



PLANTA PER LA FABRICACIÓ DE FORMALDEHID A PARTIR DE METANOL

TREBALL DE FINAL DE GRAU
ENGINYERIA QUÍMICA

Juny 2026

UAB
Universitat
Autònoma
de Barcelona

Escola
d'Enginyeria

Erik Benito
Alex García
Guillem Iglesias
Adrià Navarro
Mar Pastor
Alejandro Rasero

Tutor: Josep A. Torà





PLANTA PER LA FABRICACIÓ DE FORMALDEHID A PARTIR DE METANOL

TREBALL DE FINAL DE GRAU
ENGINYERIA QUÍMICA

Juny 2026

UAB
Universitat
Autònoma
de Barcelona

Escola
d'Enginyeria

Erik Benito
Alex García
Guillem Iglesias
Adrià Navarro
Mar Pastor
Alejandro Rasero

Tutor: Josep A. Torà



Taula de continguts

1.1 Introducció	2
1.1.1 Bases del projecte.....	2
1.1.2 Abast del projecte	2
1.1.3 Localització de la planta	3
1.2 Característiques dels reactius i productes	5
1.2.1 Metanol	5
1.2.2 Oxigen	6
1.2.3 Aigua	6
1.2.4 Formaldehid	7
1.2.5 Formalina	8
1.3 Descripció del procés de producció	8
1.4 Diagrama de procés	11
1.5 Balanç de matèria i d'energia.....	14
1.5.1 Balanç de matèria	14
1.5.2 Balanç d'energia	15
1.6 Definició de les àrees de la planta.....	15
1.7 Especificacions i necessitats dels serveis de planta	18
1.7.1 Aigua	18
1.7.2 Nitrogen.....	19
1.7.3 Oli tèrmic	20
1.7.4 Aire comprimit	20
1.7.5 Electricitat	21
1.8 Planificació temporal de construcció	21
1.9 Bibliografia.....	23

1.1 Introducció

L'objectiu principal d'aquest projecte és fer el disseny integral d'una planta industrial de producció de formol o formaldehid a partir de l'oxidació catalítica del metanol per estudiar la seva viabilitat. En aquest, es realitza el disseny del procés, el dimensionament dels equips, la implementació de control integrat, un estudi de la viabilitat econòmica i el compliment de normativa vigent de sostenibilitat i seguretat. El disseny realitzat ha de garantir un funcionament òptim, una gestió eficient dels recursos i l'energia, així com assegurar la minimització de riscos i impactes ambientals.

En aquest primer apartat es presenten totes les especificacions i bases fonamentals en què es basa el projecte Formachem.

1.1.1 Bases del projecte

A continuació es fa una descripció breu de les especificacions clau del projecte:

- La capacitat de producció és de 100.000 tones/any de formaldehid en solució aquosa al 37% estabilitzada amb metanol.
- La fabricació del formaldehid es fa a partir de metanol i oxigen, el procés és continu i el que s'ha escollit és l'anomenat procés FORMOX.
- La planta està ubicada al terreny fictici del Polígon Industrial "Satèl·lits" al terme municipal de Tarragona.
- La planta està dissenyada per operar durant 330 dies l'any i realitza 1 parada anual al mes d'agost.

1.1.2 Abast del projecte

L'abast d'aquest projecte inclou el disseny conceptual i bàsic d'una planta de producció contínua de formaldehid en solució aquosa al 37%, estabilitzada amb metanol, a partir de metanol i aire com a matèries primeres. El projecte considera tant els aspectes tècnics del procés com els criteris de seguretat, medi ambient, operació i funcionament general de la planta, definint les unitats principals, els serveis auxiliars i l'organització global de la instal·lació. Per tal d'assegurar l'èxit en el desenvolupament i la viabilitat de la planta industrial, l'abast del projecte ha d'integrar les següents especificacions:

- **Desenvolupament integral de l'esquema productiu:** Des de l'arribada i el dipòsit dels reactius inicials fins a la purificació i envasat final del formaldehid.
- **Dimensionament i especificació d'equips:** Descripció detallada de les operacions de condicionament dels reactius, reacció química, aprofitament tèrmic, separació i purificació del producte. Això inclou el disseny de reactors, columnes, bescanviadors de calor, sistemes de bombeig i tancs d'emmagatzematge, entre d'altres.
- **Automatització i control:** La incorporació dels sistemes de control i instrumentació necessaris per supervisar els paràmetres crítics de l'operació.

