.3*).

- **AP-7 (Autopista del Mediterrani):** És l'eix principal que connecta la planta amb França (nord) i València/Alacant (sud). És vital per a l'exportació europea.
- **A-7 (Autovia del Mediterrani):** Alternativa gratuïta a l'AP-7 que connecta els diferents polígons de l'àrea (Polígon Sud i Polígon Nord).
- **A-27:** Autovia clau que connecta directament el Port de Tarragona amb l'interior (Valls, Montblanc i, en el futur, Lleida i Saragossa). Facilita el moviment de camions pesants evitant colls d'ampolla urbans.
- **T-11:** Connecta Tarragona amb Reus, facilitant l'accés de personal i serveis tècnics.



Figura 1.3 Principals carreteres d'accés al nucli industrial de Tarragona

### Accés ferroviari

El complex de Tarragona disposa d'una de les infraestructures ferroviàries (veure *Figura 1.4*) de mercaderies més actives de l'Estat. El ferrocarril és el mitjà preferit per al transport de productes químics a gran escala, com el fòsfor elemental, mitjançant vagon-cisterna especialitzats.

- **El Corredor Mediterrani:** La planta es beneficia de la proximitat a aquesta infraestructura, que permet el transport de mercaderies a nivell europeu, facilitant la connexió directa amb el centre d'Europa sense canvis de tren a la frontera.
- **Terminal Intermodal de la Boella:** Situada prop del port, permet la càrrega de contenidors i cisternes des del camió al tren.
- **Ramals particulars:** Donada la resistència del terreny de 2 kg/cm<sup>2</sup>, la parcel·la podria suportar infraestructures de càrrega pesada. Moltes plantes de Tarragona disposen d'un ramal ferroviari propi que connecta directament amb la xarxa d'Adif.



*Figura 1.4 Infraestructura ferroviària a Tarragona*

### 1.1.7 Abreviacions

Al llarg de la descripció d'aquest projecte es faran servir una sèrie d'abreviacions per termes que s'utilitzaran tant als plànols com a descripcions i explicacions, per tal de poder referenciar cada equip d'una manera més abreviada, s'ha establert una nomenclatura, la qual es veu reflectida a la *Taula 1.3*.

*Taula 1.3 Abreviatures pels equips principals*

| Equip                      | Abreviació |
|----------------------------|------------|
| Reactor                    | R          |
| Tanc d'Emmagatzematge      | TE         |
| Bescanviador de Calor      | E          |
| Compressor                 | K          |
| Bomba centrifuga hermètica | P          |
| Mesclador                  | ME         |
| Columna d'Absorció         | CA         |
| Caldera                    | CL         |

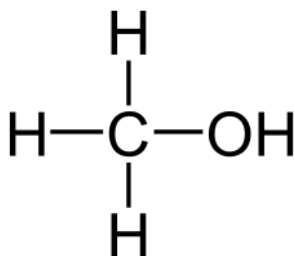
## 1.2 Característiques dels reactius i productes

### 1.2.1 Metanol

És la matèria prima principal. A la indústria química, aproximadament el 40% de la producció global de metanol es destina a la fabricació de formaldehid. També actua com a agent estabilitzador en el producte final per evitar-ne la polimerització.

És un líquid incolor, altament volàtil i inflamable a temperatura ambient (Categoria 2 segons OSHA/ECHA). És altament tòxic per inhalació, contacte cutani o ingestió, metabolitzant-se en àcid fòrmic i causant danys severes. Requereix transferència en sistemes tancats, inertització amb nitrogen als tancs, estricta absència de fonts d'ignició i l'ús d'equips de protecció individual (EPI) específics.

En la *Figura 1.5* es pot observar la seva estructura molecular.



*Figura 1.5 Estructura molecular metanol*

En la *Taula 1.4* es consideren algunes de les propietats físiques que presenta el metanol.

Taula 1.4 Propietats físiques del metanol

| Propietat                            | Valor              |
|--------------------------------------|--------------------|
| Fórmula                              | CH <sub>3</sub> OH |
| Pes molecular (g/mol)                | 32,04              |
| Densitat (g/cm <sup>3</sup> ) a 20°C | 0,792              |
| Pressió de vapor (kPa) a 20°C        | 12,85              |
| Punt de fusió (°C) a 1 atm           | -97,8              |
| Punt d'ebullició (°C) a 1 atm        | 64,7               |
| Viscositat (cP) a 20°C               | 0,593              |

### 1.2.2 Oxigen

És el reactiu oxidant necessari per dur a terme la reacció catalítica. S'introdueix al sistema directament a través de la captació d'aire atmosfèric. És un paràmetre crític mantenir la seva proporció controlada per treballar fora dels límits d'explosivitat de la mescla.

És un gas incolor, inodor i insípid. Tot i no ser tòxic ni inflamable per si mateix, és un comburent potent que accelera violentament la combustió d'altres materials. En la *Figura 1.6* es pot observar la seva estructura molecular.

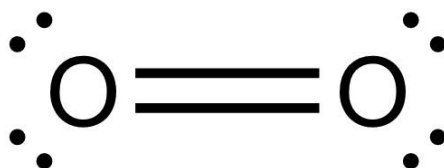


Figura 1.6. Estructura molecular oxigen

En el procés de producció de formaldehid, la concentració d'oxigen és un paràmetre crític per mantenir la barreja fora dels límits d'explosivitat.

En la *Taula 1.5* es consideren algunes de les propietats físiques que presenta l'oxigen.

Taula 1.5 Propietats físiques de l'oxigen

| Propietat                     | Valor          |
|-------------------------------|----------------|
| Fórmula                       | O <sub>2</sub> |
| Pes molecular (g/mol)         | 32,00          |
| Densitat (g/L) a 0°C, 1 atm   | 1,429          |
| Punt d'ebullició (°C) a 1 atm | -183,0         |
| Punt de fusió (°C) a 1 atm    | -218,8         |

### 1.2.3 Nitrogen

Gas inert emprat exclusivament com a servei auxiliar per a la inertització de l'espai dels tancs d'emmagatzematge de metanol i formalina, evitant la formació d'atmosfera explosives. És un gas inert que no reacciona en les condicions de síntesi del formaldehid.

El risc principal associat al seu ús és l'asfíxia per desplaçament de l'oxigen en espais tancats i les cremades criogèniques en la seva forma líquida.

En la *Taula 1.6* es consideren algunes de les propietats físiques que presenta el nitrogen.

*Taula 1.6 Propietats físiques del nitrogen*

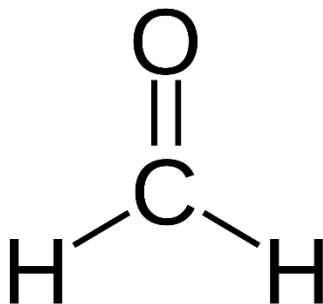
| Propietat                             | Valor          |
|---------------------------------------|----------------|
| Fórmula                               | N <sub>2</sub> |
| Pes molecular (g/mol)                 | 28,01          |
| Factor d'expansió (líquid a gas)      | 1:695          |
| Punt d'ebullició (°C) a 1 atm         | -195,8         |
| Capacitat tanc real (m <sup>3</sup> ) | 10             |

## 1.2.4 Formaldehid

És el producte objectiu de la planta. S'obté en fase gasosa al reactor i s'absorbeix en aigua per comercialitzar-se com a formalina (solució aquosa al 37% en pes). S'empra per a la fabricació de resines i síntesi orgànica.

A temperatura ambient és un gas incolor d'olor penetrant i sufocant. És extremadament reactiu, amb forta tendència a polimeritzar formant paraformaldehid sòlid. És altament tòxic, irritant i està classificat com a carcinogen. Exigeix emmagatzematge amb estabilització química i el contacte amb materials anticorrosius com ara la resina vinilèster.

És altament soluble en aigua; de fet, industrialment se sol gestionar com una solució aquosa. En la *Figura 1.7* es pot observar la seva estructura molecular.



*Figura 1.7: Estructura molecular formaldehid*

En la *Taula 1.7* es consideren algunes de les propietats físiques que presenta el formaldehid.

*Taula 1.7 Propietats físiques del formaldehid*

| Propietat                            | Valor                 |
|--------------------------------------|-----------------------|
| Fórmula                              | CH <sub>2</sub> O     |
| Pes molecular (g/mol)                | 30,03                 |
| Densitat (g/cm <sup>3</sup> ) a 20°C | 1,11 (solució al 37%) |
| Punt d'ebullició (°C) a 1 atm        | -19,1 (gas pur)       |
| Punt de fusió (°C) a 1 atm           | -92,0                 |

## 1.2.5 Aigua

Actua com a subproducte de la reacció d'oxidació i, alhora, s'introdueix com a corrent de procés (Corrent 19 i 20) a les columnes d'absorció per dissoldre el formaldehid gasós i generar la solució final. No presenta riscos d'inflamabilitat ni toxicitat.

En la *Taula 1.8* es consideren algunes de les propietats físiques que presenta l'aigua.

*Taula 1.8 Propietats físiques de l'aigua*

| Propietat                            | Valor            |
|--------------------------------------|------------------|
| Fórmula                              | H <sub>2</sub> O |
| Pes molecular (g/mol)                | 18,02            |
| Densitat (g/cm <sup>3</sup> ) a 20°C | 1,00             |
| Punt d'ebullició (°C) a 1 atm        | 100,0            |
| Punt de fusió (°C) a 1 atm           | 0,0              |

## 1.3 Descripció del procés de producció

L'operabilitat contínua de la planta MethaForm depèn d'un subministrament ininterromput de reactius a l'àrea d'emmagatzematge (A-100). El parc de tancs (TE-101 a TE-104) assegura una autonomia de set dies per al metanol, abastit mitjançant camions cisterna. Paral·lelament, l'oxigen s'obté directament de l'aire atmosfèric captat i impulsat pel turbocompressor centrífug principal (K-201).

El parc d'emmagatzematge està integrat per quatre tancs cilíndrics verticals de sostre fix (TE-101 a TE-104), construïts en acer al carboni ASTM A36 amb fons pla i sostre cònic, disposats en línia a l'interior d'una cubeta de retenció comuna.

