

UAB

Universitat Autònoma
de Barcelona



METAFORM

DE METANOL A FORMOL | INNOVACIÓN QUÍMICA

Planta de Producció de Formaldehid

Treball de Fi de Grau

Juny 2026

AUTORES

Arcadi Baró Orfila
Guillem Casals Sendra
Roc Rossello Fonollosa
Sandro Alcantara Márquez
Javier Jaenes Fernández
Àlex Cabrera Sánchez

TUTOR

Rafa Bosch Palacios



UAB

Universitat Autònoma
de Barcelona



METAFORM

DE METANOL A FORMOL | INNOVACIÓN QUÍMICA

Planta de Producció de Formaldehid

Treball de Fi de Grau

Juny 2026

CAPÍTOL 1.

ESPECIFICACIONS DEL PROJECTE



Taula de Contingut

1. Especificacions del Projecte

1.1 Definició del projecte	6
1.1.1. Bases del projecte	6
1.1.1.1. Objectiu de producció	6
1.1.2. Abast del projecte	8
1.1.3. Localització de la planta	9
1.1.3.1. Ubicació i parcel·la	9
1.1.3.2. Paràmetres d'edificació (normativa urbanística)	10
1.1.3.3. Serveis disponibles a planta	10
1.1.3.4. Comunicacions i accessibilitat	11
1.1.3.5. Característiques del medi físic.....	11
1.2. Compostos implicats en el procés.....	12
1.2.1. Matèries primeres	12
1.2.1.1. Metanol (CH_3OH)	12
1.2.1.2. Aire (O_2 i N_2)	14
1.2.1.3. Aigua de procés (desmineralitzada).....	15
1.2.1.4. Catalitzador $\text{Fe}_2(\text{MoO}_4)_3$ (Ferro molibdat)	16
1.2.1.5. Fluids auxiliars.....	17
1.2.2. Producte final	19
1.2.2.1. Formaldehid en solució aquosa (formalina)	19
1.2.3. Subproductes i emissions.....	20
1.2.3.1. Gasos de cua.....	20
1.2.3.2. Aigües residuals.....	21
1.2.3.3. Residus sòlids	22
1.3. Descripció general del procés de producció	22
1.3.1. Mètode de fabricació (procés FORMOX)	22
1.3.2. Diagrames de flux.....	23
1.3.2.1 Diagrama de Blocs	24
1.3.2.2 Diagrama de Process	25
1.3.3. Selecció d'equips principals	26

1.3.4. Descripció per etapes del procés	27
1.3.4.1. Emmagatzematge i alimentació de metanol (Àrea 100).....	27
1.3.4.2. Evaporació del metanol i mescla amb aire (Àrea 200)	27
1.3.4.3. Reacció catalítica (Àrea 300)	28
1.3.4.4. Refrigeració i recuperació de calor	28
1.3.4.5. Absorció del formaldehid (Àrea 400).....	28
1.3.4.6. Estabilització de la formalina	29
1.3.4.7. Tractament de gasos de cua (Àrea 500)	29
1.3.4.8. Emmagatzematge i expedició de formalina (Àrea 600)	29
1.3.4.9. Serveis auxiliars (Àrea 700 i 900)	30
1.3.5. Integració tèrmica i eficiència energètica	30
1.3.6. Consideracions de seguretat i medi ambient.....	30
1.4. Balanç de matèria	31
1.4.1. Corrents del procés.....	31
1.4.2. Balanç de matèria global	35
1.5. Balanç d'energia.....	36
1.5.1. Calor de reacció.....	36
1.5.2. Necessitats tèrmiques dels equips principals	36
1.5.3. Sistemes de calefacció.....	37
1.5.4. Sistemes de refrigeració	37
1.5.5. Consum elèctric d'altres equips.....	38
1.5.6. Conclusions del balanç d'energia.....	38
1.6. Constitució de la planta i descripció d'àrees	39
1.6.1. Àrea A-100: Emmagatzematge de metanol.....	42
1.6.2. Àrea A-200: Evaporació i mescla	43
1.6.3. Àrea A-300: Reacció (reactor R-301)	43
1.6.4. Àrea A-400: Absorció i estabilització	44
1.6.5. Àrea A-500: Tractament de gasos de cua	44
1.6.6. Àrea A-600: Emmagatzematge de formaldehid (producte final)	45
1.6.7. Àrea A-700: Serveis auxiliars	45
1.6.8. Àrea A-800: Calderes (detall complementari)	46

1.6.9. Àrea A-900: Torres de refrigeració.....	46
1.6.10. Àrea A-1000: Protecció contra incendis	46
1.6.11. Àrea A-1100: Aparcament	47
1.6.12. Àrea A-1200: Oficines, laboratoris, sala de control, taller i altres	47
1.6.13. Àrea A-1300: Logística i expedició (cargadero).....	47
1.7. Especificacions i necessitats de serveis.....	48
1.7.1. Electricitat	48
1.7.2. Vapor	48
1.7.3. Aigua de refrigeració.....	48
1.7.4. Aigua glicolada.....	48
1.7.5. Aire comprimit	49
1.7.6. Nitrogen	49
1.7.7. Gas natural.....	49
1.7.8. Aigua de xarxa i aigua contra incendis.....	49
1.8. Organització de l'empresa i personal	50
1.8.1. Estructura departamental.....	50
1.8.2. Personal necessari en planta	50
1.8.3. Torns de treball	50
1.9. Planificació temporal de la construcció	51
1.9.1. Llista de tasques, durades i precedències	51
1.9.2. Diagrama de Gantt de la construcció.....	52
1.9.3. Identificació del camí crític	56
1.10. Bibliografia	57

1. Especificacions del Projecte

1.1 Definició del projecte

El present projecte té com a objectiu el disseny conceptual, l'enginyeria bàsica i la viabilitat tècnica, econòmica i ambiental d'una planta industrial de producció de formaldehid mitjançant el procés FORMOX. La instal·lació s'ubica al Polígon Industrial "Satèl·lits" de Tarragona, dins del complex petroquímic, i està concebuda per operar en règim continu 330 dies a l'any, 24 hores diàries, amb una capacitat nominal de 100.000 tones anuals de formaldehid en solució aquosa al 37% en pes, estabilitzada amb un 7% de metanol.

La planta subministrarà formalina d'alta puresa a la indústria de resines, adobs, plaguicides i materials de construcció, així com a la producció de derivats com la melamina formaldehid i el fenol formaldehid. La formulació final (37% HCHO + 7% MeOH) compleix els estàndards comercials europeus i permet l'emmagatzematge estable a temperatura ambient sense risc de polimerització espontània.

A continuació es desenvolupen les bases del projecte, l'abast detallat, la localització amb tots els seus condicionants (edificació, serveis, accessos, climatologia, sismologia) i la nomenclatura emprada.

1.1.1. Bases del projecte

1.1.1.1. Objectiu de producció

La planta s'ha dimensionat per a una producció anual de 100.000 tones de formaldehid (expressat com a formaldehid anhidre). Considerant una solució aquosa al 37% en pes (formolina comercial), el corrent de producte final és de 270.270 t/any de formalina. El factor de conversió és:

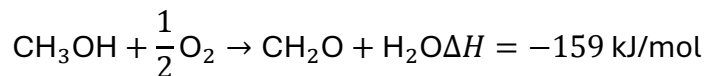
$$\text{Formalina (37\%)} = \frac{100.000}{0,37} \approx 270.270 \text{ t/any}$$

El règim d'operació continu és de 330 dies/any (7.920 h/any), resulta un cabal màssic de producte final de 34.125 kg/h (equivalent a 12.626 kg/h de formaldehid anhidre). La planta disposa de dues parades tècniques programades anuals (estiu i Nadal) que sumen 35 dies d'aturada, destinades a manteniment preventiu, neteja i substitució de catalitzador.

1.1.1.2. Tecnologia de procés: FORMOX

El procés FORMOX (Formaldehyde Oxidation) és la tecnologia industrial consolidada per a l'obtenció de formaldehid a partir de metanol. Es basa en l'oxidació catalítica en fase gas sobre un llit fix de $\text{Fe}_2(\text{MoO}_4)_3$ (ferro molibdat), que opera en condicions isoterms (300 °C) per maximitzar la selectivitat cap a formaldehid (superior al 95%) i minimitzar la

formació de subproductes (CO, CO₂, àcid fòrmic). La reacció principal és fortament exotèrmica:



El calor generat (6622 kW en condicions nominals) s'extreu mitjançant un sistema de refrigeració integrat (aigua de torre o oli tèrmic) que manté la temperatura estable i permet la recuperació energètica per a la precalificació del metanol abans del reactor.

1.1.1.3. Matèries primeres i serveis

Les matèries primeres principals són:

- **Metanol** (puresa ≥98%): s'emmagatzema en sis tancs de 200 m³ (autonomia de 7 dies), subministrat per camions cisterna
- **Aire**: captat de l'atmosfera, filtrat i assecat mitjançant bufadors centrífugs (2 × 1000 kW) i filtres absoluts.
- **Aigua desmineralitzada**: per a l'absorció del formaldehid i per als circuits de refrigeració.
- **Catalitzador Fe₂(MoO₄)₃**: càrrega inicial de 3.990 kg distribuïda en 4.266 tubs del reactor; vida útil de 18-24 mesos.
- **Nitrogen**: generat in situ per a inertització de tancs i purga de línies.
- **Fluids tèrmics**:
 - **Dowtherm A** (oli tèrmic) per a preescalfament del reactor i intercanviadors I-201 i I-501.
 - **Aigua glicolada (40%)** per a refrigeració final del producte.

Taula 1. Condicions operatives del procés

Paràmetre	Valor
Pressió reactor	2 atm (absoluta)
Temperatura reactor	300 °C (entrada i sortida)
Cabal metanol fresc	5.047 kg/h
Cabal aire de procés	40.936 kg/h (≈34.113 m ³ /h a 25 °C i 1,01 bar)
Relació aire/metanol	>36,5% v/v (per sobre del límit superior d'explosivitat)
Cabal aigua d'absorció	9.850 kg/h
Cabal metanol d'estabilització	883,8 kg/h
Concentració producte final	37% HCHO, 7% MeOH, resta aigua

1.1.1.5. Sostenibilitat i eficiència

La planta integra diverses mesures de sostenibilitat:

- **Integració tèrmica:** la corrent calenta de sortida del reactor (300 °C) s'utilitza per preescalfar i evaporar el metanol d'alimentació a l'intercanviador E-202, reduint el consum de vapor de la caldera CV-701.
- **Tractament de gasos de cua:** un reactor catalític oxidatiu (RC-501) amb catalitzador de Pt/Pd elimina el metanol residual i el CO (>99,9% d'eficiència), complint amb el BREF LVOC ^[3] (metanol <20 mg/Nm³, formaldehid <5 mg/Nm³).
- **Inertització segura:** els tancs d'emmagatzematge disposen de blanketing de nitrogen amb control d'oxigen (alarma a >8% O₂) per evitar atmosferes explosives.
- **Baix consum d'aigua:** el circuit d'absorció es tanca pràcticament (l'aigua s'incorpora al producte) i les torres de refrigeració operen amb aigua descalcificada per minimitzar purgues.

1.1.2. Abast del projecte

El projecte desenvolupat té com a objectiu el disseny d'una planta de producció de formaldehid a partir de metanol, incorporant tots els elements necessaris per garantir una operació segura, eficient i tècnicament viable. Per tal d'assolir aquest objectiu, el projecte engloba els aspectes següents:

- Disseny del procés productiu mitjançant l'elaboració dels diagrames de procés i dels balanços de matèria i energia.
- Disseny, selecció i dimensionament dels principals equips de procés necessaris per a la producció de formaldehid.
- Disseny de les instal·lacions d'emmagatzematge de matèries primeres i producte acabat.
- Estudi, disseny i especificació de les canonades, vàlvules, bombes i equips auxiliars requerits per al funcionament de la planta.
- Disseny dels sistemes d'instrumentació, control i automatització necessaris per a la supervisió i regulació del procés.
- Disseny dels serveis auxiliars associats a la instal·lació, incloent-hi els sistemes de vapor, refrigeració, aire comprimit, nitrogen i subministrament energètic.
- Estudi dels aspectes de seguretat industrial, protecció contra incendis, prevenció de riscos laborals i classificació d'àrees ATEX.

- Avaluació de l'impacte ambiental de la instal·lació i definició de les mesures de control d'emissions i gestió de residus.
- Elaboració dels procediments d'operació, posada en marxa, parada i manteniment de la planta.
- Disseny de les àrees auxiliars necessàries per al correcte funcionament de la instal·lació, incloent-hi laboratoris, sala de control, taller de manteniment, oficines i serveis al personal.
- Estudi de les operacions logístiques associades a la recepció de matèries primeres, l'emmagatzematge intermedi i l'expedició del producte final.
- Realització de l'avaluació econòmica del projecte, incloent-hi la inversió inicial, els costos d'operació i l'anàlisi de viabilitat.
- Realització d'un estudi de mercat que permeti contextualitzar la producció prevista dins del sector del formaldehid.

L'abast definit proporciona una visió global dels aspectes necessaris per al desenvolupament i futura operació de la planta, els quals es desenvolupen detalladament en els capítols corresponents de la memòria.

1.1.3. Localització de la planta

1.1.3.1. Ubicació i parcel·la

La planta de producció de formaldehid s'implantarà al Polígon Industrial Satèl·lits, situat dins del Polígon Petroquímic de Tarragona, una de les principals àrees industrials del sector químic de la península. L'emplaçament s'ha escollit per la seva posició estratègica, que permet disposar d'un accés directe a infraestructures logístiques de gran importància, com el Port de Tarragona, principal punt d'entrada del metanol importat, la xarxa de canonades de productes químics gestionada per Rak Dixquímics i les principals vies de comunicació terrestre, entre les quals destaquen l'AP-7, l'A-7, la N-340 i la T-11.

La parcel·la destinada al projecte té una superfície total de 53.720 m². D'aquesta, 16.732 m² es reserven per a les instal·lacions pròpies del procés de producció de formaldehid, mentre que els 5.475 m² restants corresponen a espais comuns compartits amb altres empreses del holding, incloent-hi oficines, laboratoris, vestidors i menjador. Per a més informació referent a les dimensions de la planta i la seua futura disposició, veure el capítol 10. Planols.

1.1.3.2. Paràmetres d'edificació (normativa urbanística)

El projecte s'ha d'ajustar a la normativa urbanística del municipi de Tarragona. Els paràmetres obligatoris es resumeixen a la Taula 2.

Taula 2. Condicions d'implantació i restriccions urbanístiques de la parcel·la

Paràmetre	Valor	Base normativa / Observació
Superfície total de la parcel·la	53.720 m ²	Dades del plànol de la parcel·la (capítol 1)
Edificabilitat neta	1,5 m ² sostre / m ² sòl	Normativa urbanística del polígon "Satèl·lits"
Ocupació màxima del sòl	75% (≈ 40.290 m ²)	Límit superior d'ocupació
Ocupació mínima del sòl	20% de l'ocupació màxima (≈ 8.058 m ²)	Garantia d'espais lliures
Franja de reculada a vials i veïns	5 m	Separació de límit de parcel·la
Separació mínima entre edificis	1/3 de l'altura de l'edifici més alt (mínim 5 m)	Normativa general
Dotació d'aparcament	1 plaça / 150 m ² construïts	Per a personal propi i visites
Alçada màxima d'edificis administratius	16 m (3 plantes)	Limitació per a oficines, laboratoris, sala de control
Alçada màxima d'equips de procés	Columna T-401: 12 m Reactor R-301: 3,5 m Tanques: 6 m Xemeneia F-1: 25 m	Justificació tècnica (capítol 2 i manual de càlculs)
Distància de seguretat a límits de propietat	25 m	Segons ITC MIE-APQ 7 per a substàncies tòxiques (capítol 5)
Distància entre cubetes de retenció	10 m	Separació entre CB-100 (metanol) i CB-101 (formaldehid) – capítol 5

Per a més informació referent a la disposició de la planta (àrees, ubicacions, plànols esquemes,...) anar al capítol 10. Plànols, on es mostren el repartiment de les àrees superficials que disposa Metaform per a l'elaboració de la planta.