- **Disseny d'infraestructures:** La definició de les àrees auxiliars i dels serveis necessaris per al funcionament de la planta, incloent-hi les zones d'emmagatzematge de matèries primeres, emmagatzematge de producte acabat, oficines, laboratoris de control de qualitat, vestuaris, àrees de serveis i altres zones auxiliars.
- **Seguretat industrial i salut laboral:** L'estudi dels aspectes de seguretat i higiene necessaris per garantir una operació segura tant del procés com del personal, tenint en compte les característiques pròpies de les substàncies implicades i de les condicions d'operació de la planta.
- **Sostenibilitat i impacte ambiental:** Una anàlisi general dels efectes que pot tenir la construcció i el funcionament de la planta sobre el medi ambient, així com la consideració dels sistemes necessaris per al tractament d'aigües i gasos.
- **Avaluació econòmica:** Una anàlisi dels costos totals del projecte, tenint en compte els ingressos i totes les despeses anuals i inversions inicials i, concloure amb un estudi de la seva rendibilitat.
- **Gestió organitzativa i implantació:** La definició general de l'organització de la planta i de les infraestructures necessàries perquè aquesta pugui operar correctament, incloent-hi tant les unitats de producció com la resta de zones de suport.

Aquest abast estableix els límits del projecte i permet tenir una visió global de tots els aspectes principals que s'han de considerar en el disseny de la futura planta formaldehid.

1.1.3 Localització de la planta

La planta es projecta en un terreny fictici situat al Polígon Industrial “**Satèl·lits**”, al terme municipal de Tarragona.

Aquesta ubicació es pren com a punt de partida per desenvolupar el disseny general de la planta i distribuir les diferents zones que la formaran. En aquest terreny s'han ubicat les unitats de procés, les zones d'emmagatzematge, els serveis auxiliars i la resta d'espais necessaris per al funcionament complet de la instal·lació.

El fet que la planta estigui situada dins d'un polígon industrial fa que el seu disseny s'hagi d'adaptar a les condicions urbanístiques establertes per a la parcel·la, així com als serveis disponibles a peu de terreny. Per això, la localització és un aspecte important dins del projecte, ja que condiciona la implantació de la planta i l'organització general de tots els espais. A continuació, a la *Taula 1.1.1* es mostren tots els paràmetres que s'han tingut en compte per iniciar el disseny de la planta, per tal de saber com és la parcel·la on està situada i els requisits que ha de complir.

Taula 1.1.1 Paràmetres per l'edificació de la parcel·la

Edificabilitat	1,5 m ² sostre/m ² sòl
Ocupació màxima de la parcel·la	75%
Ocupació mínima de la parcel·la	20% de l'ocupació màxima
Reculades	5 m a vials i veïns
Alçada màxima	16 m i 3 plantes (excepte en producció i justificant la necessitat)
Alçada mínima	4 m i 1 planta
Aparcaments	1 plaça/150 m ² construïts
Distància entre edificis	1/3 de l'edifici més alt amb un mínim de 5 m

Per poder visualitzar l'organització de la planta, a la *Figura 1.1.1* es representa el plànol del terreny i la identificació de les àrees que hi ha en aquest.