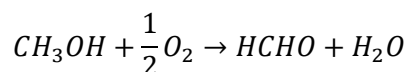
L'acondicionament previ a la reacció es duu a terme a l'àrea A-200. El metanol líquid es vaporitza i preescalfa a l'intercanviador E-201, mentre que l'aire comprimit s'escalfa a l'E-202. Ambdós corrents s'introdueixen a un mesclador estàtic en línia (ME-201) d'acer inoxidable. Aquesta mescla és un paràmetre crític de seguretat: el disseny estableix una entrada de 172,65 kmol/h de metanol i 2485,1 kmol/h d'aire, garantint una concentració de metanol del 6,5% molar, estrictament per sota del Límit Inferior d'Explosivitat (LEL), evitant atmosferes explosives al reactor.

Gràcies a l'elevada difusivitat dels gasos, la turbulència generada pels propis elements interns del mesclador assegura una homogeneïtzació completa de la barreja sense necessitat d'agents mecànics externs.

Un cop homogeneïtzada, la mescla ingressa a l'àrea de reacció (A-300). Per a la síntesi del formaldehid, s'ha seleccionat el procés FORMOX per davant d'altres alternatives clàssiques, com el mètode de la plata. Aquesta decisió es fonamenta en l'elevat rendiment de conversió del FORMOX (92-95%), la seva operació a temperatures inferiors i l'evasió d'etapes posteriors de destil·lació, ja que l'oxidació es produeix directament amb un excés d'aire.

Aquest mètode es basa en l'oxidació catalítica directa del metanol amb un excés d'aire en presència d'un catalitzador d'òxid de ferro i molibdè.

La reacció principal és altament exotèrmica i té lloc en un reactor de llit fix multitubular (R-301), es descriu mitjançant l'equació següent:



#### *Equació 1.1 Oxidació catalítica del metanol*

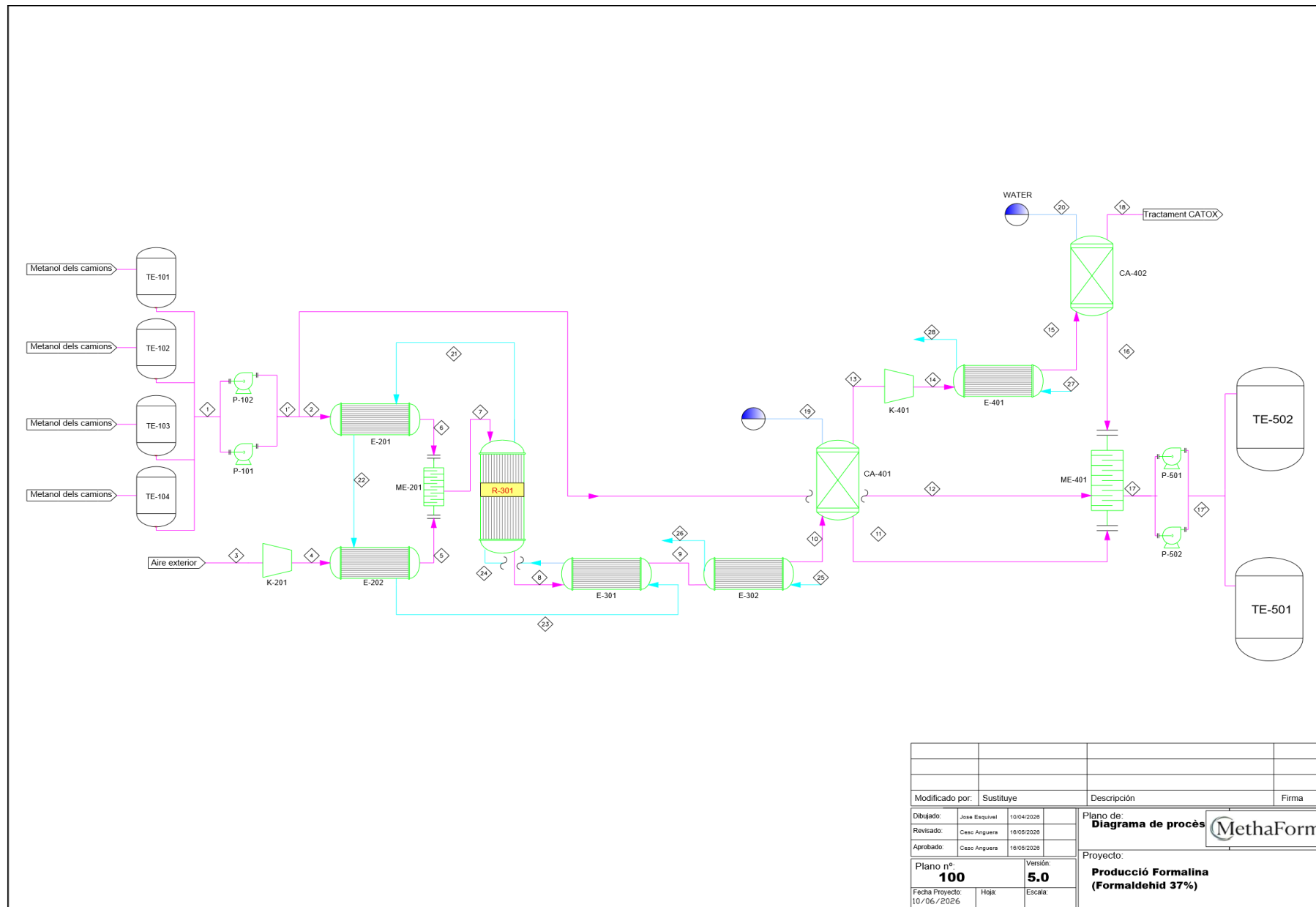
Pel que fa a aquest únic reactor, s'ha decidit construir un equip de carcassa i tubs per poder dissipar la calor generada per la reacció. La barreja gasosa avança pels tubs, on entra en contacte amb les partícules de catalitzador i reacciona a mesura que circula pels tubs aconseguint la formació de formaldehid desitjada. A causa de la calor generada per la reacció d'oxidació, el reactor opera actuant simultàniament com un intercanviador de calor.

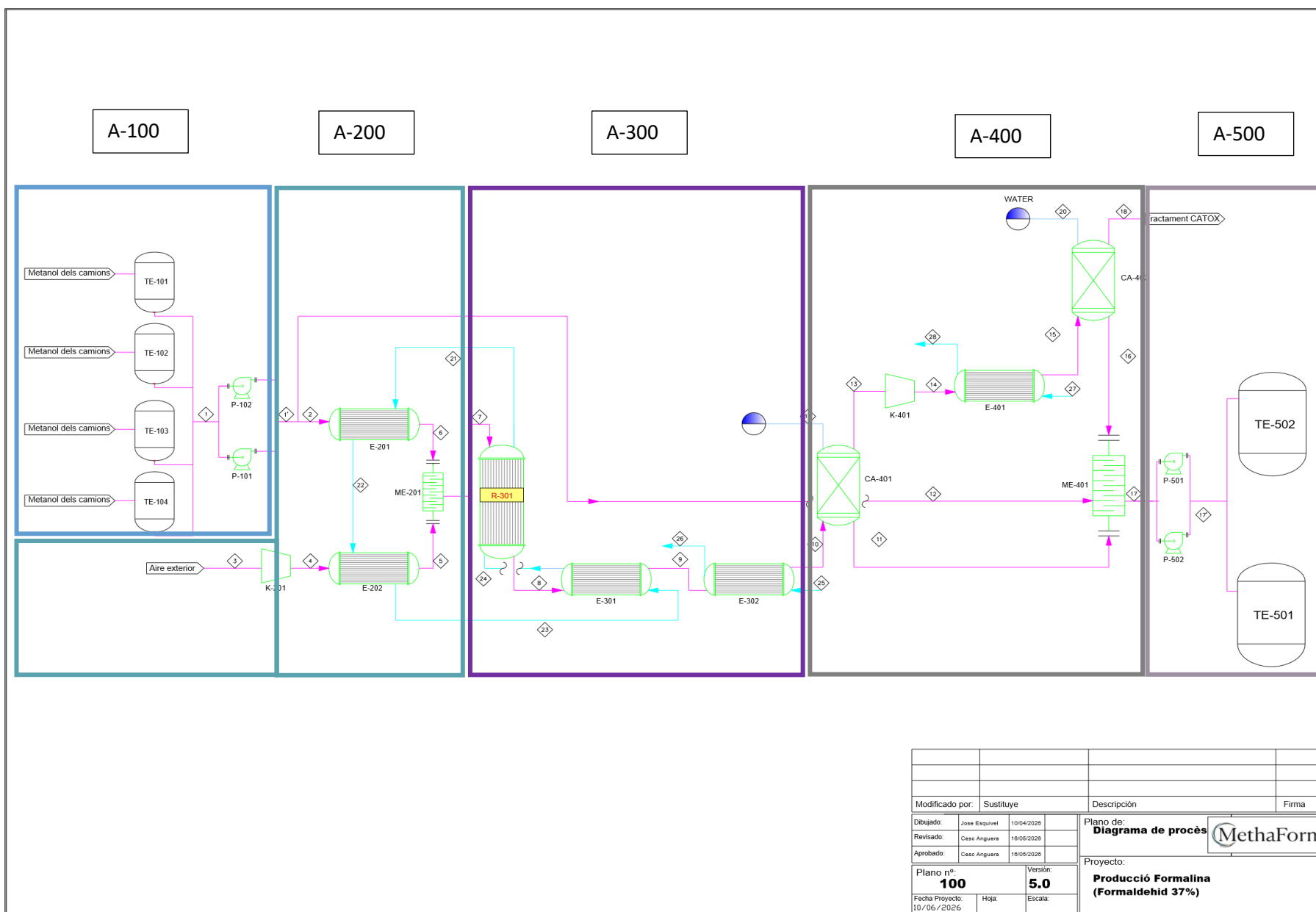
D'altra banda, la reacció principal no és l'única que té lloc durant l'oxidació del metanol. Poden produir-se diverses reaccions secundàries, sent les més rellevants l'oxidació del formaldehid per formar monòxid de carboni (CO), la formació de dimetilèter (DME) a partir del metanol, i la formació de dimetoximetà (DMM) i àcid fòrmic. En aquest projecte s'ha optat per una simplificació del modelatge teòric, estudiant només la reacció principal. Per tal d'apropar l'operació real a aquestes condicions ideals i inhibir les reaccions secundàries, la temperatura del reactor es controla rigorosament mitjançant circulació d'oli tèrmic (Dowtherm-A) per la carcassa, assegurant que no se sobrepassi el límit crític de 430 °C.