1.1.3.3. Serveis disponibles a planta

La parcel·la disposa de connexions a les xarxes urbanes amb les següents condicions (Taula 3).

Taula 3. Especificacions dels subministraments externs del polígon industrial

Servei / Paràmetre	Característiques tècniques	Observacions / Equip associat
Subministrament elèctric	Línia d'entrada a 20 kV a peu de parcel·la. Espai reservat per a estació transformadora.	Potència elèctrica instal·lada estimada: 1.453 kW. Transformadors TA-701 i TA-702 (400 V / 690 V).
Combustible gas natural	Connexió a mitja pressió: 1,5 kg/cm ² (≈ 1,5 bar).	Alimenta les calderes d'oli tèrmic CO-701 (1.744 kW) i CO-702 (1.453 kW).
Aigua per a extinció d'incendis	Pressió màxima a la connexió: 4 kg/cm ² . Es requereix estació de bombament i dipòsit propi.	Balsa d'incendis dimensionada per a 1 hora d'actuació. Bomba dedicada (≥ 6 bar a la xarxa interior).
Aigua de procés i sanitària	Acometida a 4 kg/cm ² , diàmetre 200 mm.	Tractada amb descalcificador DC-701 abans d'entrar a la columna d'absorció i a les torres de refrigeració.
Capacitat portant del terreny	Resistència mitjana: 2 kg/cm ² mesurada a 1,5 m de profunditat sobre grava.	Considerada en el càlcul de fonaments de tanques (TK-101 a TK-106), reactor R-301 i columna T-401.
Xarxa de clavegueram industrial	Col·lector unitari de 800 mm de diàmetre, situat a 3,5 m de profunditat al centre del carrer.	Connexió per a aigües residuals tractades (prèvia neutralització i separació d'hidrocarburs).

La planta disposarà d'una estació transformadora pròpia per a 400 V i 690 V, d'un sistema de cogeneració (turbina de vapor de contrapressió) per aprofitar l'excedent tèrmic, i d'un dipòsit d'aigua contra incendis de volum suficient per a 1 hora d'actuació.

1.1.3.4. Comunicacions i accessibilitat

La ubicació de la planta dins del polígon petroquímic de Tarragona proporciona una connexió logística molt favorable gràcies a la proximitat de les principals infraestructures de transport de la zona. L'entorn disposa d'una àmplia xarxa viària, connexions ferroviàries per al transport de mercaderies, accés directe al Port de Tarragona i proximitat als aeroports de Reus i Barcelona, fet que garanteix una elevada flexibilitat operativa.

Malgrat aquestes alternatives, la logística prevista per al projecte es basa principalment en el transport per carretera. Tant el subministrament de metanol com l'expedició de la formalina produïda es realitzaran mitjançant camions cisterna, atès que aquesta opció s'adapta adequadament a la capacitat de producció definida i permet una distribució eficient als clients previstos.

No obstant això, el disseny de la planta té en compte la possibilitat d'una futura ampliació de la capacitat productiva. En aquest escenari, es podrien aprofitar altres vies de transport disponibles, com les connexions ferroviàries, les instal·lacions portuàries o la xarxa de canonades del polígon petroquímic, per facilitar tant l'entrada de matèries primeres com la sortida del producte final.

1.1.3.5. Característiques del medi físic

Climatologia

Les dades climatològiques de Tarragona (font: WeatherSpark, estació de Reus) [28] mostren un clima mediterrani amb estius càlids i secs, i hiverns suaus i ventosos.

- **Temperatura mitjana anual:** 17 °C (mínimes hivern 5 °C, màximes estiu 29 °C).
- **Precipitació anual:** 450 mm, amb màxims a l'octubre (50 mm). No es preveuen pluges torrencials que afectin el disseny de drenatges.
- **Velocitat del vent:** mitjana anual 15 km/h, màxima a desembre (17,5 km/h). Per sota del llindar de vent fort (21 km/h), però es tindrà en compte en el dimensionament de la xemeneia F-1 i en l'ancoratge d'estructures lleugeres [27].

Risc d'inundació: el polígon està situat en una zona elevada (cota >50 m), no afectada per inundacions fluvials.

Sismologia

Segons la normativa NCSE-02 ^[5], Tarragona pertany a una zona de perillositat sísmica baixa (acceleració bàsica 0,04 g). Els equips crítics (tancs de gran alçada, columna T-401, reactor R-301) es dimensionaran per resistir forces sísmiques segons el càlcul estructural corresponent, però no es requereixen mesures especials de protecció antisísmica.

1.2. Compostos implicats en el procés

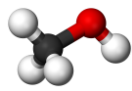
En aquest apartat es descriuen totes les substàncies químiques que intervenen en el procés de producció de formaldehid, incloent-hi les matèries primeres, els productes intermedis, el producte final, els subproductes i els fluids auxiliars. Per a cadascuna s'indiquen les seves propietats físicoquímiques principals, la classificació de perillositat segons el Reglament CLP (CE 1272/2008), els pictogrames de seguretat, les frases H i P, i les condicions d'emmagatzematge i manipulació. Aquesta informació és fonamental per al disseny de les àrees d'emmagatzematge (capítol 2), per a l'avaluació de riscos (capítol 5) i per als protocols d'emergència (capítol 8).

1.2.1. Matèries primeres

1.2.1.1. Metanol (CH_3OH)

El metanol és l'alcohol més senzill i constitueix la matèria primera principal del procés FORMOX. A temperatura ambient és un líquid incolor, volàtil, amb una olor característica lleugerament alcohòlica. És altament inflamable i tòxic per inhalació, ingestió o contacte dèrmic.

Taula 4. Propietats fisicoquímiques del metanol

Propietat	Valor	Observacions
Fórmula molecular	CH ₃ OH	
Aspecte	Líquid incolor	-
Olor	Alcohòlica característica	Llindar d'olor: ≈100 ppm
Punt de fusió	-98 °C	-
Punt d'ebullició	64,7 °C	a 1 atm
Densitat (20 °C)	0,791 g/cm ³	Més lleuger que l'aigua
Massa molar	32,04 g/mol	
Pressió de vapor (20 °C)	12,3 kPa	Volàtil
Punt d'inflamació	12 °C	Líquid inflamable de classe B1 (APQ)
Temperatura d'autoignició	464 °C	-
Límit inferior d'explosivitat (LEL)	6% vol. en aire	-
Límit superior d'explosivitat (UEL)	36,5% vol. en aire	-
Solubilitat en aigua	Miscible	Completament soluble
Coefficient de repartició octanol/aigua (log Pow)	-0,77	Baixa bioacumulació

Taula 5. Classificació CLP del Metanol (Reglament CE 1272/2008):

Classe de perill	Categoria	Frases H
Líquids inflamables	2	H225
Toxicitat aguda (oral, dèrmica, inhalació)	3	H301, H311, H331
Toxicitat específica en òrgans diana – exposició única	1	H370
Pictogrames de Perillositat	  	

Condicions d'emmagatzematge:

- **Tancs:** sis tancs verticals atmosfèrics de superfície (TK-101 a TK-106), cadascun de 200 m³, construïts en acer inoxidable AISI 316L.
- **Pressió:** atmosfèrica (1,01 bar) amb blanket de nitrogen (5-15 mbar) per evitar l'entrada d'aire i la formació d'atmosferes explosives.
- **Temperatura:** ambient (15-25 °C). No es requereix refrigeració activa.
- **Cubeto de retenció:** CB-100, dimensionat per al 100% del volum del tanc més gran (200 m³) més marge, amb revestiment epoxídic.
- **Sistemes de seguretat:** analitzador d'oxigen amb alarma a >8% O₂, vàlvules de pressió/buit (P/V) amb apagallacs (flame arrester), vàlvules de tall automàtic (XV-101 a XV-106) de tipus FC (Fail Close).

Aplicació en el procés:

El metanol s'evapora (E-201/E-202) i es mescla amb aire (Mix-201) abans d'entrar al reactor R-301. El cabal d'alimentació nominal és de **5.047 kg/h** (≈1.400 kg/h de metanol pur equivalent).

1.2.1.2. Aire (O₂ i N₂)

L'aire atmosfèric s'utilitza com a font d'oxigen per a la reacció d'oxidació del metanol. Es capta de l'exterior mitjançant bufadors centrífugs (B-701 i B-702) i es filtra per eliminar partícules sòlides en suspensió.

Taula 6. Composició mitjana de l'aire sec

Component	Fracció molar	Fracció massica
Nitrogen (N₂)	78,08%	75,47%
Oxigen (O₂)	20,95%	23,20%
Argó (Ar)	0,93%	1,28%
Diòxid de carboni (CO₂)	0,04%	0,05%

Taula 7. Propietats fisicoquímiques (com a mescla)

Propietat	Valor
Densitat (20 °C, 1 atm)	1,204 kg/m ³
Viscositat dinàmica (20 °C)	1,82·10 ⁻⁵ Pa·s
Punt de rosada (a pressió de treball)	≤ -40 °C (després de l'assecat)

Classificació CLP:

L'aire no està classificat com a substància perillosa. No obstant això, l'aire comprimit (emmagatzemat a pressió) es considera un **gas a pressió** (pictograma GHS04).

Condicions de captació i tractament:

- **Captació:** presa d'aire exterior, a 5 m d'alçada, allunyada de fonts de contaminació.
- **Filtració:** filtre d'alta eficiència (partícules >5 µm) integrat als bufadors.
- **Assecat:** mitjançant refredament i separadors de condensats, fins a un punt de rosada de -40 °C per evitar la condensació d'aigua a les línies de procés.
- **Cabals:** 40.936 kg/h (≈34.113 m³/h a 25 °C i 1,01 bar)

Riscos associats:

- **Explosió:** la barreja metanol-aire pot ser explosiva si la relació molar entra dins del rang d'inflamabilitat (6-36,5% v/v de metanol). El procés es manté per sobre de l'UFL (>36,5%) per evitar aquest risc.
- **Atmosfera asfixiant:** l'emmagatzematge de grans volums d'aire comprimit no comporta risc d'asfíxia en condicions normals.

1.2.1.3. Aigua de procés (desmineralitzada)

L'aigua s'utilitza principalment com a solvent d'absorció del formaldehid a la columna T-401, i també com a fluid de refrigeració (a les torres TR-701/702) i per a les aigües glicolades. L'aigua de xarxa (procedent de l'acometuda municipal) es tracta mitjançant un descalcificador (DC-701) per eliminar ions de calci i magnesi, evitant incrustacions als bescanviadors i a la columna d'absorció ^[22].

Taula 8. Propietats (aigua desmineralitzada)

Propietat	Valor
Conductivitat elèctrica	<1 µS/cm
pH	6,5-7,5
Duresa (equivalent CaCO ₃)	<0,1 °f
Sòlids totals dissolts	<5 mg/L

Classificació CLP: No classificada com a perillosa.

Condicions d'emmagatzematge:

- No s'emmagatzema a tancs específics; s'utilitza directament de la xarxa després del tractament.
- Cabals:
 - Aigua d'absorció:** 9.850 kg/h (entrada a la columna T-401).
 - Aigua de refrigeració (torres):** 155 m³/h per a cada torre (total 310 m³/h), en circuit tancat.

1.2.1.4. Catalitzador Fe₂(MoO₄)₃ (Ferro molibdat)

El catalitzador és la substància activa que promou l'oxidació selectiva del metanol a formaldehid. Es presenta en forma de partícules sòlides de mida uniforme, que s'allotgen dins dels 4.266 tubs del reactor multitubular R-301.

Taula 9. Propietats físicoquímiques del catalitzador

Propietat	Valor
Fórmula	Fe ₂ (MoO ₄) ₃
Aspecte	Sòlid de color verd pàl·lid a groc
Densitat (aparent)	1.050 kg/m ³ (càrrega del llit)
Massa molar	591,53 g/mol
Mida de partícula	2-5 mm (esfèriques o cilíndriques)
Temperatura òptima d'operació	300 °C (rang 280-320 °C)
Temperatura màxima admissible	350 °C (a partir de 350 °C es sinteritza i perd activitat)
Vida útil estimada	18-24 mesos en operació contínua

Taula 10. Classificació CLP del catalitzador

Classe de perill	Categoria	Frases H
Irritació cutània	2	H315
Irritació ocular	2	H319
Toxicitat específica en òrgans diana – exposició única (irritació respiratòria)	3	H335
Pictogrames de Perillositat		

Condicions d'emmagatzematge i manipulació:

- El catalitzador fresc es rep en bidons de 200 kg i s'emmagatzema en un magatzem sec (A-700) fins a la càrrega al reactor.
- La càrrega es realitza mitjançant un sistema de buit, evitant la generació de pols.
- El catalitzador gastat es classifica com a residu perillós (LER 16 08 02*) i es gestiona mitjançant un contracte de *buy-back* per recuperar el molibdè.

1.2.1.5. Fluids auxiliars

A més de les matèries primeres principals, la planta utilitza diversos fluids auxiliars per a la calefacció, refrigeració i inertització.

Dowtherm A (oli tèrmic)

El Dowtherm A és una mescla eutèctica de difenil (26,5%) i òxid de difenil (73,5%), utilitzada com a fluid tèrmic en circuits de calefacció a alta temperatura. S'empra per al preescalfament del reactor (CO-701) i dels intercanviadors I-201 i I-501.

Taula 11. Propietats del Dowtherm A (oli tèrmic)

Propietat	Valor
Aspecte	Líquid incolor a groc pàl·lid
Punt d'inflamació	124 °C (c.c.)
Temperatura d'autoignició	600 °C
Rang de treball	-30 °C a 400 °C
Densitat (20 °C)	1.056 kg/m ³
Viscositat cinemàtica (40 °C)	4,2 cSt

Taula 12. Classificació CLP del Dowtherm A

Classe de perill	Categoria	Frases H
Irritació cutània	2	H315
Irritació ocular	2	H319
Toxicitat per a la reproducció	1B	H360Fd
Perillós per al medi ambient aquàtic (agut i crònic)	1	H410
Pictogrames de Perillositat	  	

Aigua glicolada (40% propilenglicol)

S'utilitza com a refrigerant secundari al bescanviador I-401 per refredar la formalina de 65 °C a 19 °C. La barreja al 40% en pes de propilenglicol té un punt de congelació de -25 °C, la qual cosa permet treballar a 5 °C sense risc de solidificació.

Taula 13. Propietats de l'aigua glicolada (40%)

Propietat	Valor
Composició	40% propilenglicol, 60% aigua desmineralitzada
Punt de congelació	-25 °C
Densitat (20 °C)	1.040 kg/m ³
Capacitat calorífica específica	3,6 kJ/(kg·K)
Viscositat (5 °C)	15 cP

Classificació CLP: No classificada com a perillosa (el propilenglicol és de baixa toxicitat).

Nitrogen (N₂)

El nitrogen s'utilitza per a la inertització dels tancs d'emmagatzematge (blanketing) i per a les purgues de línies abans del manteniment. Es genera in situ mitjançant dos generadors PSA (GN-701 i GN-702), que produeixen N₂ amb una puresa del 99,99%.

Taula 14. Propietats de l'aigua glicolada (40%)

Propietat	Valor
Aspecte	Gas incolor, inodor
Densitat (0 °C, 1 atm)	1,2506 kg/m ³
Pressió d'emmagatzematge	8 bar (tanc pulmó TN-701)
Puresa	≥99,99% (O ₂ <0,01%)

Classificació CLP: Gas a pressió (pictograma GHS04)



1.2.2. Producte final

1.2.2.1. Formaldehid en solució aquosa (formalina)

El formaldehid pur és un gas incolor, però a la pràctica es comercialitza en solució aquosa amb un contingut típic del 37% en pes (formalina), estabilitzada amb metanol (7% en pes) per evitar la polimerització espontània a paraformaldehid. Aquesta és la formulació que s'obté a la planta.