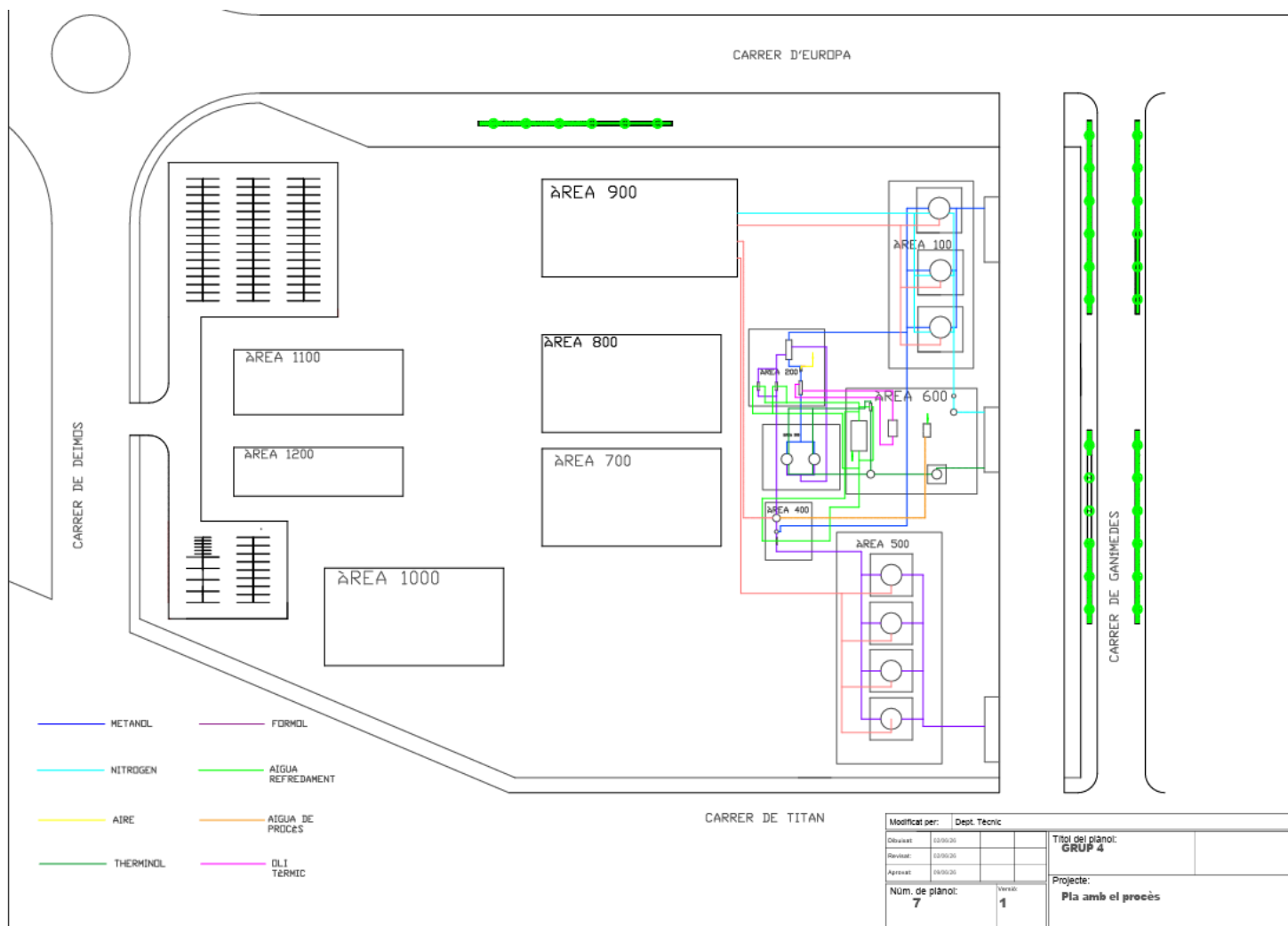


Figura 1.1.1 Plànol de la distribució de la planta

En darrer lloc, els serveis disponibles per a l'operació de la planta es recullen en la següent taula:

Taula 1.1.2 Serveis disponibles

Energia elèctrica	Connexió des de la línia de 20 kV a peu de parcel·la, cal preveure una estació transformadora
Gas natural	Connexió a peu de parcel·la a mitja pressió
Clavegueram	Xarxa unitaria al centre del carrer a una profunditat de 3,5 m (diàmetre del col·lector de 800 mm)
Aigua d'incendis	La màxima pressió es de 4 kg/cm ² , cal dissenyar una estació de bombament i reserva d'aigua
Aigua de xarxa	Escomesa a peu de parcel·la a 4 kg/cm ² amb un diàmetre de 200 mm
Terreny	Resistència del terreny de 2 kg/cm ² a 1,5 m de profunditat sobre graves

1.2 Característiques dels reactius i productes

1.2.1 Metanol

El metanol, també conegut com a alcohol metílic, amb la fórmula química de CH_3OH és l'alcohol més simple però un dels més emprats en el món de la indústria química orgànica. En condicions normals és un líquid incolor amb una olor similar al de l'etanol. És altament volàtil, inflamable i molt tòxic si s'ingereix.

A la planta Formachem és la matèria primera essencial, ja que és un dels reactius per a la formació de formaldehid. A més a més, juga un altre paper important en l'estabilització d'aquest producte, ja que evita la seva polimerització.

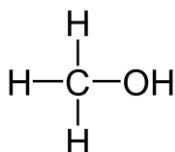


Figura 1.2.1 Estructura molecular del metanol

A causa de la seva baixa temperatura d'inflamabilitat i la seva toxicitat, el disseny de la planta es veu afectat, ja que les mesures preventives de seguretat són elevades, incloent-hi controls rigorosos d'atmosfera explosives. A continuació hi ha un recull d'algunes de les propietats físiques del metanol.

Taula 1.2.1 Propietats del metanol [1]

Número CAS	67-56-1
Fórmula	CH ₃ OH
Pes molecular (g/mol)	32,04
Densitat a 20°C (g/cm³)	0,79
Pressió de vapor a 20°C (bar)	0,128
Punt d'ebullició (°C)	65
Punt d'inflamació (°C)	9,7

1.2.2 Oxigen

L'oxigen és el segon reactiu i és l'oxidant essencial per dur a terme la reacció de formació del formaldehid. És una substància química que es troba de forma natural a l'atmosfera, consta d'un 21% de la composició de l'aire i és un gas incolor, inodor i insípid en condicions ambientals de pressió i temperatura. És una de les substàncies amb més poder comburent i, és per això que és un agent indispensable per a la combustió de gairebé tot el material orgànic. No és inflamable en si mateix, és a dir, no es crema, però sí que té molt poder per alimentar i oxidar les reaccions de combustió. En ser un element que es troba present a l'aire, el seu ús als processos industrials és molt elevat. En el cas de la planta Formachem es treballa amb un excés d'aire, ja que es necessita la presència de l'oxigen, que és l'espècie reactiva des del punt de vista estequiomètric.