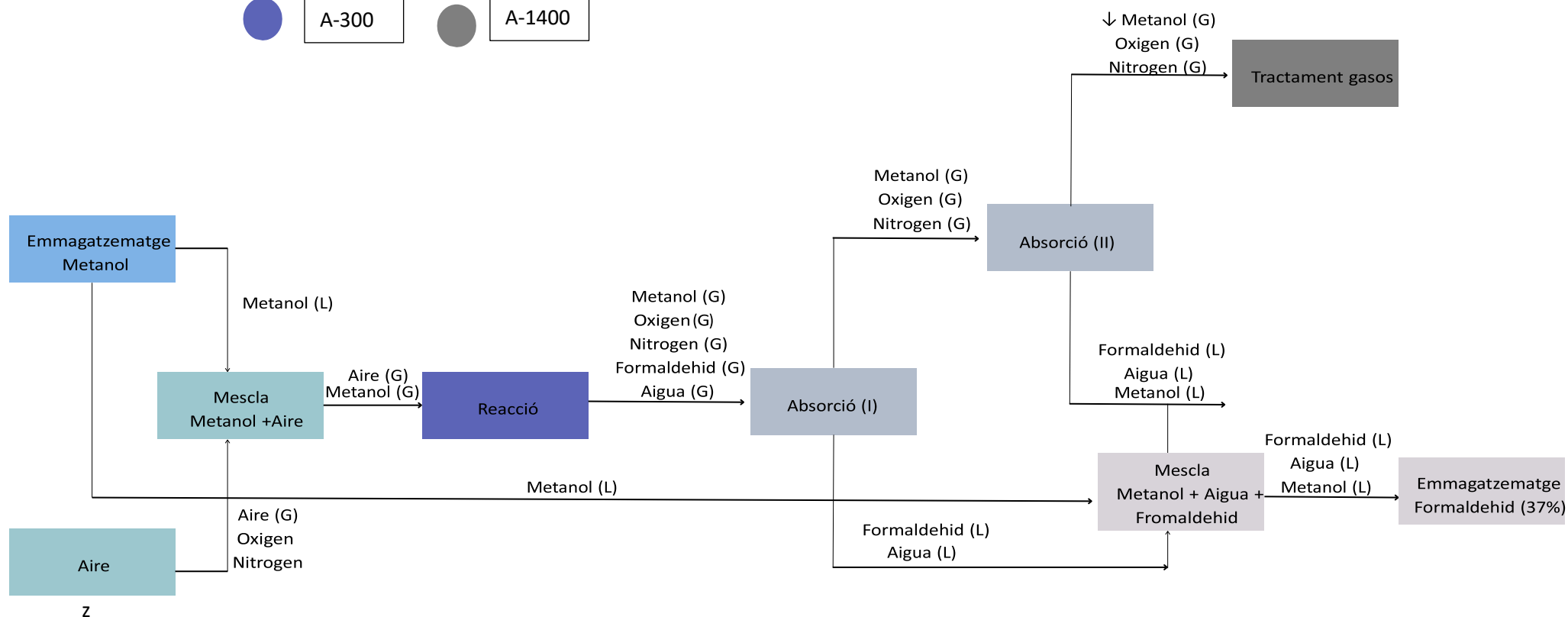
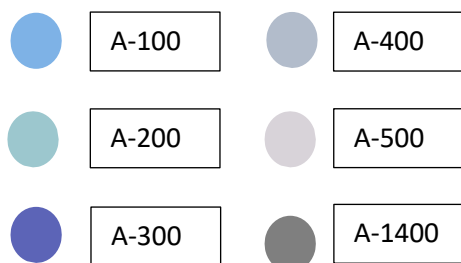
Tot i la simplificació en el balanç teòric, la planta preveu la presència física dels subproductes de les reaccions secundàries (CO, DME, DMM, etc.) arrossegats pels gasos inerts que surten pel cap de la segona columna d'absorció. Per garantir el compliment estricte de la normativa d'emissions, s'ha implementat un sistema de tractament de gasos CatOx (Oxidació Catalítica) a l'àrea A-1400.

L'efluent gasós abandona el reactor a uns 340 °C i requereix un refredament als bescanviadors E-301 i E-302 fins als 120 °C per evitar la degradació tèrmica del producte. Seguidament, ingressa a l'àrea de separació (A-400), configurada per dues columnes d'absorció en sèrie (CA-401 i CA-402). A la primera, l'aigua absorbeix la major part del formaldehid. Els gasos de cap passen per un compressor (K-401) i un bescanviador (E-401) abans d'entrar a la segona columna, dissenyada específicament per a l'esgotament final i la recuperació del metanol lliure. El líquid resultant es barreja al mesclador (M-401) per obtenir la solució final estabilitzada al 37%, que s'envia als tancs de producte acabat (A-500), aquest equip rep tres línies d'alimentació líquida de forma simultània: els corrents de fons recuperats de les dues columnes d'absorció (CA-401 i CA-402) i una aportació controlada de metanol pur líquid provinent directament de l'àrea d'emmagatzematge de matèries primeres (A-100).<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Amb l'objectiu de representar gràficament el procés descrit s'adjunten els plànols corresponents.







## 1.4 Balanç de matèria

El balanç de matèria és l'eina que ens permet quantificar de manera precisa i rigorosa tot allò que entra, surt i es transforma a la planta. Fent el càlcul en estat estacionari, comprovem que la massa es conserva al llarg de tot el procés i, per tant, verifiquem que el disseny que s'ha plantejat és operativament viable.

Per a la correcta interpretació d'aquest balanç, es presenten la *Taula 1.10* i la *Taula 1.11*, les quals recullen la caracterització termodinàmica i màssica de cadascun dels corrents del procés. Així mateix, s'adjunta el diagrama de flux de procés (PFD) dividit en seccions per facilitar la localització espacial de cada corrent.

Per a cada corrent, les taules detallen els cabals màssics, molars i volumètrics globals, així com les fraccions molars dels diferents compostos, la temperatura, la pressió i la fracció de vapor.

S'ha establert la següent nomenclatura de seguiment: quan un corrent travessa una bomba o un compressor mecànic (equips que modifiquen la pressió sense alterar la composició), el nou corrent manté el número original afegint-hi un apòstrof (com és el cas del corrent 1 al 1'). En canvi, sempre que un corrent ingressa en un equip diferent d'un compressor o bomba (reactors, columnes, bescanviadors, etc.), se li assigna una nova numeració seqüencial a la sortida.

Taula 1.9 Especificació de cadascun dels corrents del procés

| Número de corrent             | 1       | 1'      | 2       | 3        | 4        | 5        | 6       | 7        | 8        | 9        | 10       | 11      | 12      | 13       | 14       |
|-------------------------------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|---------|----------|----------|----------|----------|---------|---------|----------|----------|
| Fracció de vapor              | 0       | 0       | 0       | 1        | 1        | 1        | 1       | 1        | 1        | 1        | 1        | 0       | 0       | 1        | 1        |
| Temperatura (C°)              | 25,9    | 26      | 26      | 30       | 174,1    | 232,5    | 180     | 226,2    | 340      | 278,8    | 120,1    | 57,2    | 26      | 48       | 94,6     |
| Pressió (kPa)                 | 101,3   | 240     | 240     | 101,3    | 300      | 225,2    | 225     | 225      | 207      | 177,8    | 141      | 131     | 131     | 101,3    | 147      |
| Cabal molar (kmol/h)          | 211,19  | 211,19  | 172,65  | 2485,1   | 2485,1   | 2485,1   | 172,65  | 2657,76  | 2706,49  | 2706,49  | 2706,49  | 222,79  | 38,54   | 2761,24  | 2761,24  |
| Cabal màssic (kg/h)           | 6766,98 | 6766,98 | 5532,16 | 71696,52 | 71696,52 | 71696,52 | 5532,16 | 77228,68 | 77228,68 | 77228,68 | 77228,68 | 5494,33 | 1234,82 | 76734,35 | 76734,35 |
| Cabal volumètric (m³/h)       | 8,62    | 8,62    | 7,047   | 61820    | 30800    | 46400    | 2891    | 49040    | 66650    | 69830    | 62780    | 7,321   | 1,573   | 72790    | 57430    |
| Fracció molar dels components |         |         |         |          |          |          |         |          |          |          |          |         |         |          |          |
| Metanol                       | 1,00    | 1,00    | 1,00    | -        | -        | -        | 1,00    | 0,06     | 0,01     | 0,01     | 0,01     | -       | 1,00    | 0,01     | 0,01     |
| H2O                           | -       | -       | -       | -        | -        | -        | -       | -        | 0,04     | 0,04     | 0,04     | 0,45    | -       | 0,10     | 0,10     |
| Oxigen                        | -       | -       | -       | 0,21     | 0,21     | 0,21     | -       | 0,20     | 0,18     | 0,18     | 0,18     | -       | -       | 0,18     | 0,18     |
| Formaldehid                   | -       | -       | -       | -        | -        | -        | -       | -        | 0,06     | 0,06     | 0,06     | 0,55    | -       | 0,01     | 0,01     |
| Nitrogen                      | -       | -       | -       | 0,79     | 0,79     | 0,79     | -       | 0,74     | 0,71     | 0,71     | 0,71     | -       | -       | 0,70     | 0,70     |
| DTRM-A                        | -       | -       | -       | -        | -        | -        | -       | -        | -        | -        | -        | -       | -       | -        | -        |