Taula 15. Propietats de la formalina (37% HCHO + 7% MeOH)

Propietat	Valor
Fórmula molecular	CH ₂ O
Massa molar	30,03 g/mol
Compost associat	Formaldehid (Metanal)
Aspecte	Líquid transparent, incolor a lleugerament groc
Olor	Forta, picant, sufocant (llindar d'olor: 0,1-1 ppm)
Densitat (20 °C)	1.085 kg/m ³
pH	3,5-5,0 (lleugerament àcid)
Punt d'ebullició	≈98 °C (a 1 atm)
Punt d'inflamació	38-40 °C (a causa del metanol)
Viscositat (20 °C)	1,5-2,0 cP
Solubilitat en aigua	Completa

Taula 16. Classificació CLP del formaldehid

Classe de perill	Categoria	Frases H
Toxicitat aguda (oral, dèrmica, inhalació)	3	H301, H311, H331
Corrosió cutània	1B	H314
Sensibilització cutània	1	H317
Mutagenicitat en cèl·lules germinals	2	H341
Carcinogenicitat	1B	H350
Toxicitat específica en òrgans diana – exposició única	3	H335
Pictogrames de perillositat	  	

Condicions d'emmagatzematge:

- **Tancs:** quatre tancs verticals (TK-601 a TK-604), cadascun de 200 m³, en acer inoxidable AISI 316L.
- **Pressió:** atmosfèrica amb blanket de nitrogen (5-15 mbar) per evitar l'entrada d'aire.
- **Temperatura:** ambient (15-25 °C). Per sota de 12 °C pot precipitar paraformaldehid; per sobre de 40 °C augmenta la pressió de vapor del metanol. Es disposa d'alarmes de temperatura.
- **Cubeto de retenció:** CB-101, dimensionat per al 100% del volum del tanc més gran, amb revestiment antiàcid (resina epoxi-fenòlica).

Aplicació en el procés:

La formalina s'obté a la columna d'absorció T-401, s'estabilitza amb metanol al mesclador Mix-401 i es refreda a 19 °C abans d'enviar-se als tancs. El cabal de producció nominal és de **34.125 kg/h** de formalina (≈ 12.626 kg/h de formaldehid anhidre).

1.2.3. Subproductes i emissions

1.2.3.1. Gasos de cua

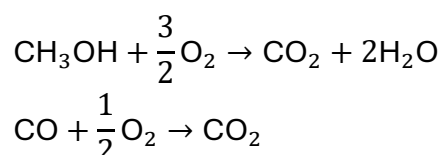
Els gasos no absorbits que surten pel cap de la columna T-401 contenen nitrogen, oxigen, monòxid de carboni (CO), diòxid de carboni (CO₂), metanol residual i traces de formaldehid. Aquest corrent no es pot emetre directament a l'atmosfera per la seva toxicitat.

Taula 17. Composició típica dels gasos de cua (corrent S-138)

Component	Cabal màssic (kg/h)	Fracció
N ₂	31.400	71,20%
O ₂	7.000	15,90%
H ₂ O (vapor)	5.500	12,50%
Metanol (CH ₃ OH)	92,5	0,21%
CO	32	0,07%
Formaldehid (CH ₂ O)	traces	<0,01%

Tractament:

Els gasos de cua s'escalfen a I-501 (de 150 a 220 °C) i s'alimenten a un reactor catalític oxidatiu (RC-501) amb catalitzador de Pt/Pd sobre alumina. Les reaccions que es produeixen són:



L'eficiència de destrucció és superior al 99,9%, de manera que les emissions finals per la xemeneia F-1 són molt inferiors als límits del BREF LVOC ^[3] (metanol <20 mg/Nm³, formaldehid <5 mg/Nm³).

1.2.3.2. Aigües residuals

La planta genera aigües residuals procedents de:

- **Purgues de les torres de refrigeració (TR-701/702):** es purga un cabal mínim (≈1% del cabal de recirculació) per evitar l'acumulació de sals.
- **Neteja dels filtres i equips:** aigües de neteja eventuais (no contínues).
- **Condensats de vapor:** es recullen i es reutilitzen en la mesura del possible.

Aquestes aigües es canalitzen a la xarxa separativa de la planta. Abans de l'abocament al clavegueram industrial, es neutralitzen (ajust de pH a 6,5-8,5) i es fan passar per un separador d'hidrocarburs. Els paràmetres d'abocament compleixen els límits de l'Agència Catalana de l'Aigua (ACA): DQO <1.000 mg/L, MES <500 mg/L, temperatura <40 °C.

1.2.3.3. Residus sòlids

Els residus sòlids generats a la planta són:

Taula 18. Residus sòlids generats a la planta

Residu	Codi LER	Origen	Gestió
Catalitzador gastat ($\text{Fe}_2(\text{MoO}_4)_3$)	16 08 02*	Reactor R-301	Recuperació de molibdè (buy-back)
EPI contaminants (guants, mascaretes)	15 02 02*	Manteniment i operació	Incineració per gestor autoritzat
Olis de lubricació usats	13 02 05*	Compressors, bombes, bufadors	Valorització energètica
Dowtherm A usat	13 03 08*	Calderes CO-701/702	Eliminació per gestor autoritzat
Filtres d'aire (cel·lulosa)	15 02 03	Bufadors B-701/702	Incineració o abocador controlat
Ferralla metàl·lica	17 04 05	Manteniment mecànic	Reciclatge
Embalatges de plàstic i cartró	15 01	Recepció de materials	Reciclatge

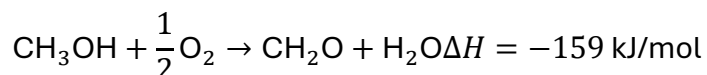
Els residus perillosos s'emmagatzemen a l'Àrea 700 en bidons homologats, etiquetats segons CLP, i es retiren per transportistes autoritzats ADR. Tots els moviments es registren telemàticament a l'Agència de Residus de Catalunya (ARC).

1.3. Descripció general del procés de producció

El procés de producció de formaldehid de la planta METAFORM es basa en la tecnologia **FORMOX** (Formaldehyde Oxidation), que consisteix en l'oxidació catalítica en fase gas del metanol per obtenir formaldehid, seguit d'una absorció en aigua per a la seva comercialització en solució aquosa estabilitzada. El procés és continu i opera 330 dies a l'any, 24 hores al dia. A continuació es descriuen les etapes principals, des de la recepció de matèries primeres fins a l'emmagatzematge del producte final, fent especial èmfasi en els fenòmens químics i físics que hi tenen lloc, així com en la integració energètica que millora l'eficiència global de la planta.

1.3.1. Mètode de fabricació (procés FORMOX)

El procés FORMOX és el mètode industrial més estès per a la producció de formaldehid, amb una quota de mercat superior al 80% a Europa. Es basa en l'oxidació parcial del metanol en presència d'un catalitzador sòlid d'òxid de ferro i molibdè ($\text{Fe}_2(\text{MoO}_4)_3$), que permet treballar a temperatures moderades (300 °C) i amb una alta selectivitat cap a formaldehid (superior al 95%). La reacció principal és la següent:



Aquesta reacció és fortament exotèrmica, per la qual cosa cal un sistema de refrigeració eficient per mantenir la temperatura constant i evitar la formació de subproductes (CO , CO_2 , àcid fòrmic). L'excés d'aire (relació aire/metanol per sobre del límit superior

d'explosivitat, >36,5% v/v) garanteix la seguretat del procés, ja que es treballa en una zona on la mescla no és inflamable.

La cinètica de la reacció segueix el model proposat per Deshmukh et al. (2005) [1], que considera una reacció principal de formació de formaldehid i una reacció secundària d'oxidació a CO. Les expressions cinètiques es detallen al capítol 2 (Equips), on també es justifica la selecció del reactor multitubular.

1.3.2. Diagrames de flux

El procés es pot visualitzar a dos nivells de detall:

- **Diagrama de blocs:** mostra les etapes principals de manera esquemàtica, des de l'emmagatzematge de metanol fins a l'expedició de formalina. Aquest diagrama es presenta a la Figura 1, generat mitjançant les funcions avançades del programa edrawmax.
- **Diagrama de flux de procés (PFD):** inclou tots els equips principals (reactor, columnes, bescanviadors, etc.) i les línies de procés amb els cabals, temperatures i pressions tal com s'observa a la Figura 2, generada mitjançant el programa de disseny bidimensional AutoCAD. Per a una visió més detallada consultar els plànols del projecte (capítol 10. Plànols)

1.3.2.1 Diagrama de Blocs

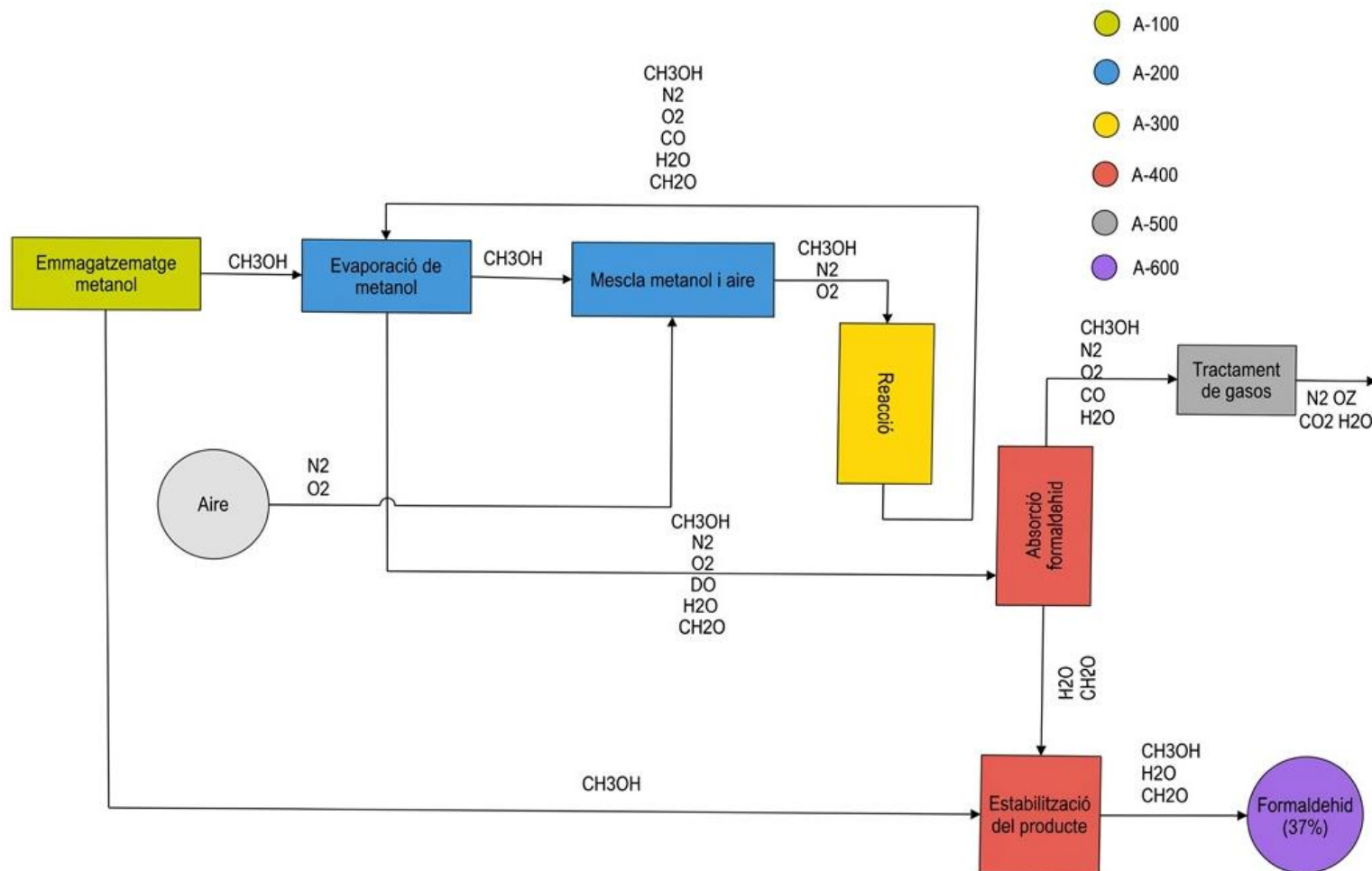


Figura 1. Diagrama de blocs general del complex industrial METAFORM amb la integració de corrents de procés i la distribució cromàtica per àrees operatives (A-100 a A-600).

1.3.2.2 Diagrama de Process

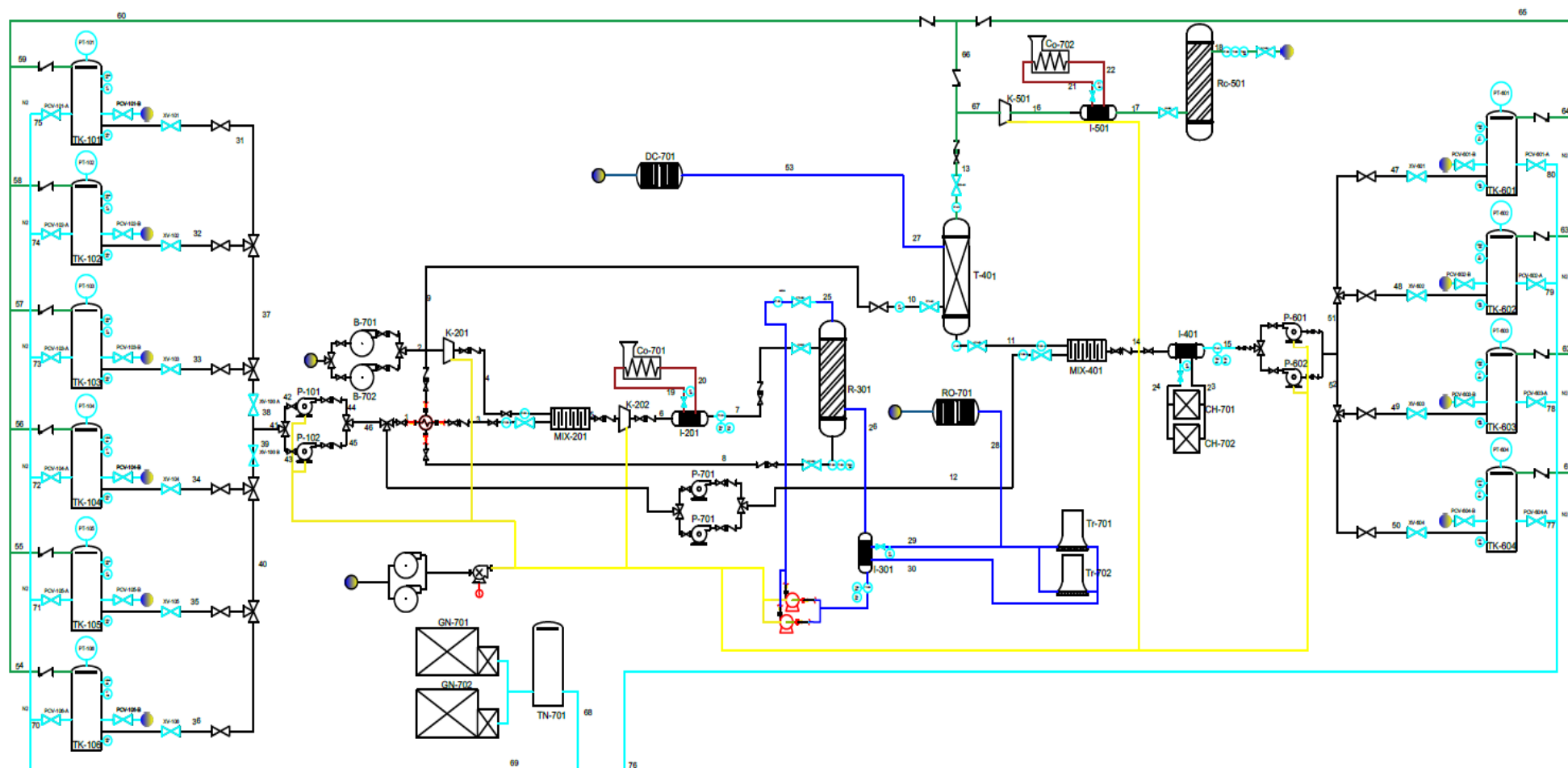


Figura 2. Diagrama de canonades i instrumentació (P&ID) de la planta de producció de formaldehid. Elaboració pròpia.