Des del punt de vista del disseny i la seguretat de la planta, la gestió d'aquest gas és un dels punts més crítics. El motiu és la perillositat de tenir substàncies inflamables com el metanol i el formaldehid, les quals poden reaccionar amb l'oxigen i produir una barreja explosiva si les condicions es troben dins dels límits d'inflamabilitat. És per això que tot i ser un reactiu important i que ha d'estar en excés, la seva presència a la planta es controla de manera rigorosa per garantir que les zones d'operació siguin segures.

A continuació hi ha un recull d'algunes de les propietats més destacables i importants a tenir en compte de l'oxigen.

Taula 1.2.2 Propietats de l'oxigen [2]

Número CAS	7782-44-7
Fórmula	O ₂
Pes molecular (g/mol)	32
Densitat a 20°C (g/cm³)	0,00133
Pressió crítica (bar)	50,43
Punt d'ebullició (°C)	-182,95
Punt de fusió (°C)	-218,35

1.2.3 Aigua

L'aigua és un compost químic inorgànic que en condicions ambientals es troba en forma líquida, és un fluid transparent, inodor i insípid. És una de les substàncies més utilitzades en els processos químics i en les instal·lacions, ja que en molts casos és un subproducte de reacció o bé es fa servir com a fluid de servei, sigui per circuits refrigerants o altres funcions com per exemple d'agent absorbidor.

En el cas del procés de la planta a dissenyar l'aigua és molt important, pel fet que juga tres papers essencials en aquest: com a producte que es genera en la reacció de síntesi, com a dissolvent (el formaldehid es comercialitza habitualment com a solució aquosa) i com a fluid

d'utilitat. Aquesta aigua de servei s'utilitza a la zona d'absorció per regular la concentració final del formaldehid obtingut i controlar les emissions de gasos, a més de com a fluid refrigerant en alguns bescanviadors de calor. En el procés Formox, la concentració del producte es controla mitjançant la quantitat d'aigua afegida a la part superior de la columna d'absorció.

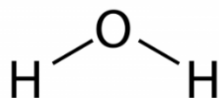


Figura 1.2.2 Estructura molecular de l'aigua

En el procés Formox, la concentració del producte es controla mitjançant la quantitat d'aigua afegida a la part superior de la columna d'absorció.

A la Taula 1.2.3 es mostren algunes de les propietats que s'ha de tenir en compte de l'aigua.

Taula 1.2.3 Propietats de l'aigua [3]

Número CAS	7732-18-5
Fórmula	H ₂ O
Pes molecular (g/mol)	18,02
Densitat a 20°C (g/cm³)	0,998
Pressió de vapor a 20°C (bar)	0,023
Punt d'ebullició a 1 atm (°C)	100
Punt de fusió (°C)	0
Capacitat calorífica (kJ)	4,18

1.2.4 Formaldehid

El formaldehid, amb fórmula química de CH₂O és el producte principal del procés productiu. És l'aldehid més i a temperatura ambient és un gas incolor però una olor forta, picant i irritant. Es tracta d'un compost molt reactiu, fet que explica la gran quantitat d'aplicacions industrials que té, especialment en la fabricació de resines, adhesius i altres productes químics intermedis. La bibliografia també indica que és un compost irritant per als ulls, el nas i la gola.

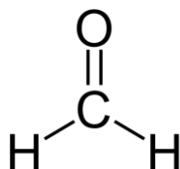


Figura 1.2.3 Estructura molecular del formaldehid

Una de les característiques més importants del formaldehid és la seva tendència a polimeritzar, tant en fase gasosa com en fase líquida. Aquesta polimerització es veu desfavorida per la presència d'aigua i d'altres impureses polars, i és la principal raó per la qual industrialment no se sol manipular el formaldehid pur, sinó en forma de dissolució aquosa estabilitzada. A més a més, a temperatures elevades pot donar lloc a reaccions de descomposició i oxidació no desitjades. [5]

En el context del projecte, el formaldehid és el producte final de la planta, però la solució que es produeix en aquesta s'anomena formalina, la qual acostuma a tenir entre un 37% i un 40% de formaldehid. Aquesta substància s'explica en el següent punt (1.2.5).