Taula 1.10 Especificació de cadascun dels corrents del procés

| Número de corrent             | 15       | 16      | 17       | 17'      | 18       | 19     | 20      | 21       | 22       | 23       | 24       | 25    | 26     | 27    | 28     |
|-------------------------------|----------|---------|----------|----------|----------|--------|---------|----------|----------|----------|----------|-------|--------|-------|--------|
| Fracció de vapor              | 1        | 0       | 0        | 0        | 1        | 0      | 0       | 0        | 0        | 0        | 0        | 0     | 0      | 0     | 0      |
| Temperatura (C°)              | 67,7     | 54,8    | 53       | 53       | 48,9     | 25     | 25      | 327      | 283,7    | 253,15   | 274,07   | 25    | 103,01 | 25    | 78,14  |
| Pressió (kPa)                 | 138,9    | 131     | 131      | 131      | 101,3    | 120    | 101,3   | 250      | 242,2    | 227,35   | 224,07   | 200   | 190,3  | 200   | 198,09 |
| Cabal molar (kmol/h)          | 2761,24  | 307,2   | 568,53   | 568,53   | 2765,09  | 277,54 | 311,04  | 780,51   | 780,51   | 780,5    | 780,5    | 1110  | 1110   | 555,1 | 555,1  |
| Cabal màssic (kg/h)           | 76734,35 | 5895,28 | 12624,44 | 12624,44 | 76442,53 | 5000   | 5603,46 | 129565,2 | 129565,2 | 129565,2 | 129565,2 | 20000 | 20000  | 10000 | 10000  |
| Cabal volumètric (m³/h)       | 56350    | 6,33    | 15,6     | 15,6     | 73090    | 4,964  | 5,563   | 159,6    | 156,3    | 150,7    | 154,5    | 19,85 | 2333   | 9,927 | 10,35  |
| Fracció molar dels components |          |         |          |          |          |        |         |          |          |          |          |       |        |       |        |
| Metanol                       | 0,01     | -       | 0,07     | 0,07     | 0,01     | -      | -       | -        | -        | -        | -        | -     | -      | -     | -      |
| H2O                           | 0,10     | 0,90    | 0,66     | 0,66     | 0,11     | 1,00   | 1,00    | -        | -        | -        | -        | 1,00  | 1,00   | 1,00  | 1,00   |
| Oxigen                        | 0,18     | -       | -        | -        | 0,18     | -      | -       | -        | -        | -        | -        | -     | -      | -     | -      |
| Formaldehid                   | 0,01     | 0,09    | 0,27     | 0,27     | 0,004    | -      | -       | -        | -        | -        | -        | -     | -      | -     | -      |
| Nitrogen                      | 0,70     | -       | -        | -        | 0,70     | -      | -       | -        | -        | -        | -        | -     | -      | -     | -      |
| DTRM-A                        | -        | -       | -        | -        | -        | -      | -       | 1,00     | 1,00     | 1,00     | 1,00     | -     | -      | -     | -      |

Per realitzar aquesta comprovació matemàtica, s'identifiquen exclusivament els corrents que travessen la frontera del sistema global (entrades i sortides). Les recirculacions o subdivisions internes queden integrades dins del volum de control i no sumen al balanç exterior.

Els cabals màssics dels corrents implicats són els següents:

**Entrades al sistema:**

- **Corrent 1:** Metanol total provinent de l'àrea d'emmagatzematge amb un cabal de 6.766,98 kg/h.
- **Corrent 3:** Aire atmosfèric captat pel turbocompressor amb un cabal de 71.696,52 kg/h.
- **Corrent 19:** Aigua de procés aportada a la torre d'absorció secundària amb un cabal de 5.290,00 kg/h.
- **Corrent 20:** Aigua de procés addicional aportada al sistema d'absorció amb un cabal de 5.603,46 kg/h.
- *Suma total d'entrades:*  $6.766,98 + 71.696,52 + 5.290,00 + 5.603,46 = 89.356,96$  kg/h.

**Sortides del sistema:**

- **Corrent 17:** Producte final estabilitzat (Formalina al 37%) amb un cabal de 12.624,44 kg/h.
- **Corrent 18:** Gasos de purga ("off-gas") evacuats pel cap de la columna d'absorció cap a l'àrea de tractament amb un cabal de 76.734,35 kg/h.
- *Suma total de sortides:*  $12.624,44 + 76.734,35 = 89.358,79$  kg/h.

Aplicant l'equació general de conservació de la matèria (Entrades = Sortides) en estat estacionari:

$$89.356,96 \text{ kg/h} \approx 89.358,79 \text{ kg/h}$$

La diferència resultant entre les entrades i les sortides és de 1,83 kg/h. La diferència és menyspreable i podria ser degut a les toleràncies de càlcul iteratiu de les columnes d'absorció. Per tant, l'acompliment del balanç de matèria queda demostrat i el disseny de la planta tècnicament validat.

## 1.5 Constitució de la planta

La implantació mecànica i civil de la planta s'estructura mitjançant una distribució funcional per àrees, dissenyada amb l'objectiu d'optimitzar els fluxos logístics i segregar els nivells de risc operatiu (veure *Taula 1.11*).

*Taula 1.11 Codificació dels espais que componen el complex industrial*

| Àrea   | Denominació de l'espai                         |
|--------|------------------------------------------------|
| A-100  | Emmagatzematge de matèries primeres            |
| A-200  | Mescla i preparació per a la reacció           |
| A-300  | Unitat de reacció                              |
| A-400  | Separació i refinament del producte            |
| A-500  | Emmagatzematge del producte final              |
| A-600  | Sala de control central                        |
| A-700  | Serveis generals i utilitats                   |
| A-800  | Moll de càrrega i descàrrega de camions        |
| A-900  | Laboratoris d'anàlisi i R+D                    |
| A-1000 | Oficines i gestió administrativa               |
| A-1100 | Àrea de descans i serveis per als treballadors |
| A-1200 | Taller de manteniment mecànic i elèctric       |
| A-1300 | Gestió i càrrega de residus                    |
| A-1400 | Tractament d'efluents gasosos CATOX            |
| A-1500 | Planta Pilot                                   |
| A-1600 | Protecció i prevenció contra incendis          |

Els espais codificats de la instal·lació es classifiquen en quatre blocs principals:

### *Àrees de procés.*

Zones destinades a la transformació física i química, des de la recepció de matèries primeres fins al dipòsit del producte acabat (àrees A-100, A-200, A-300, A-400 i A-500). Disposen de controls d'accés estrictes i protocols de seguretat industrial avançats.

### *Àrees de control i recerca.*

Espais dedicats a la monitorització de variables en temps real, control de qualitat i optimització de processos. Comprèn la sala de control central (A-600), els laboratoris d'anàlisi (A-900) i la planta pilot (A-1500).

### *Serveis auxiliars.*

Infraestructures encarregades de subministrar les utilitats químiques i energètiques, així com de gestionar el transport de mercaderies a granel. Inclou els serveis generals (A-700), el moll de càrrega i descàrrega (A-800), el taller de manteniment (A-1200) i els sistemes de prevenció i protecció contra incendis (A-1600).

### *Gestió ambiental i administratiu.*

Espais destinats a la mitigació de l'impacte ecològic dels efluents i a l'organització corporativa de la planta. Engloba la gestió de residus (A-1300), el tractament de gasos residuals (A-1400), les oficines de gestió (A-1000) i els serveis per als treballadors (A-1100).

### 1.5.1 Emmagatzematge de les matèries (A-100)

Aquesta àrea està destinada a la recepció i regulació del cabal de metanol procedent de camions cisterna de 33 tones. Per garantir una autonomia operativa de 7 dies a règim nominal, es disposa de quatre tancs cilíndrics verticals de sostre fix (TE-101 a TE-104), amb fons pla i sostre cònic.

Aquests equips estan situats estratègicament, els tancs corresponents a l'emmagatzematge de reactius se situen a l'àrea A-100, mentre que els destinats a la recollida i emmagatzematge del producte final per a la seva posterior comercialització es troben a l'àrea A-500.

- Condicions d'emmagatzematge: El metanol s'emmagatzema a pressió atmosfèrica i a temperatura ambient, mantenint-se en fase líquida per evitar la formació de vapors inflamables dins del tanc, complementat amb la inertització per nitrogen.

Pel que fa als materials de construcció, tots els tancs (tant de l'àrea A-100 com de l'A-500) estan fabricats en acer al carboni ASTM A36. En el cas dels tancs de formalina (TE-501 i TE-502), s'ha aplicat un recobriments interior de resina vinilèster per garantir la compatibilitat química i la resistència a la corrosió. Totes les unitats disposen d'aïllament tèrmic exterior i acabat en pintura blanca per minimitzar el guany tèrmic per radiació solar.

Per garantir una operació segura, tots els tancs estan equipats amb llaços de control automatitzats de nivell i pressió, així com vàlvules d'alliberament de seguretat (PSV) per protegir els equips davant de sobrepressions extremes. Finalment, el conjunt de tancs de cada àrea està envoltat per una cubeta de contenció de formigó armat, dimensionada per retenir el 100% del volum del tanc més gran en cas de qualsevol fuga accidental.

### 1.5.2 Mescla i preparació per a la reacció (A-200)

L'àrea 200 de la planta està dedicada exclusivament a les operacions d'acondicionament i mescla dels corrents de reactius implicats en la síntesi de formaldehid. En aquesta secció es duu a terme la preparació de l'alimentació gasosa mitjançant la combinació del metanol prèviament vaporitzat i l'aire de procés escalfat. Aquestes operacions s'executen sota condicions de pressió i temperatura rigorosament controlades per tal d'assegurar que la mescla es mantingui en tot moment per sota del límit inferior d'explosivitat (LEL), garantint així la integritat de la instal·lació.

- L'operació s'inicia amb el tractament individual dels corrents. El metanol líquid (Corrent 2) s'envia a l'evaporador E-201, mentre que l'aire atmosfèric comprimit es fa passar per l'escalfador E-202. Ambdós corrents s'escalfen fins a una temperatura de 180 °C a una pressió d'aproximadament 225 kPa (2,25 bar) abans de la seva entrada al punt de mescla.

Aquesta configuració permet que els reactius arribin a la secció de mescla en fase vapor, facilitant una dispersió molecular ràpida i eficient.

- La mescla entre el metanol vaporitzat i l'aire s'efectua mitjançant un mesclador estàtic, identificat com a ME-201. A través del disseny intern i els elements estàtics de l'equip, es genera una turbulència controlada que garanteix una dispersió total dels components

sense la necessitat de peces mòbils ni agitació mecànica. El corrent resultant (Corrent 7) presenta una composició totalment homogènia, amb una fracció molar de metanol de 6.5% per maximitzar el rendiment en el reactor R-301 i sense comprometre els marges de seguretat tèrmica i d'inflamabilitat.