1.3.3. Selecció d'equips principals

La selecció dels equips crítics del procés es basa en criteris d'eficiència tèrmica, seguretat, manteniment i cost. A continuació es justifica breument l'elecció dels principals, remetent al capítol 2 per a les especificacions completes.

- **Reactor R-301 (multitubular de llit fix):** la reacció és altament exotèrmica i requereix un control precís de la temperatura per evitar punts calents (*hot spots*) que desactivin el catalitzador. El disseny multitubular (4.266 tubs de petit diàmetre) permet una elevada relació superfície/volum, facilitant la transferència de calor amb el fluid refrigerant que circula per la carcassa. S'ha escollit acer inoxidable AISI 316L per resistir la corrosió a 300 °C.
- **Bescanviadors de calor (carcassa i tubs, tipus TEMA BEM):** s'utilitzen per a escalfar i refredar els corrents de procés (I-201, I-301, I-401, I-501) i per a l'evaporació del metanol (E-201, E-202). La configuració de carcassa i tubs és robusta, permet grans diferencials de pressió i temperatura, i facilita la neteja mecànica.
- **Columna d'absorció T-401 (empacada):** el formaldehid és molt soluble en aigua, per la qual cosa l'absorció en una columna empacada ofereix una alta eficiència de transferència de matèria amb una baixa retenció de líquid (evita la polimerització). S'han seleccionat anells Raschig de 3/4" de polzada (acer inoxidable) com a material d'empacament.
- **Mescladors estàtics (Mix-201 i Mix-401):** s'utilitzen per homogeneïtzar la mescla gasosa metanol-aire (Mix-201) i per estabilitzar la formalina amb metanol (Mix-401). No tenen parts mòbils, la qual cosa redueix el manteniment i el risc de fuites.
- **Calderes:** una caldera de vapor elèctrica (CV-701) per a la posada en marxa, i dues calderes d'oli tèrmic (CO-701 i CO-702) per al preescalfament del reactor i del tractament de gasos. L'oli tèrmic Dowtherm A permet treballar fins a 400 °C sense pressions elevades.
- **Compressors i bufadors:** dos bufadors centrífugs (B-701, B-702) per a l'aire de procés, i dos generadors de nitrogen PSA (GN-701, GN-702) per a la inertització.
- **Torres de refrigeració (TR-701, TR-702):** refreden l'aigua del circuit secundari del reactor. Operen en alternança setmanal per distribuir el desgast.
- **Chillers (CH-701, CH-702):** refreden aigua glicolada a 5 °C per a la refrigeració final del producte.

Per a una descripció detallada de cada equip (dimensions, materials, condicions de disseny), vegeu el capítol 2 (Equips). La instrumentació associada (sensors, controladors, vàlvules) es troba al capítol 3, i el llistat de canonades i vàlvules al capítol 4.

1.3.4. Descripció per etapes del procés

En aquest apartat es presenta el procés de producció seguint el recorregut del flux de matèria dins la planta, des de l'emmagatzematge inicial del metanol fins a l'obtenció de la formalina i el seu emmagatzematge final. La descripció s'organitza d'acord amb les àrees numerades que es mostren al plànol de distribució (apartat 1.6).

1.3.4.1. Emmagatzematge i alimentació de metanol (Àrea 100)

El metanol pur (puresa $\geq 98\%$) arriba a la planta de Metaform per mitjà de camions cisterna, on s'emmagatzema en sis tancs verticals atmosfèrics de superfície (de TK-101 a TK-106), cadascun de 200 m³, construïts en acer inoxidable AISI 316L. Els tancs disposen d'un sistema de blanketing de nitrogen (pressió 5-15 mbar, O₂ <8%) per evitar la formació d'atmosferes explosives, ja que el metanol té un punt d'inflamació de 12 °C.

Des dels tancs, una bomba centrífuga impulsa el metanol cap a l'Àrea 200 a un cabal de 5.047 kg/h. Les vàlvules de control de nivell i pressió (llaços L-TKxxx-1 i P-TKxxx-1) mantenen l'autonomia de 7 dies. Per a més detalls sobre la instrumentació dels tancs, vegeu el capítol 2 (Control i instrumentació).

1.3.4.2. Evaporació del metanol i mescla amb aire (Àrea 200)

El metanol líquid s'evapora en dos bescanviadors de calor en sèrie (E-201 per a la posada en marxa i E-202 en règim continu). En condicions normals, la calor necessària per evaporar i sobreescalfar el metanol (de 25 °C a 140 °C) s'obté de la pròpia corrent calenta de sortida del reactor (300 °C), que circula per la carcassa de l'E-202. Aquesta integració tèrmica redueix el consum de la caldera de vapor.

El vapor de metanol (5.047 kg/h) es mescla amb aire de procés (40.936 kg/h , 1,2 bar, procedent dels bufadors B-701/B-702) en un mesclador estàtic helicoidal (Mix-201). La relació metanol/aire es manté per sobre del límit superior d'explosivitat (>36,5% v/v) mitjançant un llaç de control de relació (F-Mix201-1). D'aquesta manera s'evita qualsevol risc d'ignició a la línia d'alimentació del reactor.

La mescla gasosa surt del mesclador a 115 °C i 1,5 bar, i s'escalfa fins a 300 °C al bescanviador I-201, utilitzant oli tèrmic Dowtherm A provinent de la caldera CO-701. El llaç de control de temperatura T-I201-1 (en cascada) ajusta el cabal d'oli per mantenir la consigna.

1.3.4.3. Reacció catalítica (Àrea 300)

La mescla gasosa calenta (metanol + aire) entra al reactor multitubular R-301 pel capçal superior. El reactor conté 4.266 tubs de 33,4 mm de diàmetre exterior i 1.500 mm de longitud, farcits amb 3.990 kg de catalitzador $\text{Fe}_2(\text{MoO}_4)_3$ en llit fix. La reacció d'oxidació té lloc dins dels tubs a 300 °C i 2 atm.

La calor generada (6.622 kJ/s) s'extreu mitjançant un fluid refrigerant (aigua de torre en operació normal, Dowtherm A en preescalfament) que circula per la carcassa del reactor. El llaç de control T-R301-1 (feedback amb interlock) ajusta el cabal de refrigerant per mantenir la temperatura de sortida a 300 °C. Si la temperatura supera els 350 °C (TSHH-301), el SIS tanca automàticament l'alimentació de metanol (vàlvula XV-301) i activa la injecció de nitrogen.

La conversió de metanol és superior al 98%, amb una selectivitat cap a formaldehid >95%. El corrent de sortida (45.985 kg/h) conté formaldehid, aigua, metanol residual, N_2 , O_2 , CO i CO_2 , i surt a 300 °C. La pressió a la sortida es controla amb el llaç P-R301-1 (vàlvula PCV-301 FO).

1.3.4.4. Refrigeració i recuperació de calor

Abans d'enviar el corrent a la columna d'absorció, es refreda aprofitant la seva calor per evaporar el metanol fresc a l'E-202 (com s'ha explicat a l'etapa 1.3.4.2). Així, el corrent de sortida del reactor es refreda de 300 °C a 150 °C, mentre que el metanol s'evapora.

El corrent a 150 °C es refreda encara més fins a 100 °C al bescanviador I-301, on cedeix calor a l'aigua de refrigeració del circuit secundari (que després es refreda a les torres TR-701/702). Aquest intercanvi addicional permet recuperar calor per a altres serveis (escalfament d'aigua de neteja, etc.).

1.3.4.5. Absorció del formaldehid (Àrea 400)

El corrent gasós a 100 °C i 1,2 bar entra pel fons de la columna d'absorció T-401. Aquesta columna empacada (diàmetre 4 m, alçada 12 m) conté anells Raschig de 3/4" com a material d'empacament, que proporcionen una gran superfície de contacte. Pel cap de la columna s'alimenta aigua desmineralitzada a 25 °C (cabal 9.850 kg/h) a contracorrent.

El formaldehid, que és molt soluble en aigua (400 g/L a 20 °C), es transfereix a la fase líquida, obtenint-se una solució aquosa de formaldehid (formalina) a 67 °C pel fons de la columna. Els gasos no absorbits (N_2 , O_2 , CO, metanol residual, traces de formaldehid) surten pel cap a 59 °C i s'envien a l'Àrea 500 per al seu tractament.

Els llaços de control de la columna inclouen:

- **F-T401-1:** control de cabal d'aigua d'absorció (FIC-401, FCV-401) ^[15].

- **L-T401-1:** control de nivell de líquid al fons (LIC-401, LCV-401).
- **P-T401-1:** control de pressió al cap (PIC-401, PCV-401 FO).

1.3.4.6. Estabilització de la formalina

La formalina calenta (65 °C) que surt del fons de la columna es barreja amb metanol pur (883,8 kg/h) en un mesclador estàtic (Mix-401). L'addició de metanol (fins a un 7% en pes) estabilitza la solució i evita la polimerització espontània a paraformaldehid. El llaç de relació F-Mix401-1 ajusta el cabal de metanol per mantenir la proporció adequada.

A continuació, la formalina estabilitzada es refreda fins a 19 °C al bescanviador I-401 (àrea 74,7 m²) mitjançant aigua glicolada a 5 °C (procedent dels chillers CH-701/CH-702). Aquesta temperatura es troba dins del rang recomanat (15-25 °C) per a l'emmagatzematge segur.

1.3.4.7. Tractament de gasos de cua (Àrea 500)

Els gasos no absorbits que surten pel cap de la columna (44.087 kg/h) contenen compostos tòxics (metanol residual, CO, traces de formaldehid) que no es poden emetre directament a l'atmosfera. Aquest corrent es tracta mitjançant un reactor catalític oxidatiu (RC-501). Abans d'entrar al reactor, els gasos es preescalfen a I-501 de 150 °C a 220 °C utilitzant Dowtherm A (caldera CO-702). El llaç de control T-I501-1 (en cascada) manté la temperatura d'entrada al reactor.

Al RC-501, un catalitzador de Pt/Pd sobre alumina oxida el metanol i el CO a CO₂ i aigua, amb una eficiència de destrucció superior al 99,9%. El gas net resultant s'emeteix per la xemeneia F-1, complint els límits del BREF LVOC ^[3] (metanol <20 mg/Nm³, formaldehid <5 mg/Nm³). La pressió del reactor s'ajusta amb el llaç P-RC501-1 (PIC-501, PCV-501 FO).

1.3.4.8. Emmagatzematge i expedició de formalina (Àrea 600)

La formalina estabilitzada i refredada (19 °C, 12.626 kg/h de formalina, equivalent a 34.125 kg/h de solució al 37%) s'envia a quatre tancs d'emmagatzematge (TK-601 a TK-604), cadascun de 200 m³. Els tancs estan construïts en acer inoxidable AISI 316L i disposen de blanket de nitrogen (5-15 mbar, O₂ <8%) per mantenir la inertització. La temperatura es controla (15-25 °C) per evitar la precipitació de paraformaldehid per sota de 12 °C.

La sortida de producte cap a camions cisterna es realitza a l'Àrea 1300 (cargadero), on es verifiquen les condicions de seguretat (connexió equipotencial, acoblaments dry-disconnect, etiquetatge ADR). El control d'inventari i els nivells als tancs es gestionen mitjançant els llaços L-TK601-1 a L-TK604-1.

1.3.4.9. Serveis auxiliars (Àrea 700 i 900)

Els serveis auxiliars que donen suport al procés inclouen:

- **Generació de vapor:** caldera elèctrica CV-701 (2.041 kW) per a la posada en marxa.
- **Calderes d'oli tèrmic:** CO-701 (1.744 kW) per a l'I-201 i CO-702 (1.453 kW) per a l'I-501.
- **Refrigeració:** dues torres TR-701/702 (7.355 kW cadascuna) per a l'aigua de refrigeració del reactor, i dos chillers CH-701/702 (570 kW cadascun) per a l'aigua glicolada.
- **Aire comprimit:** dos bufadors B-701/702 (1.000 kW) per a l'aire de procés.
- **Nitrogen:** dos generadors PSA GN-701/702 (35 Nm³/h, puresa 99,99%) i un tanc pulmó TN-701 (500 L, 8 bar) per a la inertització.

La descripció detallada d'aquests equips es troba al capítol 2 (Equips), mentre que els llaços de control associats són part del capítol 3.

1.3.5. Integració tèrmica i eficiència energètica

Un aspecte clau del disseny de la planta és l'aprofitament de la calor generada en la reacció exotèrmica per reduir el consum de combustibles fòssils. Tal com s'ha descrit, la corrent de sortida del reactor (300 °C) s'utilitza per evaporar i sobreescalfar el metanol d'alimentació a l'E-202, en lloc d'utilitzar vapor d'una caldera addicional. Aquesta integració permet estalviar aproximadament 1.900 kW tèrmics en condicions nominals.

A més, la calor residual del corrent després de l'E-202 (150 °C) es recupera parcialment a l'I-301 per escalfar l'aigua de refrigeració del circuit secundari, la qual cosa redueix la càrrega tèrmica de les torres de refrigeració.

El balanç energètic global (vegeu apartat 1.5) mostra que la planta és pràcticament autosuficient en termes de calor per al procés, requerint únicament l'aport de gas natural per a les calderes d'oli tèrmic durant la posada en marxa o en moments puntuals de baixa càrrega.

1.3.6. Consideracions de seguretat i medi ambient

El procés FORMOX està dissenyat amb múltiples barreres de seguretat per evitar accidents deguts a la inflamabilitat del metanol i la toxicitat del formaldehid. Entre les mesures principals destaquen:

- **Treball per sobre de l'UFL:** la mescla metanol-aire abans del reactor es manté per sobre del 36,5% v/v de metanol, fora del rang d'explosivitat.

- **Blanketing de nitrogen:** tots els tancs d'emmagatzematge (metanol i formalina) estan inertitzats amb N_2 per evitar la formació d'atmosferes explosives o tòxiques.
- **Sistema de seguretat instrumentada (SIS):** supervisa la temperatura i pressió del reactor, la detecció de fuites de gas i els nivells dels tancs, i activa parades d'emergència automàtiques si se superen els llindars.
- **Oxidació catalítica de gasos de cua:** elimina el metanol residual i el CO amb eficiència >99,9%, complint la normativa d'emissions.

Per a una anàlisi més completa dels riscos i les mesures de protecció, vegeu el capítol 5 (Seguretat i higiene) i el capítol 6 (Medi ambient). Els procediments de posada en marxa, parada i manteniment es descriuen als capítols 8 i 9.

1.4. Balanç de matèria

El desenvolupament dels balanços de matèria constitueix una de les fases clau en el disseny d'una planta de procés, ja que permet establir amb precisió la quantitat i la composició dels corrents que circulen entre les diferents unitats de la instal·lació. En aquest apartat es recullen els resultats corresponents a la planta de producció de formaldehid, incloent-hi tant els corrents d'alimentació i de producte com els fluxos interns que es generen durant l'operació.

Aquests valors han estat calculats manualment i posteriorment corroborats mitjançant el simulador de processos Aspen HYSYS, reproduint les condicions de funcionament definides prèviament per al procés. La informació derivada d'aquests càlculs serveix com a punt de partida per al dimensionament dels equips descrits al capítol 2, el disseny de la xarxa de canonades desenvolupat al capítol 4 i l'anàlisi dels requeriments energètics presentada a l'apartat 1.5.

1.4.1. Corrents del procés

El procés de producció de formaldehid s'ha dividit en 29 corrents principals, numerats de l'S-101 a l'S-129, que cobreixen des de l'entrada de matèries primeres fins a l'emmagatzematge de producte final i el tractament de gasos de cua. A la Figura 2 (PID) es mostra la ubicació de cada corrent.

A les Taules 19, 20 i 21 es resumeixen les propietats dels corrents principals: temperatura, pressió, fracció de vapor, cabals màssic, molar i volumètric, densitat mitjana, i composició màssica dels components (metanol, oxigen, nitrogen, aigua, formaldehid, monòxid de carboni, diòxid de carboni, Dowtherm A i aigua glicolada). Les dades corresponen a les condicions de règim estacionari a càrrega nominal (100% de producció).