Taula 1.2.4 Propietats del formaldehid pur

Número CAS	50-00-0
Fórmula	CH ₂ O
Pes molecular (g/mol)	30,03
Densitat a -20°C (g/cm³)	0,815
Punt de fusió (°C)	-92,15
Punt d'ebullició (°C)	-19,33
Temperatura d'auto ignició (°C)	430

1.2.5 Formalina

El producte final del projecte, el qual és una solució aquosa de formaldehid al 37% estabilitzada amb metanol. Aquest és el format comercial habitual del formaldehid, ja que la substància pura és massa inestable per ser manipulada i emmagatzemada amb facilitat. La presència de metanol en aquest tipus de dissolucions és molt important, perquè ajuda a estabilitzar el producte i redueix la tendència a formar polímers insolubles.

En aquest projecte, el producte final es fixa en una concentració del 37% en pes i, la seva expedició es farà en bulk en cisternes de 33 Tm.

A continuació es mostra una taula amb les propietats destacables de la solució que es produeix.

Taula 1.2.5 Propietats de la solució de formaldehid al 37%

Fórmula	CH ₂ O (37%)
Pes molecular (g/mol)	30,03
Densitat a 20°C (g/cm³)	1,08 - 1,10
Punt d'ebullició (°C)	93 - 96
Punt d'inflamació (°C)	50 - 65 °C
Punt de fusió (°C)	-15

1.3 Descripció del procés de producció

El procés de producció de la planta es basa en l'oxidació catalítica en fase gas i depenent del catalitzador que s'escull es diferencien diversos tipus de procés. L'escollit en aquest cas és el procés Formox, el qual utilitza un catalitzador d'òxid metàl·lic de ferro i molibdè.

Per fer un seguiment fàcil de la seqüència del procés, a continuació hi ha un diagrama de blocs representatiu, incloent-hi les principals operacions que tenen lloc.

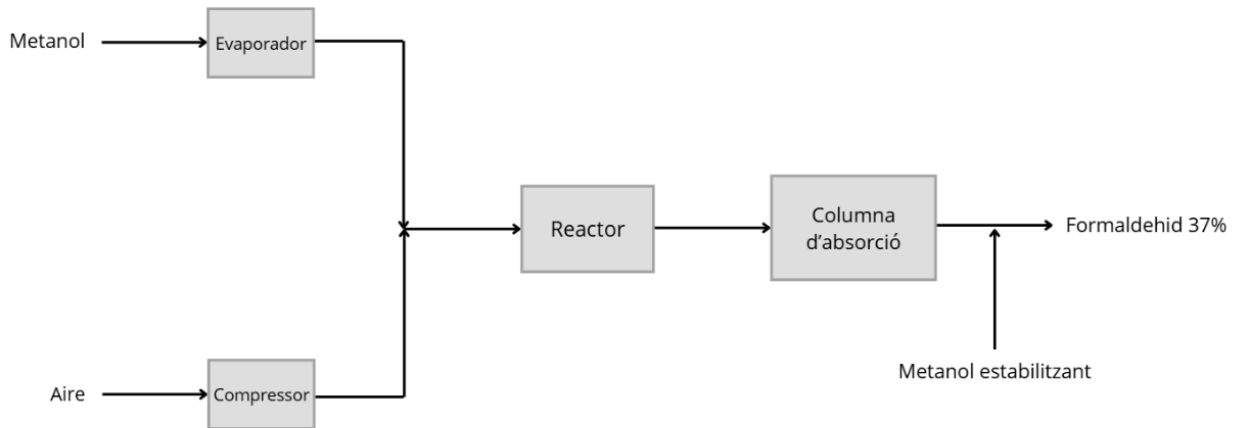


Figura 1. 3.1 Diagrama de blocs del procés

1. Emmagatzematge de les matèries primeres

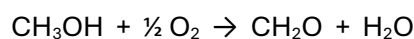
El procés s'inicia amb la recepció i l'emmagatzematge de les matèries primeres. El metanol es guarda en tancs especials per a líquids inflamables, amb els sistemes de seguretat necessaris. Per altra banda, l'aire es recull de l'atmosfera fent-lo passar per un sistema de filtres per tal d'eliminar partícules sòlides que poden afectar el procés.

2. Mescla i preparació dels reactius

En la següent fase es fa la mescla i el condicionament de l'alimentació del reactiu. Per una banda, el metanol es vaporitza perquè es trobi en fase gas abans d'entrar al reactor. Per altra banda, l'aire es pressuritza i es barreja seguidament amb el corrent gasós de metanol en les proporcions adequades. Aquesta etapa és molt important perquè condiciona la conversió i selectivitat del reactor, així com el règim tèrmic de l'operació. En el cas del procés d'aquesta planta, l'alimentació gasosa es dirigeix a bescanviador de calor per elevar la temperatura de la barreja de gasos.