Aquesta configuració de mescla en fase gasosa mitjançant mescladors estàtics permet optimitzar la qualitat del producte intermedi, minimitzar les pèrdues de càrrega en la línia i mantenir unes condicions d'estabilitat constants abans de la introducció de la barreja al llit catalític.

La precisió en el control d'aquesta etapa és fonamental, ja que qualsevol fluctuació en la proporció metanol/aire podria derivar en reaccions secundàries no desitjades o en sobreescalfaments localitzats en la següent etapa de reacció.

### 1.5.3 Reacció (A-300)

L'àrea de reacció constitueix el nucli operatiu de la planta, ja que és on té lloc la transformació química de les matèries primeres en el producte d'interès. En aquest sector s'ubica l'equip principal del procés, el reactor catalític multitubular, identificat com a R-301, es tracta de les àrees més importants de qualsevol planta química, ja que es on es transformen els reactius en el producte d'interès.

Es tracta d'un reactor de llit fix multitubular dissenyat específicament per a l'oxidació catalítica del metanol, utilitzant un catalitzador d'òxid de ferro i molibdè (Fe-Mo). La mescla de metanol i aire, un cop homogeneïtzada a l'àrea A-200, entra a la part superior del reactor en fase gasosa a una temperatura de 226,2 °C i una pressió de 225 kPa (Corrent 7).

Un cop a l'interior dels tubs catalítics, es produeix la reacció d'oxidació principal, aquesta reacció és altament exotèrmica, motiu pel qual el reactor opera actuant simultàniament com un intercanviador de calor. Per mantenir l'estabilitat tèrmica i evitar la degradació del catalitzador o la formació de subproductes no desitjats, la temperatura es controla mitjançant un fluid de transferència tèrmica (Dowtherm-A) que circula per la calandra (espai exterior als tubs) de l'equip.

El sistema permet que la temperatura de reacció es mantingui en el rang òptim d'operació, donant lloc a un efluent gasós (Corrent 8) que abandona la base del reactor a una temperatura de 340,0 °C i una pressió de 200,0 kPa.

L'efluent resultant conté el formaldehid sintetitzat, vapor d'aigua (com a producte de la reacció), nitrogen i oxigen sobrant. Aquest corrent gasós, a causa de la seva elevada temperatura, es dirigeix immediatament cap a la secció de recuperació de calor (bescanviadors E-301 i E-302) per tal de disminuir la seva temperatura i preparar el formaldehid per a la fase d'absorció aquosa posterior, evitant així la seva degradació tèrmica.

### 1.5.4 Separació del producte (A-400)

L'objectiu fonamental d'aquesta àrea és la captura i purificació del formaldehid gasós per obtenir la solució aquosa comercial coneguda com a formalina. A diferència d'altres processos químics que requereixen destil·lació complexa, el mètode FORMOX utilitza un sistema d'absorció altament eficient compost per dues columnes d'absorció en sèrie: CA-401 i CA-402.

- **Columna d'absorció primària (CA-401):** El corrent gasós refredat a 120 °C s'introdueix per la part inferior de la torre i ascendeix en contracorrent amb un flux d'aigua de procés (corrent 19). L'equip presenta un diàmetre interior de 3,4 m, una alçada total de 14,0 m i compta amb una secció activa de 10,0 m de rebliment estructurat metàl·lic tipus Mellapak 250Y (Sulzer), seleccionat per maximitzar l'àrea interfacial amb una baixa pèrdua de càrrega. Atès el caràcter exotèrmic de l'absorció, s'utilitza un sistema d'aïllament tèrmic per afavorir la solubilitat de la fase gasosa.
- **Columna d'absorció secundària (CA-402):** Els gasos no absorbits pel cap de la primera columna es comprimeixen mitjançant el compressor (K-401) i es condicionen tèrmicament a E-401 abans d'alimentar la base de la CA-402. Aquesta columna, de 2,8 m de diàmetre i 14,0 m d'alçada, actua com una etapa d'esgotament final i recuperació selectiva del metanol volatilitzat. S'utilitza un llit de 10,0 m de rebliment a l'atzar format per anells Pall metàl·lics de 76 mm (Chemxin).

Els corrents líquids de fons de les dues columnes conflueixen en el mesclador estàtic ME-401, on la integració del metanol reciclat permet ajustar la composició requerida per a l'estabilització comercial sense recórrer a addicions significatives de matèria prima pura.

### 1.5.5 Emmagatzematge del producte (A-500)

La solució de formalina estabilitzada al 37% en pes es transfereix cap als tancs d'emmagatzematge de producte acabat TE-501 i TE-502. Es tracta de dos dipòsits atmosfèrics cilíndrics verticals d'acer al carboni ASTM A36, amb un volum de disseny individual d'1.021 m<sup>3</sup> (10,0 m de diàmetre i 13,0 m d'alçada). A causa de l'agressivitat química de la solució aquosa de formaldehid, la superfície interior d'aquests recipients incorpora un recobriment d'alta resistència de resina vinilèster per prevenir fenòmens de corrosió.

El control d'aquesta àrea és crític pel que fa a les variables tèrmiques. Per evitar la polimerització del formaldehid i la conseqüent precipitació de paraformaldehid sòlid (risc associat a temperatures inferiors a 20 °C), així com l'increment de la pressió de vapor o pèrdues de concentració (per sobre de 43 °C), els dipòsits disposen de mantes d'aïllament de llana de roca, mantenint el producte de forma permanent en el rang operatiu d'expedició (20-40 °C).

Des d'aquests tancs es realitza l'ompliment dels camions cisterna a l'àrea de càrrega (A-800), els quals acudeixen periòdicament per a la distribució del producte. Atès que la formalina és sensible a les variacions tèrmiques podent precipitar en forma de paraformaldehid els tancs han de comptar amb sistemes d'aïllament per garantir que el producte es mantingui sempre en fase líquida i dins de les especificacions de qualitat requerides. Per aquest motiu, i seguint el criteri aplicat als tancs de metanol, aquests dipòsits estan pintats de blanc per evitar l'absorció de radiació tèrmica exterior i mantenir l'estabilitat tèrmica del producte emmagatzemat.

### 1.5.6 Sala de control (A-600)

Aquesta àrea constitueix el nucli de supervisió operatiu i de seguretat de la planta industrial. L'espai centralitza l'adquisició de dades i la presa de decisions tècniques a través d'un sistema SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) integrat amb els llaços de control distribuïts de les diferents operacions substituïdes. Des de les interfícies d'operador (HMI), es monitoritzen

en temps real els perfils de temperatura de la calandra del reactor (R-301), els cabals de reactius a la zona de mescla i les pressions de les columnes d'absorció, permetent modificacions correctives immediates davant qualsevol desviació operativa.

Així mateix, la sala compta amb una arquitectura de control completament independent on s'allotja el Sistema Instrumentat de Seguretat (SIS). Aquest esquema té com a funció prioritària l'execució d'intervencions automatitzades d'emergència i protocols d'aturada segura en cas de fallada crítica de les variables de procés. Per motius de seguretat en el disseny de la planta, l'edifici s'ubica respectant les distàncies d'aïllament respecte a les zones de reacció i emmagatzematge, i manté un sistema de sobrepressió interna d'aire per garantir un entorn lliure de fums o vapors tòxics en cas d'un incident en les àrees de procés exterior.

### 1.5.7 Serveis (A-700)

El correcte funcionament de les operacions unitàries de la planta MethaForm requereix un subministrament continu i altament fiable de serveis auxiliars, els quals es troben centralitzats estratègicament a l'Àrea A-700.

#### 1.5.7.1 Serveis de fred

Per dissipar l'excedent calorífic dels bescanviadors E-302 i E-401, l'àrea de serveis disposa de la torre de refrigeració de circuit tancat TR-701 (model EWK-DC-900/5). Aquest equip està capacitat per rebre un cabal conjunt de 30.000 kg/h d'aigua de refrigeració que retorna del procés, dissipant 559 kW de potència tèrmica fins a refredar el líquid a 25 °C per a la seva recirculació.

#### 1.5.7.2 Serveis de calor

La planta compta amb un sistema de generació de calor auxiliar centralitzat a l'Àrea de Serveis Generals (A-700), dissenyat amb l'objectiu de subministrar l'energia tèrmica necessària durant les etapes d'arrencada de la instal·lació i garantir el manteniment de les condicions operatives en situacions de parada tècnica o operativa breu.

La caldera d'oli tèrmic CL-701 (model GTF-040 de la firma Pirobloc, amb una potència tèrmica nominal de 640 kW i alimentada amb gas natural) se situa en una posició perimetral dins del bloc A-700. El circuit d'oli tèrmic incorpora una línia de *by-pass* automatitzada, regulada per vàlvules.

Atès que el catalitzador d'òxid de ferro i molibdè (Fe-Mo) allotjat a l'interior dels tubs de l'R-301 és completament inactiu a temperatura ambient, el llit fix s'ha de preescalfar de forma homogènia fins a assolir la seva temperatura d'activació (fixada en 274 °C). El cabal d'oli Dowtherm-A es impulsa a través del serpentí de la caldera CL-701, on el cremador de gas natural eleva la seva temperatura fins a la consigna. El fluid calent s'injecta a la carcassa del reactor R-301, actuant transitòriament com a font de calor externa per transferir energia tèrmica per conducció i convecció cap a l'interior dels tubs catalítics.

Una vegada el llit catalític assoleix la temperatura d'activació i s'introdueix de forma gradual el corrent gasós de reactius (barreja de metanol i aire de l'Àrea A-200), s'inicia la reacció d'oxidació. Com que es tracta d'una reacció altament exotèrmica, el reactor comença a generar calor de manera interna i el perfil de temperatures s'eleva de forma autònoma. En el moment en què el

procés assoleix l'autotermia (règim estacionari autosostingut), el cremador de la caldera CL-701 es desconnecta automàticament.

### 1.5.7.3 Servei d'inertització amb nitrogen

L'Àrea A-700 gestiona el subministrament de nitrogen, el qual és un servei auxiliar crític per a la seguretat de la planta MethaForm. Aquest gas s'utilitza principalment per inertitzar els espais lliures dels tancs d'emmagatzematge de metanol (Àrea A-100) i de formalina (Àrea A-500), i prevenint riscos d'inflamabilitat del producte per contacte amb l'aire.