Taula 19. Resum de les propietats dels corrents principals del procés

Paràmetres / Propietats	S-101	S-102	S-103	S-104	S-105	S-106	S-107	S-108	S-109	S-110
Temperatura (°C)	25,0	25,0	140,0	100,0	114,5	165,5	300,0	300,0	110,0	25,0
Pressió (bar)	1,5	1,0	1,5	2,0	1,5	2,2	2,0	1,5	1,3	1,2
Fracció de vapor (1=V, 0=L)	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0
Cabal màssic (kg/h)	5.047	40.936	5.047	40.936	45.983	45.983	45.983	45.983	45.983	9.850
Cabal molar (kmol/h)	158	1.419	158	1.419	1.577	1.577	1.577	1.654	1.654	547
Cabal volumètric (m³/h)	6,4	34,1	3,5	22,0	33,8	24,2	35,4	52,5	41,1	9,9
Densitat mitjana (kg/m³)	786	1,2	1,4	1,9	1,4	1,9	1,3	0,9	1,1	998
Fracció molar: Metanol	1,000	0,000	1,000	0,000	0,100	0,100	0,100	0,002	0,002	0,000
Fracció molar: O ₂	0,000	0,280	0,000	0,280	0,200	0,200	0,200	0,150	0,150	0,000
Fracció molar: N ₂	0,000	0,720	0,000	0,720	0,700	0,700	0,700	0,680	0,680	0,000
Fracció molar: H ₂ O	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,060	0,060	1,000
Fracció molar: Formaldehid	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,100	0,100	0,000
Fracció molar: CO	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,000
Fracció molar: CO ₂	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,000
Fracció molar: Dowtherm A	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Fracció molar: Aigua glicolada	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Taula 20. Resum de les propietats dels corrents principals del procés

Paràmetres / Propietats	S-111	S-112	S-113	S-114	S-115	S-116	S-117	S-118	S-119	S-120
Temperatura (°C)	65,0	25,0	59,0	64,0	18,0	154,0	220,0	269,0	400,0	373,0
Pressió (bar)	1,2	1,2	1,0	1,2	1,0	2,0	1,9	1,2	3,0	2,6
Fracció de vapor (1=V, 0=L)	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1
Cabal màssic (kg/h)	11.713	883	44.087	12.626	12.626	44.087	44.087	44.087	125.000	125.000
Cabal volumètric (m³/h)	13,86	1,12	45,08	14,94	14,26	29,39	39,72	61,93	14.045,00	15.782,00
Densitat mitjana (kg/m³)	845	788	1,0	845	886	1,5	1,1	0,7	8,9	7,9
Fracció molar: Metanol	0,001	1,000	0,002	0,070	0,070	0,002	0,002	0,000	0,000	0,000
Fracció molar: O₂	0,000	0,000	0,159	0,000	0,000	0,159	0,159	0,155	0,000	0,000
Fracció molar: N₂	0,000	0,000	0,712	0,000	0,000	0,712	0,712	0,712	0,000	0,000
Fracció molar: H₂O	0,604	0,000	0,125	0,560	0,560	0,125	0,125	0,126	0,000	0,000
Fracció molar: Formaldehid	0,396	0,000	0,000	0,370	0,370	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Fracció molar: CO	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000
Fracció molar: CO₂	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,001	0,001	0,004	0,000	0,000
Fracció molar: Dowtherm A	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	1,000
Fracció molar: Aigua glicolada	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Taula 21. Resum de les propietats dels corrents principals del procés

Paràmetres / Propietats	S-221	S-222	S-223	S-224	S-225	S-226	S-227	S-228	S-229
Temperatura (°C)	260,00	246,00	5,00	15,00	240,00	290,00	65,00	30,00	30,00
Pressió (bar)	3,00	2,99	1,20	1,09	4,00	3,99	1,10	1,84	2,00
Fracció de vapor (1=V, 0=L)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cabal màssic (kg/h)	110000,00	110000,00	65000,00	65000,00	190000,00	190000,00	155000,00	155000,00	155000,00
Cabal volumètric (m³/h)	129,00	128,00	58,90	59,30	215,00	231,00	158,00	158,00	158,00
Densitat mitjana (kg/m³)	853,00	856,00	1104,00	1096,00	883,00	823,00	983,00	997,00	997,00
Fracció molar: Metanol	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fracció molar: O₂	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fracció molar: N₂	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fracció molar: H₂O	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00
Fracció molar: Formaldehid	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fracció molar: CO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fracció molar: CO₂	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fracció molar: Dowtherm A	1,00	1,00	0,00	0,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00
Fracció molar: Aigua glicolada	0,00	0,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

1.4.2. Balanç de matèria global

Per verificar la consistència del procés es realitza un balanç global de matèria considerant totes les entrades i sortides de la línia de producció, sense tenir en compte els corrents de recirculació interns. En aquest balanç s'inclouen com a entrades el metanol fresc (S-101), l'aire d'alimentació (S-102) i l'aigua destinada a l'absorció (S-107), mentre que les sortides corresponen a la formalina obtinguda (S-112) i als gasos de cua tractats (S-115). L'equació global del balanç és:

$$\text{Cabal d'entrada} = \text{Cabal de sortida}$$

Entrades totals:

- Metanol fresc (S-101): 5.927 kg/h
- Aire (S-102): 40.936 kg/h
- Aigua d'absorció (S-107): 9.850 kg/h
- **Total entrada** = 5.927 + 40.936 + 9.850 = **56.713 kg/h**

Sortides totals:

- Formalina producte (S-112): 12.626 kg/h
- Gasos de cua tractats (S-115): 44.087 kg/h
- **Total sortida** = 12.626 + 44.087 = **56.713 kg/h**

Els resultats mostren que la massa total d'entrada coincideix exactament amb la massa total de sortida, obtenint-se un tancament complet del balanç global de matèria. Aquesta concordança confirma la coherència dels càlculs realitzats i valida les composicions i cabals emprats en la simulació del procés, proporcionant una base sòlida per al dimensionament dels equips i per als càlculs desenvolupats en els capítols següents.

1.5. Balanç d'energia

El balanç d'energia és una eina fonamental per al dimensionament dels equips de transferència de calor (bescanviadors, calderes, refrigeradors) i per a l'avaluació de l'eficiència energètica de la planta. En aquest apartat es quantifiquen les potències tèrmiques que han d'aportar o dissipar cadascun dels equips principals del procés de producció de formaldehid, així com els consums elèctrics dels equips rotatius (bombes, bufadors, compressors). Per a informació més detallada consultar els capítols 2. Equips i l'11. Manual de càlculs.

1.5.1. Calor de reacció

Tal com s'indica al capítol 2 (full d'especificacions del reactor R-301) i del capítol 11 (apartat de refrigeració del reactor), la potència tèrmica que ha de dissipar el sistema de refrigeració del reactor és de 6.620 kW. Aquest valor s'ha obtingut a partir de la simulació del procés amb el model cinètic de Deshmukh et al. (2005) i considera la integració tèrmica de la planta (aprofitament de la calor de sortida del reactor per escalfar el metanol d'alimentació). És el valor utilitzat en el dimensionament del reactor i del seu sistema de refrigeració.

1.5.2. Necessitats tèrmiques dels equips principals

A partir dels balanços de matèria i de les temperatures de disseny recollides al capítol 11, les potències tèrmiques dels bescanviadors i evaporadors es resumeixen a la Taula 22:

Taula 22. Potències tèrmiques dels equips de bescanvi de calor

Equip	Descripció	P (kW)	Fluid calent / Fluid fred	Tipus
E-201	Evaporador de metanol (posada en marxa)	1.838	Vapor d'aigua / metanol líquid	Carcassa i tubs
E-202	Evaporador de metanol (règim continu)	1.928	Gasos sortida reactor / metanol líquid	Carcassa i tubs
I-201	Preescalfador de la mescla metanol+aire	1.456	Dowtherm A / mescla gasosa	Carcassa i tubs
I-301	Refrigeració dels gasos de sortida del reactor	6.324	Gasos de procés / aigua de refrigeració	Carcassa i tubs
I-401	Refrigeració de la formalina estabilitzada	609	Formalina / aigua glicolada	Carcassa i tubs
I-501	Preescalfament dels gasos de cua	773	Dowtherm A / gasos de cua	Carcassa i tubs
Total bescanviadors		12.928		

1.5.3. Sistemes de calefacció

La planta disposa de tres calderes destinades a la generació de calor. La CV 701 és una caldera de vapor elèctrica amb una potència de 2.041 kW, utilitzada exclusivament durant la fase de posada en marxa per proporcionar vapor a l'evaporador E 201, sense intervenir en el funcionament continu de la planta.

D'altra banda, les calderes CO 701 i CO 702 són calderes d'oli tèrmic que utilitzen Dowtherm A com a fluid caloportador i gas natural com a combustible, presentant un rendiment tèrmic aproximat del 92%. La CO 701, amb una potència de 1.744 kW, subministra calor al preescalfador I 201 i permet el preescalfament del reactor durant l'etapa d'arrencada. Per la seva banda, la CO 702, amb una potència de 1.453 kW, proporciona calor al preescalfador I 501 destinat al tractament dels gasos de cua.

Per altre banda, el consum de gas natural associat obtingut és:

Taula 23. Consum de gas natural associat

Codi de la Caldera	Potència Tèrmica (kW)	Consum de Gas Natural (Nm ³ /h)	Emissions de CO ₂ (kg/h)
CO-701	1.744	158,3	322
CO-702	1.453	84	171
TOTAL SERVEI DE VAPOR	3.197	242,3	493

1.5.4. Sistemes de refrigeració

La calor excedent generada durant el procés es dissipa mitjançant dos sistemes de refrigeració: les torres de refrigeració i els chillers.

Les torres TR 701 i TR 702 disposen cadascuna d'una capacitat de dissipació de 7.355 kW i operen de manera alterna amb una rotació setmanal. Cada torre treballa amb un cabal de recirculació de 155 m³/h i un salt tèrmic de 35 °C, refredant l'aigua des dels 65 °C fins als 30 °C. Les pèrdues d'aigua produïdes per evaporació es compensen mitjançant un sistema d'aportació d'aigua de reposició, amb un cabal estimat de 10,85 m³/h.

Per altra banda, la planta disposa de dos chillers, CH 701 i CH 702, amb una capacitat de refrigeració de 570 kW cadascun i un COP de 5, fet que suposa un consum elèctric de 112,5 kW per unitat. En condicions nominals de funcionament, l'intercanviador I 401 presenta una demanda de refrigeració de 609 kW, motiu pel qual és necessari el funcionament simultani dels dos chillers.

1.5.5. Consum elèctric d'altres equips

Per altre banda, els principals consumidors d'electricitat de la planta són:

Taula 24. Principals equips de consum elèctric

Equip / Unitat de Consum	Potència (kW)	Observacions i Criteris de Disseny
Bufador d'aire B-701 (en servei)	1.000	Un en funcionament, l'altre en stand-by
Bombes de procés (metanol, formalina, refrigeració, glicolada)	150	Estimació a partir de les potències dels motors (capítol 2)
Generadors de nitrogen GN-701/702 (un en servei)	50	Segons els càlculs del capítol 11 (valor realista)
Chillers CH-701/702	203	Calculat a partir de la potència tèrmica i el COP
Il·luminació, control, altres	50	Estimació
TOTAL POTÈNCIA INSTAL·LADA	1.453	<i>Càrrega de disseny per a la subestació elèctrica TA-701/702</i>

El consum anual d'electricitat és, alhesores, de $1.453 \text{ kW} \times 24 \text{ h} \times 330 \text{ dies} = 11,5 \text{ GWh/any}$.

1.5.6. Conclusions del balanç d'energia

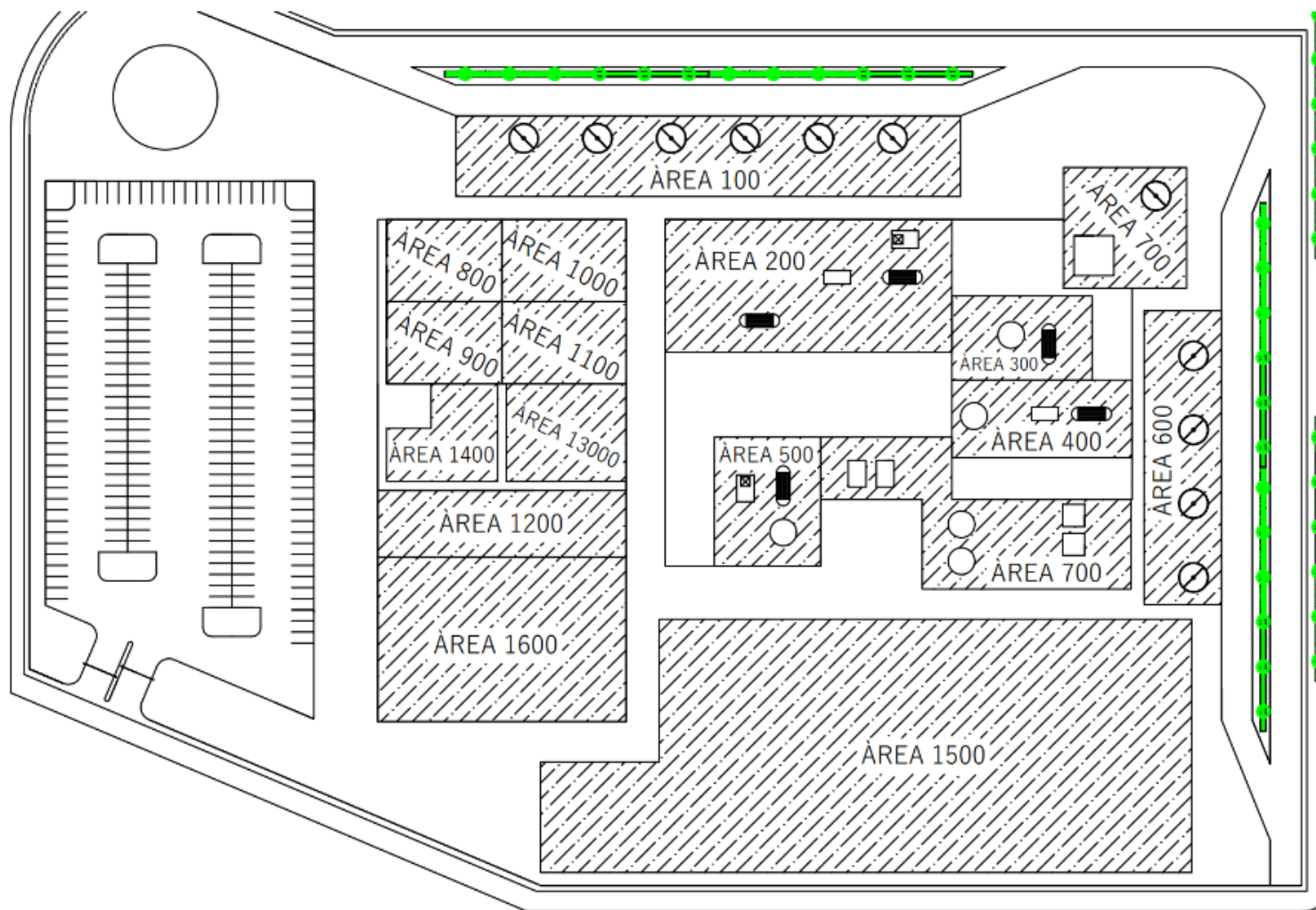
El balanç d'energia mostra que la planta de producció de formaldehid té una demanda tèrmica important, però gran part d'aquesta és coberta per la pròpia exotermicitat de la reacció (6.620 kW). Els equips de calefacció auxiliar (calderes d'oli tèrmic) consumeixen gas natural equivalent a 3.197 kW tèrmics (2.941 kW útils), mentre que els equips de refrigeració (torres i chillers) dissipen la calor excedent. El consum elèctric global s'estima en 1.453 kW, que es tradueix en aproximadament 11,5 GWh anuals. Les dades presentades serveixen com a base per al dimensionament dels equips energètics (capítol 2) i per a l'avaluació econòmica (capítols posteriors).

1.6. Constitució de la planta i descripció d'àrees

La planta de producció de formaldehid de METAFORM s'estructura en catorze àrees funcionals, numerades de la A-100 a la A-1500, que abasten des de l'emmagatzematge de matèries primeres fins als serveis auxiliars, la logística i les zones de suport.