3. Reacció química

La reacció catalítica es desenvolupa en un reactor multitubular amb el catalitzador immobilitzat a l'interior dels tubs. La reacció principal és l'oxidació parcial del metanol a formaldehid i aigua, la qual és molt exotèrmica. És per això que el control de la temperatura és molt important, ja que amb una bona regulació d'aquesta es permet limitar reaccions secundàries no desitjades. La reacció principal del procés és la següent:



El fluid refrigerant que es fa servir és el Therminol 66, el qual es fa passar per la carcassa del reactor, controlant així l'augment de temperatura al reactor.

4. Refredament, absorció i condicionament del producte

Els gasos procedents del reactor passen seguidament per una etapa de refredament i absorció per tal de recuperar tot el formaldehid que s'ha produït a la reacció. El corrent calent es refreda en un bescanviador de calor i després entra en una columna d'absorció. En aquesta, gràcies al corrent d'aigua que circula a contracorrent, el formaldehid és transferit a una fase líquida aquosa, on s'aconsegueix recuperar-lo. La concentració del producte s'ajusta controlant el cabal d'aigua que s'afegeix i, els gasos inerts que no s'absorbeixen, com el nitrogen de l'aire, surten per la part superior de la torre i s'envien a la zona de la planta on es fa el tractament de gasos. Una vegada s'ha finalitzat el procés d'absorció, s'efectua l'ajust de concentració del producte final, el qual ha de contenir un 37% de formaldehid. Per obtenir-lo es barreja el corrent de sortida de la columna amb un corrent fresc de metanol, amb el qual s'assegura que la solució, producte contingui la quantitat necessària de metanol per ser estable i complir amb el % de concentració de formaldehid desitjat.

Finalment, el producte s'escalfa fins a 35 °C per evitar la polimerització del formaldehid i es dirigeix a la zona d'emmagatzematge i expedició. Aquest líquid prèviament s'analitza i es verifica la seva qualitat al laboratori, per tal d'assegurar que el producte és correcte per distribuir-lo i comercialitzar-lo.

El disseny de la planta incorpora una àrea específica per al tractament d'emissions, coherent amb l'enfocament general de seguretat i control ambiental definit per al conjunt de la instal·lació.

Per entendre bé el procés i poder fer un seguiment de tots els corrents i equips que hi ha es mostrarà el diagrama de procés de la planta, juntament amb les taules que contenen la informació de cada corrent i la seva composició.

Cada corrent té un número per identificar-lo i classificar-lo en les taules de caracterització. Pel que fa a les taules, es dona informació sobre la temperatura, la pressió, el cabal (màssic i volumètric) i la pressió de vapor. A més a més, també s'indica la fracció màssica dels components que hi ha en aquests.