El subministrament i la gestió del nitrogen estan delegats a l'empresa especialitzada *Carburros Metálicos*, la qual garanteix la disponibilitat ininterrompuda del gas mitjançant un servei integral. La infraestructura consta d'un tanc criogènic horitzontal de doble paret amb aïllament al buit, dissenyat per emmagatzemar el nitrogen en estat líquid a temperatures criogèniques i maximitzar així la densitat d'emmagatzematge.

D'acord amb el dimensionament realitzat per garantir una autonomia de 7 dies, el tanc té una capacitat total de 10 m<sup>3</sup>, amb un diàmetre de 2,1 m i una alçada de 7,17 m. El proveïdor realitza el monitoratge continu del nivell mitjançant telemetria i gestiona el reompliment automàtic de forma autònoma, assegurant que la reserva de nitrogen no baixi mai dels llindars operatius requerits.

El procés d'inertització es basa en el següent cicle de funcionament:

1. Vaporització: El nitrogen líquid s'extreu del tanc criogènic i es fa passar per un evaporador ambiental atmosfèric. Aquest equip aprofita el diferencial tèrmic amb l'aire ambient i l'elevat factor d'expansió del nitrogen (aproximadament 1:695 a condicions ambientals) per transformar-lo eficaçment a fase gasosa.
2. Dosificació: El gas inert resultant es condueix cap a l'espai de cap dels tancs de procés mitjançant vàlvules reguladores de pressió autoregulades. Aquest sistema manté una lleugera sobrepressió constant a l'interior dels tancs, assegurant dues funcions vitals:
  - Seguretat: Desplaça l'oxigen atmosfèric, impedit la formació de mescles explosives amb els vapors inflamables del metanol o del formaldehid, mantenint la concentració molt per sota del límit inferior d'inflamabilitat (LEL).
  - Protecció del producte: Evita l'entrada d'humitat atmosfèrica durant els cicles de buidatge i ompliment, garantint que la puresa de les matèries primeres i del producte final es mantingui inalterada en tot moment.

### 1.5.7.4 Servei aire comprimit

L'aire comprimit representa un servei auxiliar fonamental destinat al subministrament d'energia pneumàtica per a l'accionament mecànic de les vàlvules de control i la instrumentació de la planta.

S'ha estimat un consum continu d'1,80 m<sup>3</sup>/min per garantir l'operativitat de tots els llaços pneumàtics. Per fer front a aquesta demanda, s'ha optat per la instal·lació de dues unitats de compressió rotatives d'ungles lliures d'oli (models ZT 18 d'Atlas Copco), configurades en paral·lel

sota un esquema d'un equip en servei i l'altre en reserva de seguretat. Cada compressor té una capacitat nominal de 2,66 m<sup>3</sup>/min a una pressió d'impulsió de 7,5 bar, assegurant un marge operatiu ampli que garanteix la continuïtat de la producció fins i tot durant tasques de manteniment preventiu.

Per assegurar que l'aire compleixi amb els estàndards de qualitat requerits per als elements finals de control (Classe 1.2.1 segons la norma ISO 8573-1), el sistema integra una línia de condicionament que consta de:

**Postrefrigeració i acumulació:** L'aire s'introdueix en un intercanviador per reduir-ne la temperatura, forçant la condensació de la major part de l'aigua.

**Tractament d'aire:** L'aire travessa una bateria de prefiltres dissenyada per retenir partícules sòlides d'origen atmosfèric, s'asseca mitjançant un assecador d'adsorció per reduir el punt de rosada i evitar condensacions a l'interior de les canonades pneumàtiques i, finalment, passa per un conjunt de postfiltres per assegurar la puresa final abans de la seva distribució cap a les vàlvules.

### 1.5.8 Zona càrrega i descàrrega camions (A-800)

L'àrea de càrrega i descàrrega s'ha dissenyat per gestionar de manera segura i eficient el flux de matèries primeres i productes acabats de la planta. El metanol arriba en camions cisterna i es descarrega mitjançant línies connectades directament als tancs d'emmagatzematge de l'àrea A-100. Aquestes línies disposen de sistemes de control de pressió, vàlvules de seguretat, bombes i connexions estandarditzades per evitar fuites.

D'altra banda, el producte final, la formalina al 37%, es carrega en cisternes per a la seva distribució a granel. L'àrea compta amb sistemes de contenció secundària i protocols d'accés segregats per minimitzar qualsevol risc d'abocament accidental durant les operacions logístiques, garantint una operació neta i segura.

### 1.5.9 Sala de laboratoris (A-900)

En aquesta àrea s'ubiquen les instal·lacions destinades a l'anàlisi química i el control de qualitat. Als laboratoris s'analitzen periòdicament mostres dels corrents de procés, de les matèries primeres (metanol) i del producte final (formalina) per verificar que es compleixen les especificacions tècniques de puresa i concentració (37% en pes). També s'hi realitzen tasques de suport a la recerca i optimització del catalitzador d'òxid de ferro i molibdè.

### 1.5.10 Oficines (A-1000)

Aquesta zona està destinada a la gestió administrativa i corporativa de l'empresa. Aquí es coordinen les operacions de compra de reactius, la gestió de vendes del producte acabat, la relació amb proveïdors i la planificació logística de la planta. També acull els departaments de recursos humans i direcció tècnica.

### 1.5.11 Zona treballadors (A-1100)

És l'espai exclusiu per al descans i el benestar del personal operatiu i administratiu. Inclou el menjador, els vestuaris i les àrees de descans. Està dissenyada per permetre que els treballadors puguin fer les pauses corresponents i preparar-se amb la indumentària i els equips de protecció individual (EPIs) adequats abans d'accedir a les zones de procés.

### 1.5.12 Taller de manteniment (A-1200)

Aquesta àrea està equipada amb totes les eines i recanvis necessaris per assegurar la continuïtat operativa de la planta. El personal tècnic realitza aquí el manteniment preventiu i correctiu dels equips de procés (bombes, compressors, vàlvules i intercanviadors).

### 1.5.13 Zona de càrrega de residus (A-1300)

Zona dedicada a la gestió i emmagatzematge temporal dels residus generats a la planta per al seu posterior tractament extern. Es manté separada de l'àrea A-800 per evitar contaminacions creuades. Els residus, tant sòlids (com el catalitzador esgotat) com líquids, es classifiquen i s'etiqueten segons la seva perillositat abans de ser retirats per empreses autoritzades de gestió mediambiental.

### 1.5.14 Tractament de gasos (A-1400)

Com a mesura de protecció ambiental indispensable, i per garantir el compliment normatiu de les emissions atmosfèriques establertes a l'Autorització Ambiental Integrada, l'efluent de gasos d'escapament de la columna d'absorció secundària (CA-402) es canalitza cap a la unitat de tractament CATOX-1401 abans del seu abocament a l'exterior. Tot i que aquest corrent, amb un cabal volumètric nominal de 73.090 m<sup>3</sup>/h, està format fonamentalment per gasos inerts (nitrogen i oxigen no consumit), conté subproductes ineludibles de reaccions secundàries i ineficiències de separació, com ara monòxid de carboni (CO), dimetilèter (DME) i àcid fòrmic, juntament amb traces restants de metanol i formaldehid.

Davant la naturalesa i l'elevat cabal d'aquests contaminants, l'enginyeria especialitzada Anguil Environmental Systems subministrarà i implementarà una unitat d'Oxidació Catalítica (CatOx). Aquesta tecnologia basa la seva eficiència en forçar el pas dels gasos a través d'un llit de monòlits ceràmics impregnats amb metalls nobles, concretament platí (Pt). L'acció catalítica del platí disminueix dràsticament l'energia d'activació necessària per a la reacció de combustió, permetent l'oxidació completa dels compostos orgànics volàtils (COVs) i del CO a diòxid de carboni (CO<sub>2</sub>) i vapor d'aigua operant en un rang tèrmic de 350-400 °C. Això suposa un gran avantatge econòmic i operatiu en comparació amb els 800 °C requerits per a una oxidació tèrmica convencional, ja que minimitza exponencialment el consum de gas natural auxiliar i, termodinàmicament, evita la generació d'òxids de nitrogen (NOx).

A nivell d'implantació, la unitat s'instal·larà a l'exterior com un mòdul compacte integrat (skid custom-engineered) amb una ocupació en planta de 60-80 m<sup>2</sup>. Aquest mòdul està format per un ventilador d'impulsió (blower) per vèncer la pèrdua de càrrega, i un bescanviador de calor recuperatiu intern amb un 70% d'eficiència, el qual aprofita l'alta temperatura dels gasos sortints per preescalfar els gasos d'entrada a la unitat. El sistema es completa amb el vas de reacció

catalítica, un panell de control autònom i una xemeneia d'acer (d'entre 15 i 30 metres d'alçada) que incorpora un Sistema de Monitorització d'Emissions en Continu (CEMS) per validar tècnicament i legalment que l'eficiència de destrucció es manté sistemàticament per sobre del 99,0%.

### 1.5.15 Planta Pilot (A-1500)

La planta pilot és una unitat a petita escala destinada a la simulació i l'assaig de noves condicions operatives. Aquí es poden realitzar proves d'escalat de la reacció d'oxidació catalítica sense interferir en la producció industrial principal. És un espai clau per a la innovació, on s'avaluen millores en l'eficiència del procés o la vida útil dels nous lots de catalitzador abans de la seva implementació al reactor R-301.

### 1.5.16 Protecció contra incendis (A-1600)

#### 1.5.16.1 Sistema de Protecció Contra Incendis i Seguretat

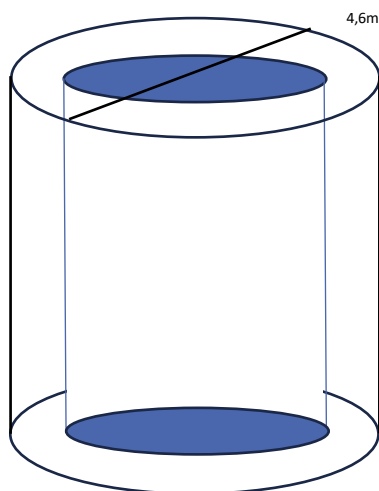
La seguretat i la protecció contra incendis constitueixen un eix fonamental en el disseny de la planta MethaForm, atès que el procés requereix manipular grans volums de metanol un líquid altament inflamable i volàtil a temperatures de reacció elevades. Per fer front a aquests riscos, s'ha dissenyat un sistema integral que compleix estrictament amb el Reglament de Seguretat Contra Incendis en els Establiments Industrials (RSCIEI) i la norma UNE 23500.