A la Figura 3 es mostra el plànol de distribució general de la planta, on s'indica la ubicació relativa de les diferents àrees de procés (A-100 a A-700), de serveis auxiliars (A-800 a A-1000), de suport administratiu (A-1100 a A-1500) i de logística (cargadero, aparcament). Aquest plànol ha estat dissenyat per optimitzar el flux de materials, minimitzar els recorreguts de canonades i complir amb les distàncies de seguretat exigides per la normativa APQ ^[6]

Figura 3. Distribució espacial de la planta de Metaform i de les seves respectives àrees



Taula 25. Distribució de les diferents àrees de la planta

Àrea (Codi)	Nomenclatura	Funció Principal	Equips / Espais Principals
A-100	Emmagatzematge de matèries primeres	Tancs de metanol	TK-101 a TK-106
A-200	Evaporació i mescla	Preparació de la mescla metanol-aire	E-201, E-202, Mix-201, I-201
A-300	Reacció	Reactor catalític multitubular	R-301, I-301
A-400	Absorció i estabilització	Absorció del formaldehid i estabilització	T-401, Mix-401, I-401
A-500	Tractament de gasos de cua	Oxidació catalítica de gasos residuals	RC-501, I-501
A-600	Emmagatzematge de formaldehid	Tancs de producte final	TK-601 a TK-604
A-700	Serveis auxiliars	Generació de nitrogen, aire comprimit, fred, calefacció, electricitat, refrigeració (torres) i logística (càrrega/descàrrega)	GN-701/702, B-701/702, CH-701/702, DC-701, CV-701, CO-701/702, TA-701/702, TR-701/702, cargadero, bàscules
A-800	Sala de control	Control central del procés (DCS, SCADA, SIS)	Ordinadors, panells d'alarmes, SAI, estacions de treball, sistema de comunicacions (ràdio, telèfon)
A-900	Zona de visites	Recepció i atenció a clients, proveïdors i auditors	Recepció, sala d'espera, sala de visites, taulell d'atenció
A-1000	Laboratoris de Qualitat	Anàlisi de matèries primeres, producte final i corrents intermedis	GC, UV-Vis, pH-metre, FT-NIR (Antaris II), campanes de gasos, cabina de flux laminar, balança analítica
A-1100	Laboratoris de R+I+D	Recerca i desenvolupament de millores del procés, nous catalitzadors i optimització	Reactors de prova, microscopi òptic, analitzador FT-NIR portàtil, equips de cromatografia, campana d'extracció
A-1200	Vestuaris	Serveis higiènics i canvi de roba per al personal	Vestuaris separats per gènere, dutxes, taquilles individuals, lavabos
A-1300	Oficines administratives	Gestió d'empresa, direcció, enginyeria, compres, vendes, RRHH	Despatxos, sala de reunions, zona de treball oberta, arxivadors
A-1400	Menjador	Espai per a l'alimentació i descans del personal	Cuina, fogons, campana extractora, neveres, microones, rentavaixelles, taules i cadires

A-1500	Plaques i Bateries	Generació d'energia elèctrica fotovoltaica i emmagatzematge per a l'autoconsum	Mòduls fotovoltaics, bateries d'emmagatzematge, sistema de monitoratge, proteccions elèctriques
A-1600	Magatzem	Emmagatzematge de recanvis, eines, matèries primeres auxiliars i productes de neteja	Prestatgeries metàl·liques, sistema GMAO, zona de recepció i expedició de materials, equips de manutenció (carretó elevador)
A-1700	Protecció contra incendis	Bassa, bombes, anells d'aspersió, escuma	Bassa d'incendis (reserva per a 1 hora), bombes d'incendis, anells d'aspersió als tancs, sistema d'escuma AFFF-AR als tancs de metanol, hidrants, BIEs, detectors de gasos
A-1800	Aparcament	Aparcament de personal i visites	Pàrquing amb places delimitades, accessos independents, il·luminació nocturna

1.6.1. Àrea A-100: Emmagatzematge de metanol

L'àrea A-100 està destinada a l'emmagatzematge del metanol, la matèria primera principal del procés FORMOX. Disposa de sis tancs verticals atmosfèrics de superfície (TK-101 a TK-106), cadascun amb una capacitat nominal de 200 m³, construïts segons la norma API 650 ^[1] amb un sostre fix cònic i un sostre flotant intern (IFR) d'alumini farcit d'escuma de poliuretà, que elimina pràcticament la cambra de vapors i redueix les emissions difuses [FT-TVA200-API650]. Les dimensions dels tancs són de 6,63 m de diàmetre exterior per 6,00 m d'alçada del cos cilíndric, amb un gruix estructural de 5,0 mm en totes les virol·les i el fons. El material escollit és acer inoxidable AISI 316L per a les parts en contacte amb el producte, si bé en la fitxa es preveu també acer al carboni amb pintura epoxídica per a fluids no corrosius; en el nostre cas s'ha optat per l'acer inoxidable per garantir la puresa del metanol i evitar la corrosió a llarg termini.

Cada tanc està equipat amb un sistema de *blanketing* de nitrogen (llaços de control P-TKxxx-1) per mantenir una pressió positiva de 5-15 mbar i una concentració d'oxigen inferior al 8% (LOC), tal com exigeix la ITC MIE-APQ 1 ^[6] per a líquids inflamables de classe B1 (punt d'inflamació del metanol: 12 °C). El sistema inclou un analitzador d'oxigen en continu (AT-O2-100) amb alarma d'oxigen alt (ASH-O2-100)^[17]. Els tancs disposen de connexions per a mesura de nivell per radar sense contacte (transmissors LT-101 a LT-106)^[13] i d'interruptors de nivell molt alt (LSHH-101 a LSHH-106) que activen el tancament de les vàlvules d'entrada (XV-101 a XV-106) i la parada de les bombes d'ompliment ^[14]. Les andanes de venteig incorporen vàlvules de pressió/buit (PVRV) i

apagallacs (flame arresters) per evitar la propagació d'ignicions. El cubeto de retenció (CB-100) té unes dimensions de 30,0 m × 15,0 m × 1,5 m, amb una capacitat geomètrica de 675 m³, suficient per contenir el 100% del volum del tanc més gran (200 m³) més els volums d'obstrucció dels altres cinc tancs (51,78 m³ cadascun fins a 1,5 m d'alçada). El revestiment del cubeto és de pintura epoxídica resistent a alcohols, amb un pendent de l'1% cap a un sumider proveït d'un sensor de detecció de líquids (LDS-100).

1.6.2. Àrea A-200: Evaporació i mescla

L'àrea A-200 prepara la mescla gasosa metanol-aire que alimentarà el reactor. Inclou dos evaporadors de carcassa i tubs (E-201 i E-202), un mesclador estàtic helicoidal (Mix-201) i un bescanviador de preescalfament (I-201). L'evaporador E-201 s'utilitza durant la posada en marxa, escalfat amb vapor d'aigua procedent de la caldera CV-701 (151 °C, 5 bar). En canvi, en règim continu, l'E-202 aprofita la calor de sortida del reactor (300 °C) per evaporar el metanol, constituint un dels exemples d'integració tèrmica de la planta. El mesclador estàtic Mix-201, dimensionat segons el mètode descrit en el manual de càlculs [Manual de càlculs, apartat 11.4.1], té un diàmetre nominal DN 900 i una longitud total de 5,5 m (6 elements helicoidals, amb una longitud per element d'1,5 vegades el diàmetre). La seva funció és homogeneïtzar el metanol gasós (5.047 kg/h) amb l'aire de procés (40.936 m³/h, 1,2 bar) abans de l'escalfament final a l'I-201. L'I-201 (bescanviador de carcassa i tubs, tipus TEMA BEM, àrea 83,8 m²) escalfa la mescla de 115 °C a 300 °C mitjançant oli tèrmic Dowtherm A provinent de la caldera CO-701. Els llaços de control associats (T-E201-1, T-E202-1, T-I201-1, F-Mix201-1) es descriuen al capítol 3 (Control i instrumentació).

1.6.3. Àrea A-300: Reacció (reactor R-301)

L'àrea A-300 representa la unitat principal del procés i allotja el reactor catalític multitubular R-301. Aquest reactor, dissenyat seguint el model cinètic de Deshmukh et al. (2005) i dimensionat mitjançant la simulació amb MATLAB (annex del manual de càlculs), conté 4.266 tubs de 33,4 mm de diàmetre exterior i 1.500 mm de longitud, fabricats en acer inoxidable AISI 316L. La càrrega de catalitzador Fe₂(MoO₄)₃ és de 3.990 kg (massa total), distribuïda en els tubs juntament amb catalitzador inert per evitar punts calents. El reactor opera en condicions isoterms (300 °C a l'entrada i a la sortida) i a una pressió de 2 atm. La calor generada per la reacció exotèrmica (6.620 kJ/s) s'extreu mitjançant un fluid refrigerant (aigua de torre en operació normal) que circula per la carcassa, dimensionada amb un diàmetre intern de 2.839 mm (càlcul segons el mètode

de Kern). El gruix de la carcassa, calculat segons el codi ASME Secció VIII Divisió 1 ^[2], és de 35 mm per a una pressió de disseny de 32,3 psi ($\approx 2,2$ bar) i una temperatura de disseny de 350 °C. El reactor disposa d'interlocks de seguretat: TSHH-301 (actuació a 350 °C) i PSHH-301 (actuació a 2,5 bar), que tanquen l'alimentació (XV-301) i obren les vàlvules de descompressió. La pressió a la sortida es controla amb el llaç P-R301-1 (vàlvula PCV-301 FO).

1.6.4. Àrea A-400: Absorció i estabilització

L'àrea A-400 comprèn la columna d'absorció T-401, el mesclador d'estabilització Mix-401 i el bescanviador de refrigeració I-401. La columna T-401 és empacada (material de rebliment: anells Raschig de $\frac{3}{4}$ " de polzada, gruix de paret 1/32"), amb un diàmetre intern de 4,0 m i una alçada total de 12,0 m (càlcul detallat al manual de càlculs, apartat 11.6.1). El diàmetre s'ha determinat a partir de la pèrdua de càrrega admesa (42 mmH₂O/m) i del paràmetre $K_4 = 1,5$, resultant una velocitat màssica del gas $G^* = 1,2$ kg/(m²·s). L'altura de la columna s'ha obtingut mitjançant el mètode del NUT (nombre d'unitats de transferència), que ha donat un valor de 11,72 unitats, i l'altura de la unitat de transferència (HUT) calculada a partir del coeficient de transferència de matèria $k_{ag} = 2,66 \cdot 10^{-6}$ mol/(Pa·m²·s), resultant una altura de rebliment de 12,03 m (sobredimensionada a 12 m). El gruix de la paret cilíndrica, calculat segons ASME ^[2], és de 5 mm per a una pressió de disseny de 30 psi (≈ 2 bar) i temperatura de disseny de 190 °C. El capçal i el fons el·lipsoïdals tenen el mateix gruix.

La columna rep aigua d'absorció (9.850 kg/h) pel cap i gasos de sortida del reactor (45.985 kg/h) pel fons. La formalina bruta obtinguda (12.662 kg/h, 65 °C) es barreja amb metanol d'estabilització (883,8 kg/h) al mesclador estàtic Mix-401 (DN 80, longitud 0,5 m) per evitar la polimerització. Finalment, la formalina estabilitzada es refreda fins a 19 °C a l'I-401 (bescanviador de carcassa i tubs, àrea 74,7 m²) mitjançant aigua glicolada a 5 °C procedent dels chillers CH-701/702. Els llaços de control F-T401-1, L-T401-1, P-T401-1 i F-Mix401-1 garanteixen l'estabilitat operativa.

1.6.5. Àrea A-500: Tractament de gasos de cua

L'àrea A-500 està dedicada al tractament dels gasos no absorbits que surten pel cap de la columna T-401 (44.087 kg/h, 59 °C). Aquest corrent conté metanol residual ($\approx 92,5$ kg/h), monòxid de carboni (≈ 32 kg/h), oxigen, nitrogen i traces de formaldehid. El tractament consisteix en un preescalfament a l'intercanviador I-501 (àrea 58,3 m²) amb Dowtherm A a 260 °C, que eleva la temperatura del gas fins a 220 °C, seguit d'un reactor catalític oxidatiu RC-501. El RC-501 és un reactor de llit fix (dimensions: 2 m de diàmetre interior per 2 m d'alçada, relació H/D = 1, volum del llit 4,78 m³, calculat per a una velocitat espacial horària de gas GHSV = 8.000 h⁻¹) que conté un catalitzador de Pt/Pd (0,3% / 0,1%) sobre γ -Al₂O₃. L'eficiència de destrucció del metanol i del CO és superior

al 99,9%. Els gasos tractats s'emeten per la xemeneia F-1, complint els límits del BREF LVOC ^[3] (metanol <20 mg/Nm³, formaldehid <5 mg/Nm³). El gruix de la carcassa del RC-501, calculat segons ASME ^[2], és de 5 mm (pressió de disseny 30 psi, temperatura de disseny 350 °C).

1.6.6. Àrea A-600: Emmagatzematge de formaldehid (producte final)

L'àrea A-600 allotja quatre tancs verticals de producte final (TK-601 a TK-604), cadascun de 200 m³ de capacitat nominal, construïts en acer inoxidable AISI 316L per resistir la corrosió del formaldehid (APQ 6 ^[6]). Les dimensions són idèntiques a les dels tancs de metanol: 6,63 m de diàmetre exterior per 6,00 m d'alçada, amb un gruix estructural de 5,0 mm més un marge de corrosió de 2,0 mm (gruix final 7,0 mm) tal com s'especifica a la fitxa tècnica [FT-TVA200-FORM-APQ6-7]^[6]. A diferència dels tancs de metanol, aquests disposen d'un sistema de calefacció per serpentí interior (aigua calenta) per mantenir la formalina entre 35 °C i 45 °C i evitar la precipitació de paraformaldehid; no obstant això, en el nostre disseny s'ha optat per mantenir el producte a temperatura ambient (15-25 °C) gràcies a l'estabilització amb metanol al 7%, però els tancs estan preparats per a la calefacció si fos necessari. El sistema de blanketing de nitrogen (llaços P-TK601-1 a P-TK604-1) manté la pressió positiva (5-15 mbar) i l'analitzador d'oxigen (AT-O2-600) garanteix O₂ <8%. Els vapors de formaldehid desplaçats durant l'ompliment es canalitzen cap a un rentador de gasos o al cremador (RC-501), no s'emeten directament a l'atmosfera, tal com exigeix la ITC MIE-APQ 7 ^[6] per a líquids tòxics. El cubeto de retenció (CB-101) té unes dimensions de 20,0 m × 15,0 m × 1,5 m (450 m³ geomètrics) i està revestit amb resina epoxi-fenòlica antiàcida.

1.6.7. Àrea A-700: Serveis auxiliars

L'àrea A-700 concentra els serveis generals que donen suport al funcionament de tota la planta. Inclou:

- **Generació de vapor:** caldera elèctrica CV-701 (Bosch ELSB 4, 2.041 kW) ^[10] per a la posada en marxa.
- **Calderes d'oli tèrmic:** CO-701 (ATTSU FT-1500, 1.744 kW) ^[9] per a l'intercanviador I-201, i CO-702 (ATTSU FT-1250, 1.453 kW) ^[9] per a l'I-501. Ambdues cremen gas natural (rendiment 92%). El consum de gas natural calculat és de 158,3 Nm³/h per a la CO-701 i 84 Nm³/h per a la CO-702, amb emissions de CO₂ associades de 322 kg/h i 171 kg/h respectivament.
- **Chillers:** CH-701 i CH-702 (Daikin EWAD570T-XLB2, 570 kW cadascun, COP = 5) ^[11], que refreden aigua glicolada (40%) a 5 °C per a l'I-401. La potència elèctrica consumida per cada chiller és de 112,5 kW.