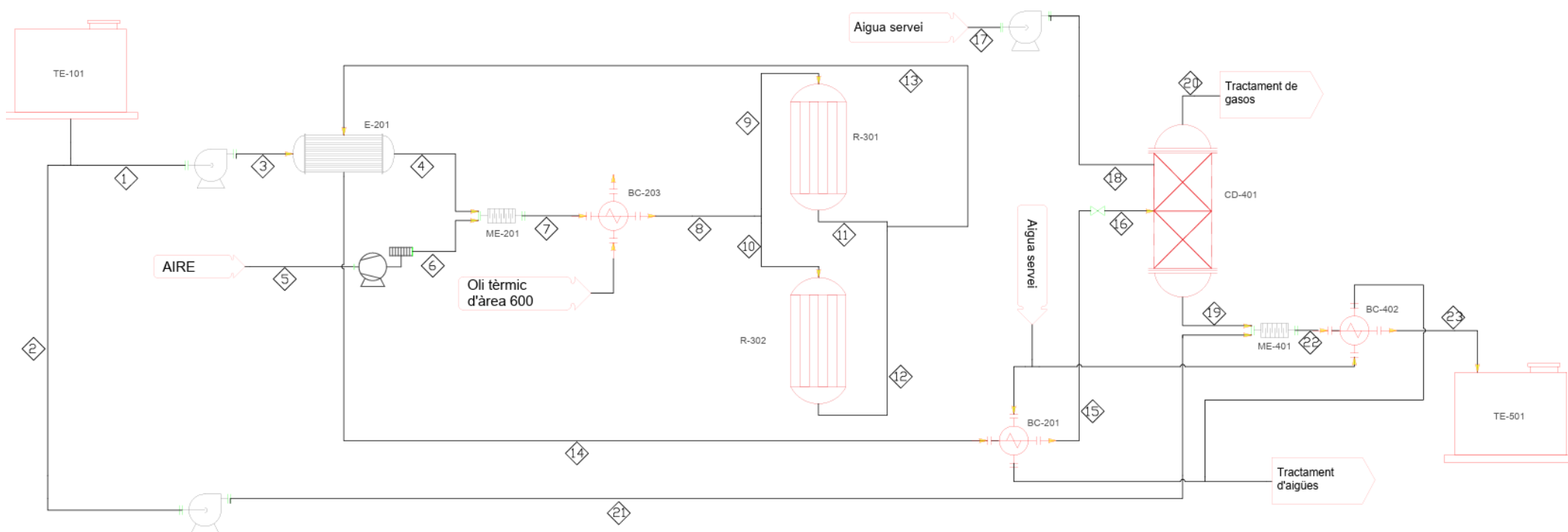


Figura 1.4.1 Diagrama de procés de la planta

Taula 1.4.1. Especificacions dels corrents de procés

Corrent	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Temperatura (°C)	25	25	25,06	212,6	25	122,4	134,7	250	250	250	250,2
Pressió (bar)	1,013	1,013	2,2	2,173	1,013	2,2	2,173	2,046	2,046	2,046	1,83
Cabal màssic (kg/h)	5086,43	880	5086,43	5086,43	53430,82	53430,82	58517,17	58517,17	29258,58	29258,58	29258,51
Cabal molar (kmol/h)	158,7	27,46	158,7	158,7	1852	1852	2011	2011	1005,37	1005,37	1044,3
Fracció de vapor	0	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1
Fracció màssica											
Metanol	1	1	1	1	0	0	0,0869	0,0869	0,0869	0,0869	0,0017
O ₂	0	0	0	0	0,21	0,21	0,2127	0,2127	0,2127	0,2127	0,1701
N ₂	0	0	0	0	0,79	0,79	0,7004	0,7004	0,7004	0,7004	0,7004
Formaldehid	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0799
H ₂ O	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0479

Taula 1.4.2 Especificacions dels corrents de procés

Corrent	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Temperatura (°C)	250,2	250,2	134,8	78,37	78,35	25	25	55,73	45,39	25	53,65	38,25
Pressió (bar)	1,83	1,83	1,697	1,671	1,17	1,013	1,2	1,17	0,8	2,2	1,013	0,9406
Cabal màssic (kg/h)	29258,51	58517,02	58517,02	58517,02	58517,02	8700	8700	11723,9	55493,13	880	12603,9	12603,9
Cabal molar (kmol/h)	1044,3	2088,6	2088,6	2088,6	2088,6	482,93	482,93	546,98	2024,54	27,46	574,45	574,45
Fracció de vapor	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0
Fracció màssica												
Metanol	0,0017	0,0017	0,0017	0,0017	0,0017	0	0	0,0001	0,0017	1	0,0699	0,0699
O2	0,1701	0,1701	0,1701	0,1701	0,1701	0	0	0	0,1794	0	0	0
N2	0,7004	0,7004	0,7004	0,7004	0,7004	0	0	0	0,7386	0	0	0
Formaldehid	0,0799	0,0799	0,0799	0,0799	0,0799	0	0	0,399	0	0	0,3708	0,3708
H2O	0,0479	0,0479	0,0479	0,0479	0,0479	1	1	0,6013	0,0803	0	0,5593	0,5593

1.5 Balanç de matèria i d'energia

En les plantes de producció, els balanços de matèria i energia són una eina essencial per l'anàlisi d'aquestes i, per tant, un punt important a explicar.

1.5.1 Balanç de matèria

El balanç de matèria consisteix a quantificar la matèria que entra, surt, es genera o es transforma en un procés productiu. La clau d'aquest és tenir en compte els 4 termes principals d'entrada, sortida, generació o acumulació i, a partir d'aquests comprovar que tota la massa que entra al sistema correspon a la que hi ha a la sortida, ja que la matèria no es destrueix, sinó que es transforma. En el cas del balanç de matèria general de tot el procés el que es té en compte només són els corrents d'entrada (com el del metanol per exemple) i els de sortida, per tal de comprovar que aquest es compleix.

En el punt anterior s'han presentat les taules amb els cabals i les seves composicions corresponents. Per poder fer el tancament del balanç de matèria, s'ha de comprovar que la suma dels cabals màssics d'entrada és igual a la suma dels cabals màssics de sortida. Els cabals d'entrada són el número 1, 2, 5 i 17, que corresponen als dos d'alimentació de metanol, d'aire i d'aigua per la columna, respectivament. Per altra banda, els cabals de sortida són el 20 i 22, que corresponen a la sortida de caps de la columna i al corrent de producte final. Per recollir tota aquesta informació i mostrar el valor de la suma d'aquests s'ha fet la taula següent:

Taula 1.5.1 Cabals pel balanç de matèria

ENTRADA		SORTIDA	
Corrent	Cabal màssic (kg/h)	Corrent	Cabal màssic (kg/h)
1	5086,43	20	55493,13
2	880	22	12603,9
5	53430,82		
17	8700		
Suma	68097,25	Suma	68097,03

Observant el resultat de les dues sumes, els valors són pràcticament idèntics i, per tant, es demostra que el balanç de matèria es compleix. La petita diferència entre aquests pot ser deguda a arrodoniments de decimals o valors de propietats dels compostos que afecten el càlcul dels cabals. Com que la producció és tan elevada i els cabals són de gran magnitud, aquesta diferència és insignificant.