Un dels escenaris més crítics definits a l'avaluació de riscos és el possible sobreescalfament del reactor R-301 a l'àrea A-300, el qual podria derivar en una reacció tèrmica descontrolada. Com a mesura de contenció i refredament d'emergència, s'ha projectat un sistema d'aigua polvoritzada (cortina de diluvi) instal·lat directament sobre el reactor i els equips adjacents. En cas de detectar-se un excés perillós de temperatura, aquest sistema s'activa descarregant un cabal massiu de 2.200 l/min d'aigua directament sobre la carcassa d'acer, dissipant la calor acumulada, evitant el col·lapse estructural i ofegant qualsevol possible conat d'incendi a la zona de reacció.

El sistema definitiu es redueix a 2 anells de canonada de 3" (DN80) separats 10 cm de la carcassa (diàmetre de l'anell de 4,60 m):

- Anell Superior (16 Broquets en total): Alterna 8 broquets de con ple per a la tapa superior (orientats 45° amunt/endins) i 8 broquets de ventall per al cos (45° avall/endins).
- Anell Inferior (6 Broquets en total): Compta amb 6 broquets de con ple d'alt cabal orientats 45° cap amunt i cap al centre per inundar la base inferior i protegir la sortida de producte.

A la *Figura 1.7*, podem veure una representació gràfica del sistema d'aigua polvoritzada (cortina de diluvi).



*Figura 1.7: Sistema diluvi de superfície total*

#### 1.5.16.2 Reserva d'aigua i xarxa d'extinció

Per garantir l'abastament constant a tots els sistemes d'extinció actius en el pitjor escenari possible (incendi a l'àrea del reactor amb activació simultània del sistema de polvorització, boques d'incendi i hidrants exteriors), s'ha dimensionat una bassa de reserva d'aigua dedicada exclusivament a emergències.

D'acord amb els càlculs establerts, aquesta bassa té un volum total de  $450 \text{ m}^3$ , quantitat que assegura una autonomia ininterrompuda de 120 minuts operant al cabal simultani màxim de disseny ( $3.520 \text{ l/min}$ ). Constructivament, s'ha optat per una solució mixta semisoterrada: una excavació d'1,5 a 2,0 metres amb un mur perimetral de formigó armat que s'eleva 1,5 metres sobre la rasant. Aquest disseny actua com a pantalla tèrmica contra la radiació d'un incendi i aprofita la inèrcia del terreny per mantenir l'aigua a una temperatura estable d'entre  $10$  i  $15^\circ\text{C}$ , evitant el risc de gelades a l'hivern i la proliferació d'algues a l'estiu.

A partir del grup de bombeig principal, l'aigua es distribueix a la xarxa de la planta, la qual compta amb:

- 10 hidrants exteriors (DN100) disposats de forma perimetral per facilitar l'ancoratge i l'actuació dels camions de bombers externs.
- 6 Boques d'Incendi Equipades (BIE) de 45 mm ubicades a les zones de procés de més alt risc i àrees classificades ATEX.
- 4 Boques d'Incendi Equipades (BIE) de 25 mm instal·lades a les àrees auxiliars i administratives, ja que són de manipulació més senzilla per al personal.

### 1.5.16.3 Disponibilitat i tipologia d'extintors

El tractament dels possibles focs a la planta requereix l'ús d'agents extintors específics, ja que l'ús indiscriminat d'aigua pot ser ineficaç o fins i tot propagar les flames. S'han distribuït extintors estratègicament en funció del risc inherent de cada àrea:

- Focs de Classe B (Metanol/Formaldehid): Atès que el metanol és un dissolvent polar (es barreja fàcilment amb l'aigua), és obligatori l'ús d'escumes especials antialcohol (AR-AFFF). Aquesta escuma crea una crosta gruixuda que sura sobre el líquid inflamable, aïllant els vapors de l'oxigen i ofegant l'incendi de manera eficaç.
- Focs d'origen elèctric: A les sales de control, motors i quadres de connexió (focs on l'ús d'aigua o escuma comportaria risc d'electrocució), s'han disposat extintors de diòxid de carboni (CO<sub>2</sub>) o gasos nets. Aquests equips ofeguen el foc desplaçant l'oxigen i es ventilen ràpidament sense deixar residus que puguin malmetre els equips electrònics sensibles.

### 1.5.16.4 Senyalització de seguretat

Per tal de garantir una resposta ràpida i instintiva davant d'una emergència, s'ha implementat un pla de senyalització estricte. Tots els mitjans de lluita contra incendis es troben perfectament localitzables mitjançant senyals visuals en forma de panell. Aquests panells tenen forma quadrada o rectangular, utilitzant un color de fons vermell de seguretat amb el pictograma contrastat en color blanc, donant compliment al Reial Decret 485/1997.

## 1.6. Planificació temporal

Per a la planta de producció de formaldehid de MethaForm al Polígon Industrial "Satèl·lits" de Tarragona, s'ha desenvolupat un cronograma d'activitats estructurat que contempla des de l'enginyeria bàsica fins al lliurament de la instal·lació en estat operatiu (veure *Taula 1.12*).

*Taula 1.12 Planificació temporal detallada de la construcció de la planta de formaldehid*

| Nº tasca | Tasca                                      | Durada (dies) | Precedència | Observacions tècniques aplicades al projecte                                                    |
|----------|--------------------------------------------|---------------|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| A        | Enginyeria bàsica del projecte             | 60            | 0:A         | Definició de PFD, balanços de matèria.                                                          |
| B        | Obtenció de llicències i permisos          | 135           | 0:B         | Tramitació del pla de seguretat Seveso III.                                                     |
| C        | Enginyeria de detall del projecte          | 120           | A:C         | Disseny d'equips (R-301, columnes, tancs) i plànols de canonades (P&ID).                        |
| D        | Especificació i demanda d'equips           | 120           | C:D         | Compra del reactor multitubular R-301, bufadors principals i catalitzador MOC5.                 |
| E        | Adequació i neteja del terreny             | 30            | B:E         | Preparació de la parcel·la al Polígon Industrial "Satèl·lits".                                  |
| F        | Excavacions i execució de cimentacions     | 60            | E:F         | Cimentació especial per a estructures pesants.                                                  |
| G        | Instal·lació de xarxes de subministraments | 30            | F:G         | Escomeses d'aigua de xarxa, electricitat de mitjana tensió i accessos principals.               |
| H        | Vies de circulació internes i voreres      | 30            | F:H         | Urbanització interna de la parcel·la per al trànsit de vehicles pesants.                        |
| I        | Zona d'aparcament i accessos de personal   | 10            | F:I         | Pavimentació de zones comunes i accessos de seguretat.                                          |
| J        | Construcció d'oficines i laboratori        | 90            | G:J         | Edificis administratius i sales de control analític per al control de qualitat de la formalina. |