- **Bufadors d'aire:** B-701 i B-702 (Atlas Copco ZM 9 VSD ^[8], 1.000 kW, cabal 40.936 m³/h, pressió 1,2 bar), que subministren l'aire de procés.
- **Generadors de nitrogen:** GN-701 i GN-702 (Atlas Copco NGP 160+ PPM ^[7]), que produeixen nitrogen amb una puresa del 99,99% i un cabal de 35 Nm³/h cadascun. El pic de demanda de nitrogen per a la inertització dels tancs és de 80 Nm³/h (considerant el buidatge simultani de dos tancs de producte i dos de metanol, més la demanda base de 15 Nm³/h, amb un marge del 20%). Un tanc pulmó de N₂ (TN-701) de 500 litres a 8 bar garanteix l'autonomia durant tres minuts de pic.
- **Descalcificador d'aigua:** DC-701 (Ultraline BI-BLOC), que tracta l'aigua de xarxa per a les torres de refrigeració i per a l'absorció.
- **Transformadors:** TA-701 i TA-702, per a la distribució elèctrica a 400 V/690 V.

1.6.8. Àrea A-800: Calderes (detall complementari)

Tot i que les calderes es descriuen a l'A-700, l'àrea A-800 es reserva a l'edifici específic de generació de calor, que conté les calderes d'oli tèrmic i de vapor, amb les seves vàlvules de seguretat, quadres de control i sistemes d'evacuació de fums. Aquesta segregació física facilita el manteniment i redueix el risc d'incendi a les zones de procés.

1.6.9. Àrea A-900: Torres de refrigeració

L'àrea A-900 conté dues torres de refrigeració (TR-701 i TR-702, model EWK EWB-4600) ^[18], cadascuna amb una potència de dissipació de 7.355 kW. Treballen en alternança setmanal per distribuir el desgast. Refreden l'aigua del circuit secundari que circula per la carcassa del reactor R-301 i per l'intercanviador I-301, baixant la temperatura de 65 °C a 30 °C. El cabal de recirculació és de 155 m³/h per torre. Les pèrdues per evaporació (aproximadament un 2% per cada 10 °C de salt tèrmic) es compensen amb aigua de reposició tractada pel descalcificador DC-701. Les torres disposen de sistemes d'addició de biocides i anticorrosius per evitar la formació de Legionel·la i incrustacions.

1.6.10. Àrea A-1000: Protecció contra incendis

L'àrea A-1000 inclou la bassa d'aigua contra incendis (amb una reserva suficient per a una hora d'actuació), les bombes d'incendis i la xarxa d'anells d'aspersió i hidrants. Els tancs de metanol (A-100) estan protegits per un sistema d'escuma de baixa expansió tipus AFFF-AR (resistent a alcohols) amb cambres d'injecció fixes, mentre que els tancs de formaldehid compten només amb anells d'aspersió d'aigua per refredament. A més, s'instal·len BIEs (boques d'incendi equipades) i detectors de gasos (metanol, formaldehid, CO) connectats al sistema d'alarma.

1.6.11. Àrea A-1100: Aparcament

L'àrea A-1100 és l'aparcament privat per a treballadors i vehicles de visita. Està dimensionat per complir la normativa urbanística (una plaça per cada 150 m² construïts) i disposa d'un accés de direcció única independent de la zona de càrrega de camions.

1.6.12. Àrea A-1200: Oficines, laboratoris, sala de control, taller i altres

Aquesta àrea polivalent alberga les instal·lacions de suport personal i tècnic:

- **Sala de control:** equipada amb sistemes DCS i SCADA per a la supervisió en temps real de totes les variables de procés. És una sala climatitzada i aïllada acústicament, amb accés restringit.
- **Laboratoris:** destinats al control de qualitat (anàlisi de formalina, metanol residual, àcid fòrmic, pH) i al suport a I+D. Disposen d'instruments com cromatògrafs de gasos i espectrofotòmetres UV.
- **Taller de manteniment:** equipat amb eines, equips de soldadura i un magatzem de recanvis crítics (segells, juntes, filtres, etc.).
- **Oficines administratives:** per als departaments de direcció, enginyeria, compres, vendes i recursos humans.
- **Menjador i vestuaris:** per al personal de torn, amb cuina, dutxes i taquilles.

1.6.13. Àrea A-1300: Logística i expedició (cargadero)

L'àrea A-1300 comprèn la zona de càrrega i descàrrega de camions cisterna de metanol (matèria primera) i de formalina (producte final). Inclou una solera impermeable de formigó amb revestiment epoxídic, un pendent de l'1% cap a un sumider de recollida de vessaments, i bàscules per pesar els camions a l'entrada i sortida. Les operacions de transferència utilitzen acoblaments de tancament en sec (*dry-disconnect*) per evitar gotejos, i es disposa de connexió equipotencial per dissipar càrregues electroestàtiques. Dutxes d'emergència i rentauills es troben a menys de 10 metres dels punts de connexió. Tots els moviments de productes perillosos s'efectuen segons el Reglament ADR (panells taronges, etiquetatge CLP, etc.).

Aquesta distribució en àrees garanteix un flux lògic del procés (des de l'emmagatzematge de metanol fins a l'expedició de formalina), una separació adequada de les zones de risc (inflamables, tòxiques, corrosives) i una accessibilitat òptima per al manteniment i les emergències. Els plànols detallats de cada àrea es presenten al capítol de plànols (apartat 10).

1.7. Especificacions i necessitats de serveis

La planta de producció de formaldehid requereix una sèrie de serveis auxiliars per al funcionament continu de les unitats de procés. Aquests serveis es reben de les xarxes del polígon industrial (electricitat, gas natural, aigua) o es generen internament (vapor, aire comprimit, nitrogen, aigua glicolada). Les especificacions de cada servei es detallen a continuació.

1.7.1. Electricitat

La planta disposa d'una connexió a la xarxa de mitja tensió del polígon (20 kV a peu de parcel·la). Per a la distribució interna, s'instal·la una estació transformadora (espai delimitat al plànol) amb dos transformadors (TA-701 i TA-702) que redueixen la tensió a 400 V i 690 V per a la xarxa de baixa tensió. El subministrament és de 50 Hz, amb una potència total instal·lada estimada d'1.453 kW (incloent bufadors, chillers, bombes, generadors de N₂, il·luminació i sistemes de control). Per garantir la continuïtat de les operacions crítiques (sala de control, DCS, SIS, alarmes), es disposa d'un sistema d'alimentació ininterrompuda (SAI) amb una autonomia mínima de 30 minuts.

1.7.2. Vapor

El vapor d'aigua s'utilitza principalment durant la posada en marxa per escalfar l'evaporador E-201. La caldera elèctrica CV-701 (Bosch ELSB 4)^[10] subministra fins a 3.000 kg/h de vapor a 151 °C i 5 bar (sobrepessió). En condicions normals de funcionament (règim continu), la caldera de vapor no opera, ja que la calor necessària per evaporar el metanol s'obté de la recuperació tèrmica de la corrent de sortida del reactor.

1.7.3. Aigua de refrigeració

L'aigua de refrigeració es fa servir per dissipar la calor de la reacció al reactor R-301 i per a altres serveis de refredament (intercanviador I-301). El sistema està format per dues torres de refrigeració (TR-701 i TR-702, model EWK EWB-4600)^[18], cadascuna amb una potència de dissipació de 7.355 kW. Treballen en alternança setmanal, amb un cabal de recirculació de 155 m³/h (per torre) i un salt tèrmic de 35 °C (entrada a 65 °C, sortida a 30 °C). Les pèrdues per evaporació (aproximadament un 2% per cada 10 °C de salt tèrmic) es compensen amb aigua de reposició procedent del descalcificador DC-701, que tracta l'aigua de xarxa per evitar incrustacions. El cabal de reposició calculat és de 10,85 m³/h.

1.7.4. Aigua glicolada

Per a la refrigeració final de la formalina a l'intercanviador I-401 (de 65 °C a 19 °C) s'utilitza aigua glicolada al 40% (propilenglicol). El fluid es refreda mitjançant dos chillers en paral·lel (CH-701 i CH-702, Daikin EWAD570T-XLB2)^[11], cadascun amb una potència de refrigeració de 570 kW i un COP de 5, de manera que la potència elèctrica consumida

per cada chiller és de 112,5 kW. El cabal total d'aigua glicolada és de 65.000 kg/h (32.500 kg/h per chiller), i la temperatura de sortida dels chillers és de 5 °C, amb una pressió de treball de 3 bar.

1.7.5. Aire comprimit

L'aire comprimit s'utilitza per a l'alimentació del reactor (com a font d'oxigen) i per a l'accionament de vàlvules pneumàtiques. Dos bufadors centrífugs (B-701 i B-702, Atlas Copco ZM 9 VSD ^[8]) subministren un cabal de cadascun a una pressió de 1,2 bar i una temperatura de sortida ≤ 45 °C. La potència instal·lada de cada bufador és de 1.000 kW. Normalment opera un sol, mentre l'altre roman en *stand-by* per a tasques de manteniment o com a reserva. L'aire captat de l'atmosfera es filtra prèviament per eliminar partícules en suspensió.

1.7.6. Nitrogen

El nitrogen s'empra per a la inertització dels tancs d'emmagatzematge (blanketing) i per a les purgues de línies abans del manteniment. Es genera in situ mitjançant dos generadors PSA (GN-701 i GN-702, Atlas Copco NGP 160+ PPM) ^[7], cadascun amb una capacitat de producció de 35 Nm³/h i una puresa del 99,99% (O₂ <0,01%). El pic de demanda de nitrogen, calculat considerant el buidatge simultani de dos tancs de producte (2 × 14,85 m³/h) i dos tancs de metanol (2 × 6,94 m³/h), més una demanda base de 15 Nm³/h (10 tancs × 1,5 Nm³/h·tanc) i un marge de seguretat del 20%, és de 70 Nm³/h (arrodonit a 80 Nm³/h per a disseny). Per absorbir les fluctuacions, s'instal·la un tanc pulmó de nitrogen (TN-701) de 500 litres de capacitat, que treballa a una pressió de 8 bar (màxima admissible 11 bar) i proporciona una autonomia de tres minuts al règim de pic. La vàlvula de seguretat del tanc està tarada a 11 bar.

1.7.7. Gas natural

El gas natural s'utilitza com a combustible per a les calderes d'oli tèrmic (CO-701 i CO-702). La connexió a peu de parcel·la és a mitja pressió (1,5 kg/cm² $\approx$ 1,5 bar). El consum de gas natural calculat per a la caldera CO-701 (1.744 kW tèrmics, rendiment 92%) és de 158,3 Nm³/h, mentre que per a la CO-702 (1.453 kW) és de 84 Nm³/h. Les emissions de CO₂ associades són de 322 kg/h i 171 kg/h respectivament, considerant un factor d'emissió de 2,03 kg CO₂/Nm³ de gas natural.

1.7.8. Aigua de xarxa i aigua contra incendis

L'aigua de xarxa es rep de l'acometuda municipal, amb una pressió de 4 kg/cm² ($\approx$ 4 bar) i un diàmetre de connexió de 200 mm. S'utilitza per a l'aigua d'absorció (després de descalcificació), per a la reposició de les torres de refrigeració i per a usos sanitaris. Per a la protecció contra incendis, es disposa d'una xarxa d'aigua independent alimentada

per una bassa d'incendis i un conjunt de bombes, amb una pressió màxima de 4 bar a la connexió del polígon i una pressió de servei de ≥ 6 bar a la xarxa interior.

1.8. Organització de l'empresa i personal

1.8.1. Estructura departamental

L'estructura organitzativa de METAFORM s'ha dissenyat per garantir una operació segura, eficient i alineada amb els objectius productius de la planta. L'empresa s'organitza en diversos departaments funcionals que cobreixen les activitats de producció, manteniment, seguretat i medi ambient, qualitat, logística, laboratori, investigació i desenvolupament, així com les tasques de direcció i gestió administrativa.

Aquesta estructura permet assegurar el correcte funcionament de la instal·lació, la coordinació entre àrees i el compliment dels requisits tècnics, operatius i normatius aplicables.

La descripció detallada dels departaments, les seves funcions, l'organigrama i l'organització dels torns de treball es desenvolupa al capítol 9 (Operació de la planta).

1.8.2. Personal necessari en planta

El personal propi de la planta (excloent serveis subcontractats) està format per aproximadament 129 treballadors, distribuïts per torns i departaments. La 1 del capítol 9. Operacions de Planta resumeix el nombre de treballadors per torn i total per a cada departament. Els torns cobreixen les 24 hores del dia, 330 dies a l'any, amb una rotació de 5 grups (matí, tarda, nit, cap de setmana diürn i cap de setmana nocturn). El personal de suport (oficines, laboratori, manteniment de dia) treballa en horari partit (8-17 h), mentre que els operaris de procés i manteniment de torn cobreixen la producció contínua.

1.8.3. Torns de treball

L'organització de torns s'ha establert segons el conveni col·lectiu de la indústria química. El personal operatiu (producció, manteniment de torn, laboratori de control) treballa en torns rotatius de 8 hores, amb un esquema de 5 grups que permet cobrir les 24 hores del dia, els 7 dies de la setmana. Els caps de setmana s'organitzen en torns de 12 hores (diürn i nocturn) per minimitzar la interrupció operativa. Per a una descripció detallada dels horaris i del nombre de persones per torn, vegeu el capítol 9 (apartat 9.8).

1.9. Planificació temporal de la construcció

La construcció de la planta de formaldehid s'ha planificat en un horitzó temporal de **100 setmanes (aproximadament 700 dies laborables, equivalent a uns 2 anys naturals)**. S'han definit 29 tasques principals, amb les seves durades en dies i les precedències. A partir d'aquestes dades s'ha elaborat el diagrama de Gantt (Figura 4.1 i 4.2) i s'ha identificat el camí crític.

1.9.1. Llista de tasques, durades i precedències

La **Taula 26** resumeix les tasques de la construcció, les durades (en dies laborables, considerant jornades de 8 hores) i les precedències. La numeració de les tasques segueix l'ordre lògic del projecte.

Taula 26. Planificació temporal de la construcció de la planta de formaldehid: durades (en setmanes), precedències i dates d'inici estimades

Fase	Nº Tasca	Descripció de la Tasca de Construcció	Durada (Setmanes)	Precedència	Data d'Inici Estimada
Preparació	1	Enginyeria conceptual i de detall	24	–	01/01/2027
Preparació	2	Obtenció de llicències i permisos ambientals	28	–	01/01/2027
Preparació	3	Contractació de proves de sòl i geotècnia	4	2	19/07/2027
Obra civil	4	Neteja i anivellament del terreny	6	2	19/07/2027
Obra civil	5	Fonaments de la zona de procés (reforçats per a reactor i columna)	12	4	30/08/2027
Obra civil	6	Fonaments de tancs d'emmagatzematge (A-100 i A-600)	8	4	30/08/2027
Obra civil	7	Construcció de l'edifici de serveis (A-700) i sala de control (A-800)	16	5,6	22/11/2027
Obra civil	8	Construcció del taller, vestuaris i menjador (A-1200, A-1400, A-1500)	12	5,6	22/11/2027
Obra civil	9	Vials interiors, aparcament (A-1800) i tanques perimetrals	10	7	15/03/2028
Subministraments i equipament	10	Comanda de reactor R-301 (llarga durada)	28	1	01/01/2027
Subministraments i equipament	11	Comanda de columna T-401 i bescanviadors	24	1	01/01/2027
Subministraments i equipament	12	Recepció i instal·lació de tancs de metanol (TK-101 a TK-106)	8	6	30/08/2027
Subministraments i equipament	13	Recepció i instal·lació de tancs de formaldehid (TK-601 a TK-604)	6	6	30/08/2027

Subministraments i equipament	14	Muntatge del reactor R-301 i connexió a estructures	10	10,5	22/11/2027
Subministraments i equipament	15	Muntatge de la columna d'absorció T-401 i empacament	8	11,5	22/11/2027
Subministraments i equipament	16	Instal·lació de bescanviadors I-201, I-301, I-401, I-501	6	14,15	31/01/2028
Subministraments i equipament	17	Instal·lació de calderes (CV-701, CO-701, CO-702) i chillers (CH-701/702)	5	7	22/11/2027
Subministraments i equipament	18	Instal·lació de bufadors d'aire (B-701/702) i generadors N ₂ (GN-701/702)	4	7	22/11/2027
Canonades i serveis	19	Xarxa de canonades de procés (acer inoxidable AISI 316L)	14	16,17,18	14/03/2028
Canonades i serveis	20	Xarxa de canonades de serveis (vapor, aigua, nitrogen, aire comprimit)	10	17	14/03/2028
Canonades i serveis	21	Instal·lació de vàlvules, accessoris i línies de venteig	8	19,2	19/06/2028
Canonades i serveis	22	Muntatge de les torres de refrigeració (TR-701/702) i connexions	6	18	22/11/2027
Electricitat i control	23	Instal·lació de la subestació elèctrica i transformadors (TA-701/702)	6	7	22/11/2027
Electricitat i control	24	Cablejat de força per a motors i equips	10	23,16	14/03/2028
Electricitat i control	25	Instal·lació del sistema DCS/SCADA i instrumentació de camp	12	21,24	19/06/2028
Electricitat i control	26	Configuració del SIS (sistema de seguretat instrumentada) i proves d'interlocks	6	25	11/09/2028
Proves i acabats	27	Proves hidrostàtiques de canonades i tancs	4	21	19/06/2028
Proves i acabats	28	Calibratge d'instruments i comprovació de llaços	4	26	11/09/2028
Proves i acabats	29	Aïllament tèrmic d'equips i canonades	5	27,28	09/10/2028
Proves i acabats	30	Neteja final de la planta i retirada de runes	2	29	13/11/2028
Proves i acabats	31	Prova de funcionament en sec (sense reactius) i simulació d'emergències	3	30	27/11/2028
DURADA TOTAL ESTIMADA DEL PROJECTE			≈ 100	Setmanes (≈ 2 anys)	Desembre 2028

1.9.2. Diagrama de Gantt de la construcció

A les Figures 4.1 i 4.2 es mostra el diagrama de Gantt elaborat a partir de la planificació de la construcció de la planta de formaldehid. El diagrama representa gràficament les

31 activitats definides a la Taula 35, amb les seves durades en setmanes i les relacions de precedència entre elles. L'eix vertical recull les tasques agrupades per fases (preparació, obra civil, subministraments i equipament, canonades i serveis, electricitat i control, proves i acabats), mentre que l'eix horitzontal indica l'escala temporal en mesos, des de l'inici del projecte (gener de 2027) fins a la finalització prevista (desembre de 2028). El diagrama s'ha generat mitjançant eines de full de càlcul (Excel) amb format condicional i càlcul automàtic de dates. Les barres horitzontals de diferents colors permeten distingir les fases, i s'ha ressaltat el camí crític en color vermell per a una millor identificació visual.