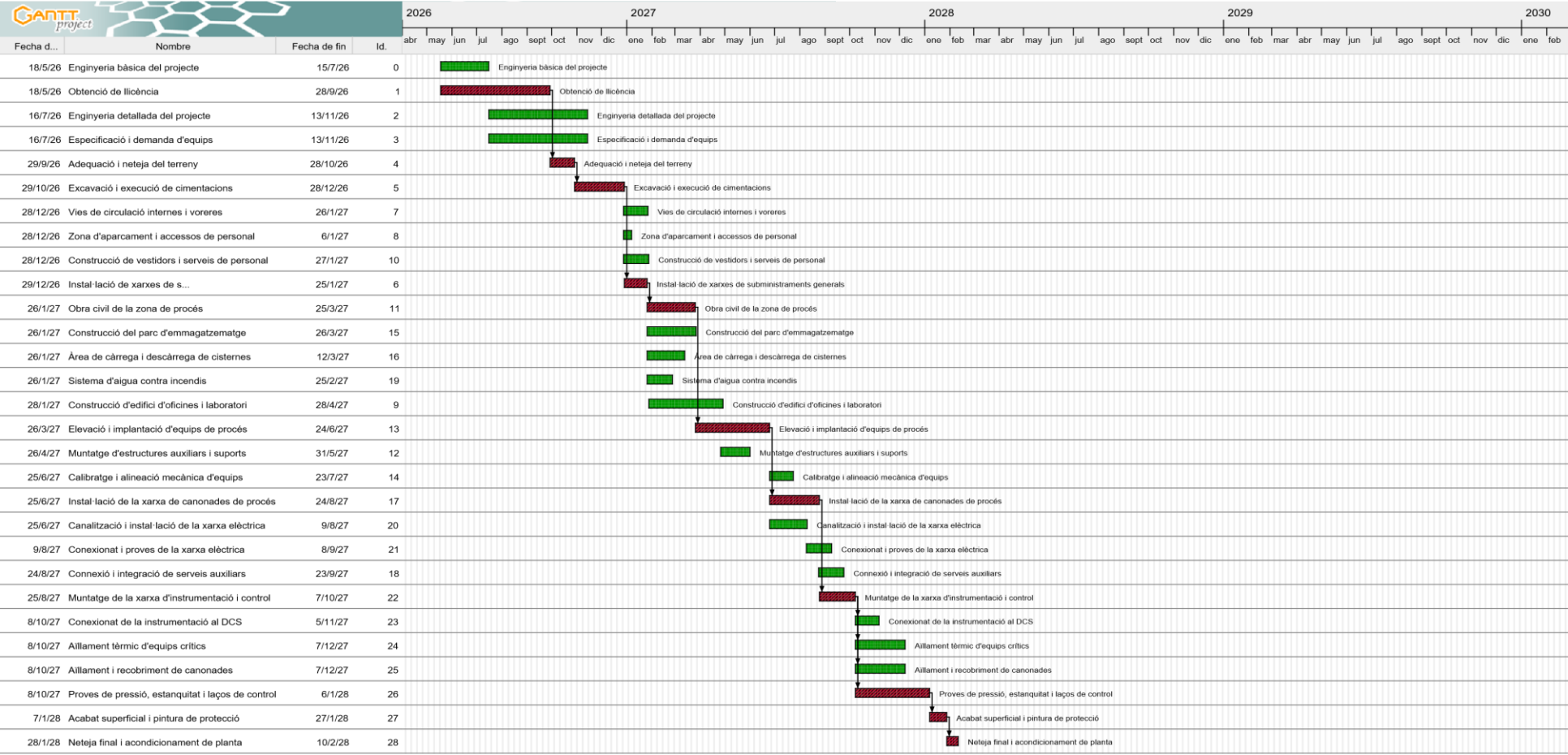
|    |                                                 |    |           |                                                                                                 |
|----|-------------------------------------------------|----|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| K  | Construcció de vestidors i serveis              | 30 | G:K       | Infraestructures higièniques i de seguretat per als operaris de planta.                         |
| L  | Obra civil de la zona de procés                 | 60 | G:L       | Bancades de formigó per al reactor, estructura de la torre d'absorció i oxidador tèrmic.        |
| M  | Muntatge d'estructures auxiliars i suports      | 35 | J-L:M     | Instal·lació de racks de canonades (pipe racks), escales i plataformes d'operació.              |
| N  | Elevació i implantació d'equips de procés       | 90 | L:N       | Muntatge del reactor R-301, la columna d'absorció.                                              |
| O  | Calibratge i alineació mecànica d'equips        | 30 | N:O       | Verificació de toleràncies en bufadors, bombes de procés i anivellament de torres.              |
| P  | Construcció del parc d'emmagatzematge           | 60 | G:P       | Construcció dels tancs i la seva cubeta de retenció.                                            |
| Q  | Àrea de càrrega i descàrrega de cisternes       | 45 | G:Q       | Molls de càrrega per a camions cisterna d'expedició a granel (33 Tn).                           |
| R  | Instal·lació de la xarxa de canonades de procés | 60 | N,P,Q:R   | Estesa de línies de procés.                                                                     |
| S  | Soldadura i connexió final de línies            | 30 | R:S       | Radiografiat de juntes i connexions mecàniques bridades de la línia de procés.                  |
| T  | Canonades de serveis auxiliars                  | 60 | N,P,Q:T   | Xarxes de distribució de nitrogen per a inertització.                                           |
| U  | Connexió i integració de serveis auxiliars      | 30 | T:U       | Acoblament de línies a les camises de refrigeració i serveis dels tancs.                        |
| V  | Sistema d'aigua contra incendis                 | 30 | G:V       | Dipòsit d'emmagatzematge d'aigua i xarxa d'hidrants segons normativa de seguretat.              |
| W  | Canalització i instal·lació elèctrica           | 45 | J,N:W     | Estesa de cables de potència i subestació transformadora.                                       |
| X  | Connexionat i proves de la xarxa elèctrica      | 30 | W:X       | Proves d'aïllament i comprovació del sentit de gir de motors.                                   |
| Y  | Muntatge de la xarxa d'instrumentació i control | 45 | N,R,T,W:Y | Instal·lació de termoparells, analitzadors d'O <sub>2</sub> , cabalímetres i llaços de control. |
| Z  | Cablejat de la instrumentació al DCS            | 30 | Y:Z       | Cablejat de senyals cap a la sala de control central.                                           |
| AA | Aïllament tèrmic d'equips crítics               | 30 | Z:AA      | Aïllar els equips més sensibles a canvis de temperatura.                                        |
| AB | Aïllament i recobriments de canonades           | 30 | Z:AA      | Aïllament de les línies d'oli tèrmic Dowtherm-A per evitar pèrdues d'energia.                   |
| AC | Probes de pressió, estanquitat i llaços         | 30 | AA,AB:AC  | Prova hidràulica dels tancs API 650, bufat de canonades i test en fred de llaços de control.    |
| AD | Acabat superficial i pintura de protecció       | 20 | AC:AD     | Pintura anticorrosiva d'estructures, senyalització de canonades segons codi de colors.          |
| AE | Neteja final, de planta                         | 15 | AD:AE     | Retirada de residus d'obra, neteja interna.                                                     |

Per dur a terme aquesta planificació, es defineixen totes les tasques requerides, la seva durada estimada en dies naturals i les relacions de precedència tècnica. Aquesta precedència determina l'encadenament lògic del camí crític, garantint que operacions estructurals com la fonamentació o l'estesa de canonades de procés respectin estrictament els condicionants físics i de seguretat de l'obra civil.

A partir d'aquest desglossament sistemàtic de tasques, s'estructura el diagrama de Gantt del projecte, el qual determina un temps total estimat d'execució d'obra, muntatge i comissionat de 20 mesos i 25 dies des de la intervenció inicial a la parcel·la fins al lliurament de la planta en condicions per a la càrrega del catalitzador de ferro-molibdè i l'inici de l'operació.

# MethaForm 37% Formaldehid

## Diagrama de Gantt



## 1.7. Bibliografia

- [1] Ajuntament de Tarragona. (2013). *Pla d'Ordenació Urbanística Municipal (POUM) de Tarragona*. Normativa urbanística sectorial per a la regulació de sòl industrial  
<http://www.tarragona.cat/urbanisme/poum>
- [2] Anguil Environmental Systems. (2024). *Catalytic Oxidizer (CATOX) Systems: Technical specifications and operational parameters for VOC abatement in chemical manufacturing*. Anguil Industrial Publications.  
<https://anguil.com/oxidizers/catalytic-oxidizers/>
- [3] Atlas Copco. (2023). *Oil-free rotary tooth compressors: ZT 15-22 and ZR 15-22 series product handbook*. Atlas Copco Industrial Air Division.  
<https://www.atlascopco.com>
- [4] Baltimore Aircoil Company. (2022). *Evaporative cooling systems and closed circuit cooling towers: Product selection guide and thermal performance data*. BAC Technical Documents.  
<https://baltimoreaircoil.eu>
- [5] Carbueros Metálicos. (2023). *Sistemas d'inertització, blanketing i subministrament de nitrogen criogènic per a la seguretat en el sector petroquímic*. Carbueros Metálicos, Grupo Air Products.  
<https://www.carbueros.com>
- [6] European Chemicals Agency (ECHA). (2026). *Registration Dossier: Methanol (EC 200-659-6, CAS 67-56-1)*. Substance evaluation and toxicological profile.  
<https://echa.europa.eu>
- [7] European Chemicals Agency (ECHA). (2026). *Registration Dossier: Formaldehyde (EC 200-001-8, CAS 50-00-0)*. Harmonized classification and restrictions.  
<https://echa.europa.eu>
- [8] Fogler, H. S. (2016). *Elements of Chemical Reaction Engineering* (5a ed.). Prentice Hall.  
Green, D. W., & Southard, M. Z. (Eds.). (2018). *Perry's Chemical Engineers' Handbook* (9a ed.). McGraw-Hill Education.
- [9] Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST). (2024). *Límites de exposición profesional para agentes químicos en España*. Ministerio de Trabajo y Economía Social, Gobierno de España.
- [10] International Society of Automation (ISA). (2009). *ANSI/ISA-5.1-2009: Instrumentation Symbols and Identification*. ISA Services.
- [11] Levenspiel, O. (1999). *Chemical Reaction Engineering* (3a ed.). John Wiley & Sons.

- [12] Linstrom, P. J., & Mallard, W. G. (Eds.). (2026). *NIST Chemistry WebBook (NIST Standard Reference Database Number 69)*. National Institute of Standards and Technology.  
<https://webbook.nist.gov>
- [13] Pirobloc, S.A. (2021). *Calderas de fluido térmico industriales: Manual técnico y especificaciones de la serie GTF para aceites sintéticos*. Pirobloc Thermal Engineering.  
<https://www.pirobloc.com>
- [14] Reial Decret 379/2001, de 6 d'abril, pel qual s'aprova el Reglament d'emmagatzematge de productes químics i les seves instruccions tècniques complementàries MIE APQ-01 a MIE APQ 07. *Boletín Oficial del Estado*, núm. 112, de 10 de maig de 2001.
- [15] Reial Decret 485/1997, de 14 d'abril, sobre disposicions mínimes en matèria de senyalització de seguretat i salut en el treball. *Boletín Oficial del Estado*, núm. 97, de 23 d'abril de 1997.
- [16] Reuss, G., Disteldorf, W., Gamer, A. O., & Hilt, A. (2000). Formaldehyde. A *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. Wiley-VCH.  
[https://doi.org/10.1002/14356007.a11\\_619](https://doi.org/10.1002/14356007.a11_619)
- [17] Routray, K., Aston, W., & Wachs, I. E. (2010). The nature of the active site for the oxidation of methanol to formaldehyde on iron molybdate catalysts. *Journal of Catalysis*, 275(1), 85-98.  
<https://doi.org/10.1016/j.jcat.2010.07.014>
- [18] Schneider Electric. (2022). *Minera EcoDesign: Liquid-immersed three-phase transformers for industrial distribution applications*. Schneider Technical Catalog.  
<https://www.se.com>
- [19] Smith, J. M., Van Ness, H. C., & Abbott, M. M. (2005). *Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics* (7a ed.). McGraw-Hill.
- [20] Sulzer Chemtech. (2020). *Mass transfer components and high-performance structured packings: Mellapak and MellapakPlus engineering handbook*. Sulzer Management Ltd.  
<https://www.sulzer.com>
- [21] Towler, G., & Sinnott, R. (2013). *Chemical Engineering Design: Principles, Practice and Economics of Plant and Process Design* (2a ed.). Butterworth-Heinemann.
- [22] United States Environmental Protection Agency (EPA). (2020). *Clean Air Technology Center: Catalytic oxidizers for volatile organic compound control*. EPA Technical Report.  
<https://www.epa.gov/catc>
- [23] Wachs, I. E. (2013). Catalyst design for selective oxidation of methanol to formaldehyde by supported metal oxide catalysts. *Catalysis Today*, 200(1), 2-9.  
<https://doi.org/10.1016/j.cattod.2012.04.053>