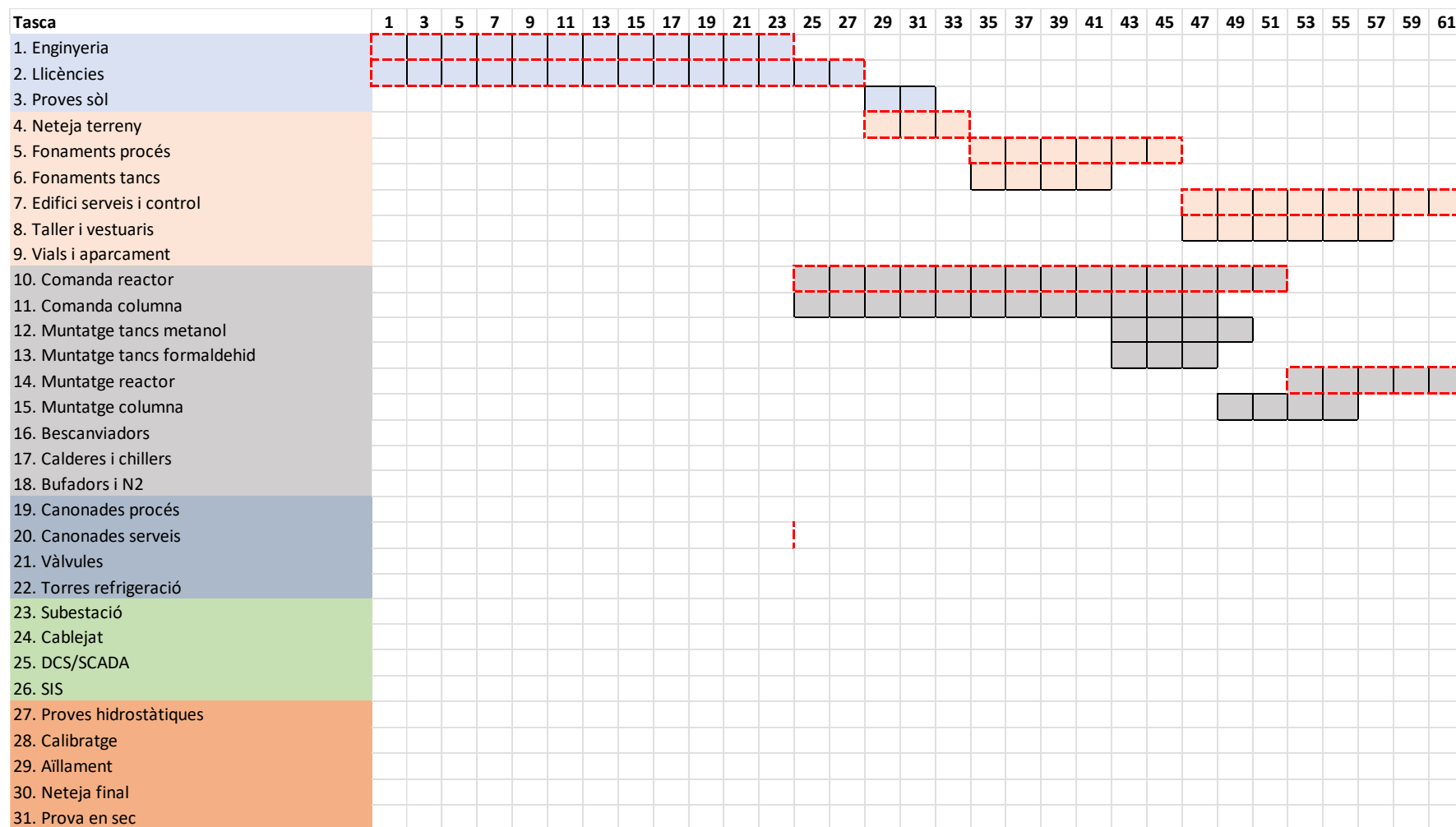


Figura 4.1 Diagrama de Gantt de la construcció de la planta de formaldehid (escala: 1 columna = 2 setmanes)

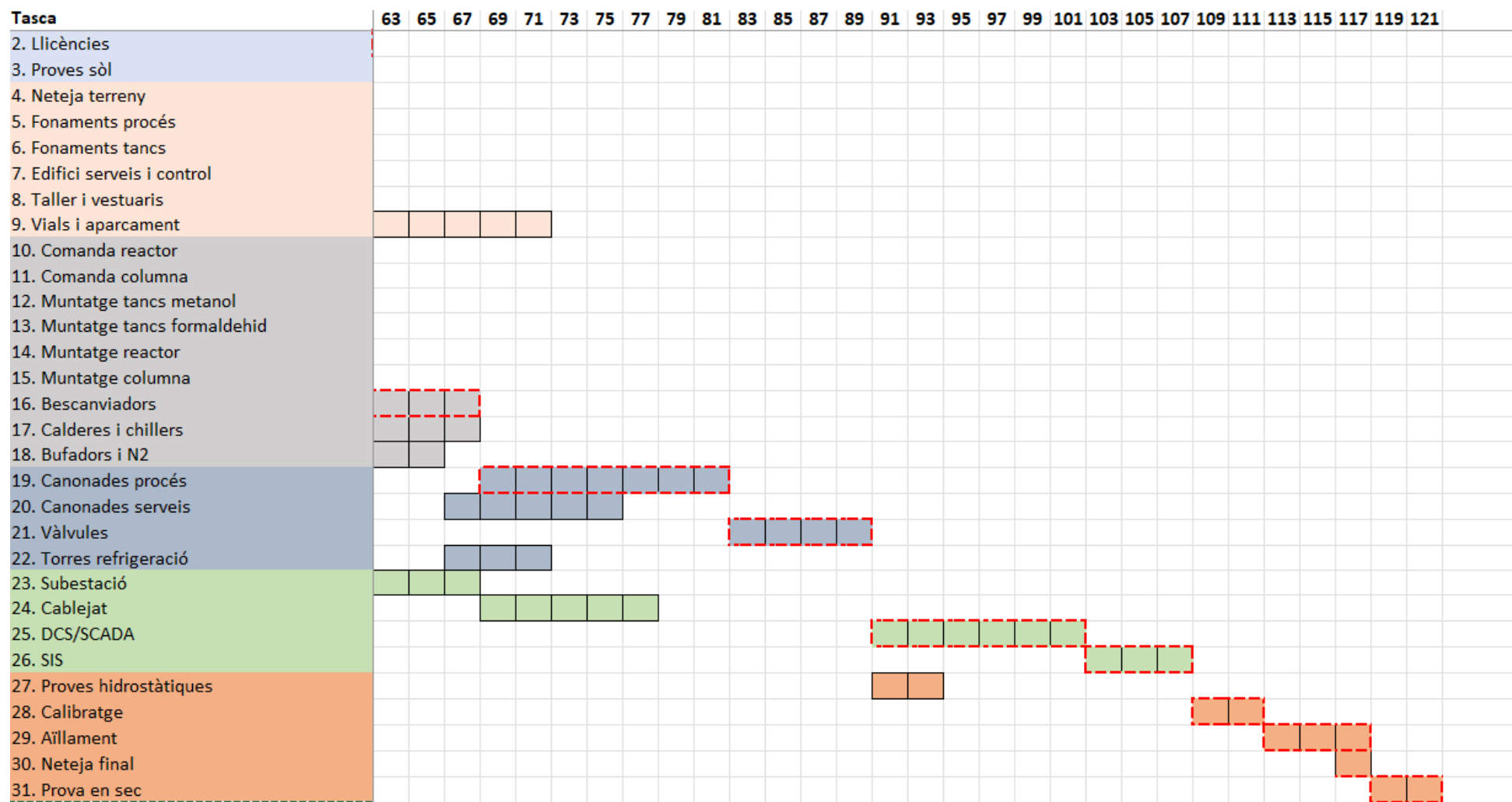


Figura 4.2 Diagrama de Gantt de la construcció de la planta de formaldehid (escala: 1 columna = 2 setmanes)

1.9.3. Identificació del camí crític

A partir de l'anàlisi de les precedències de la Taula 26, el camí crític de la construcció està format per les següents tasques en ordre cronològic:

Enginyeria (1) → Llicències (2) → Neteja terreny (4) → Fonaments zona procés (5) → Edifici serveis i sala control (7) → Comanda reactor R-301 (10) → Muntatge reactor (14) → Instal·lació bescanviadors (16) → Canonades de procés (19) → Vàlvules i accessoris (21) → Instal·lació DCS/SCADA (25) → Configuració SIS (26) → Calibratge (28) → Aïllament tèrmic (29) → Neteja final (30) → Prova en sec (31).

Aquest conjunt d'activitats determina la durada mínima del projecte, estimada en 100 setmanes (≈700 dies laborables). La resta de tasques disposen de marge i es poden executar en paral·lel sense afectar la finalització.

1.10. Bibliografia

Normatives i documents tècnics

[1] American Petroleum Institute. (2020). *API Standard 650: Welded tanks for oil storage* (13a ed.). API Publishing Services.

[2] American Society of Mechanical Engineers. (2023). *ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, Division 1: Rules for construction of pressure vessels*. ASME International.

[3] Comissió Europea. (2016). *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Large Volume Organic Chemicals (LVOC BREF)*. Joint Research Centre, European IPPC Bureau. En línia. Última consulta: 18 de maig de 2026.

[4] European Parliament and Council. (2014). Directive 2014/34/EU of the European Parliament and of the Council of 26 February 2014 on the harmonisation of the laws of the Member States relating to equipment and protective systems intended for use in potentially explosive atmospheres (ATEX). *Official Journal of the European Union*, L 96, 29.3.2014, p. 309–356. En línia. Última consulta: 22 de maig de 2026.

[5] Ministerio de Fomento. (2002). *Norma de Construcción Sismorresistente Española (NCSE-02)*. Boletín Oficial del Estado. En línia. Última consulta: 5 de juny de 2026.

[6] Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. (2017). *Real Decreto 656/2017, de 23 de junio, por el que se aprueba el Reglamento de Almacenamiento de Productos Químicos y sus Instrucciones Técnicas Complementarias (MIE APQ 1, 6, 7)*. Boletín Oficial del Estado, núm. 149, de 24 de junio de 2017. En línia. Última consulta: 3 de juny de 2026.

Catàlegs de fabricants i fitxes tècniques

[7] Atlas Copco. (2024). *Generadors de nitrogen sèrie NGP+ PPM: manual de producte*. Atlas Copco Compressors. En línia. Última consulta: 27 de maig de 2026.

[8] Atlas Copco. (2024). *Bufadors centrífugs ZM 9 VSD: fitxa tècnica*. Atlas Copco Compressors. En línia. Última consulta: 27 de maig de 2026.

[9] ATTSU. (2023). *Calderes de fluid tèrmic sèrie FT: manual d'instal·lació i operació*. ATTSU Termica. En línia. Última consulta: 15 de maig de 2026.

[10] Bosch Industriekessel. (2025). *Caldera elèctrica ELSB 4: manual de producte*. Bosch Industriekessel GmbH. En línia. Última consulta: 2 de juny de 2026.

- [11] Daikin Applied Europe. (2018). *Chillers EWAD570T-XLB2: documentació tècnica*. Daikin Applied Europe. En línia. Última consulta: 19 de maig de 2026.
- [12] Endress+Hauser. (2024). *Cerabar PMP21 – Transmissors de pressió: fitxa tècnica*. Endress+Hauser. En línia. Última consulta: 29 de maig de 2026.
- [13] Endress+Hauser. (2024). *Micropilot FMR10 – Transmissor de nivell radar: fitxa tècnica*. Endress+Hauser. En línia. Última consulta: 29 de maig de 2026.
- [14] Endress+Hauser. (2024). *Liquiphant FTL31 – Interruptor de nivell per vibració: fitxa tècnica*. Endress+Hauser. En línia. Última consulta: 29 de maig de 2026.
- [15] Endress+Hauser. (2024). *Proline Promag P 10 – Cabalímetre electromagnètic: fitxa tècnica*. Endress+Hauser. En línia. Última consulta: 29 de maig de 2026.
- [16] Endress+Hauser. (2024). *Proline Prowirl D 200 – Cabalímetre de vòrtex: fitxa tècnica*. Endress+Hauser. En línia. Última consulta: 29 de maig de 2026.
- [17] Endress+Hauser. (2024). *OXY5500 precision oxygen analyzer: documentació tècnica*. Endress+Hauser. En línia. Última consulta: 30 de maig de 2026.
- [18] EWK. (2024). *Torres de refrigeració sèrie EWB: catàleg tècnic*. EWK Umwelttechnik. En línia. Última consulta: 21 de maig de 2026.
- [19] Siemens. (2024). *SIMATIC S7-1500 CPU 1511-1 PN: fitxa tècnica*. Siemens Digital Industries. En línia. Última consulta: 4 de juny de 2026.
- [20] Siemens. (2024). *SIMATIC WinCC Runtime Advanced: manual de l'usuari*. Siemens Digital Industries. En línia. Última consulta: 4 de juny de 2026.
- [21] Thermo Fisher Scientific. (2024). *Antaris II FT-NIR Analyzer: user guide*. Thermo Fisher Scientific. En línia. Última consulta: 6 de juny de 2026.
- [22] Ultraline. (2025). *Descalcificador BI-BLOC: fitxa tècnica*. Ultraline Water Treatment. En línia. Última consulta: 8 de juny de 2026.

Dades climatològiques

- [27] Dirección General de Protección Civil y Emergencias. (2024). *Vents forts: mesures d'autoprotecció*. Ministerio del Interior, Gobierno de España. En línia. Última consulta: 1 de juny de 2026.
- [28] WeatherSpark. (2025). *El clima i el temps mitjà a Tarragona, Espanya*. <https://weatherspark.com>. En línia. Última consulta: 7 de juny de 2026.