1.5.2 Balanç d'energia

Pel que fa al balanç d'energia, aquest esdevé un dels requisits indispensables en el disseny d'una planta de producció. L'objectiu fonamental d'aquest punt és avaluar el consum energètic l'eficiència global del sistema, especialment quan es disposa d'equips que dissipen energia i aquesta es pot recuperar. Observant els resultats que s'obtenen es poden plantejar millores de sostenibilitat i reaprofitaments energètics que també tindran un efecte positiu en l'avaluació econòmica posterior.

En la *Taula 1.5.2* es presenten els valors de potència consumida o generada de tots els equips que participen en el procés i intervenen en el balanç energètic de la planta.

Taula 1.5.2 Càlcul balanç d'energia

Nom	Equip	Potència (kW)
CL-601	Caldera	2080
TR-601	Torre de refrigeració	-7746,7
Balanç energia total		-5666,7

La resta d'equips són circuits tancats de reaprofitament d'energia calorífica, per tant, no es tenen en compte en el balanç final d'energia. Com s'observa a la *Taula 1.5.2* el balanç d'energia de la planta és negatiu i això que es consumeix més energia que la que es genera. Això comporta que s'haurà de fer una aportació energètica considerable, ja que evidentment no es pot aprofitar energia calorífica residual.

1.6 Definició de les àrees de la planta

Per ordenar el disseny i facilitar tant la implantació com la futura explotació de la instal·lació, la planta es divideix en àrees funcionals diferenciades. Aquesta sectorització respon a criteris de procés, seguretat, operació, manteniment i compatibilitat urbanística, i permet distribuir racionalment els equips principals i auxiliars dins de la parcel·la disponible. A continuació es farà una breu descripció de cada àrea:

- **A-100: Emmagatzematge de matèries primeres**

Aquesta zona comprèn els tancs d'emmagatzematge de metanol, així com els sistemes associats de càrrega, descàrrega, bombeig i seguretat. Així mateix, preveu l'espai necessari per a la recepció d'aigua o d'altres substàncies si en algun punt el procés ho requereix. La funció principal d'aquesta àrea és garantir el subministrament continu de matèria primera al reactor. Com ja s'ha definit en punts anteriors, el metanol és una substància molt inflamable i, per aquest motiu el disseny d'aquesta secció prioritza la manipulació segura del fluid i, com a mesura principal de seguretat s'incorporen cubetes de retenció a tots els tancs. Aquestes cubetes el que fan és contenir el fluid en cas de vessaments i, protegeix el voltant de la zona evitant que es pugui escampar. D'altra banda, també hi ha sistemes avançats contra incendis, disponibilitat d'un corrent de nitrogen per poder internitzar els tancs en tot moment i control d'emissions fugitives, entre altres mesures.

- **A-200: Preparació i condicionament de l'alimentació**

En aquesta zona es localitzen els equips encarregats de vaporitzar el metanol líquid, comprimir i preescalfar el corrent d'aire i finalment barrejar i homogeneïtzar adequadament ambdós corrents d'alimentació per tal d'ajustar les condicions necessàries d'entrada al reactor. Es tracta d'una secció especialment crítica pel procés, ja que una preparació inadequada de la mescla podria tenir un efecte important en la conversió, la selectivitat i, fins i tot en la seguretat de l'operació. Per aquest motiu, aquesta àrea concentra gran part dels elements de control automatitzats de la planta, dissenyats per regular rigorosament els cabals i les temperatures de la mescla abans d'introduir-la a la unitat de reacció.

Els equips que es troben en aquesta àrea són un evaporador per la línia del metanol, un compressor per impulsar l'aire, un mesclador per realitzar la barreja de l'aliment del reactor i, en darrer lloc, un bescanviador de calor per elevar la temperatura de l'alimentació a la reacció.

- **A-300: Reacció catalítica**

Aquesta secció constitueix el nucli del procés productiu, ja que és on es troba el reactor multitubular de llit catalític, el circuit de circulació del fluid tèrmic i els sistemes associats al control de la temperatura de la reacció, de la conversió i la recuperació d'energia. Atès el caràcter altament exotèrmic que té la reacció de síntesi de formaldehid i el fet que la selectivitat depèn fortament del perfil tèrmic dins del reactor, aquesta àrea esdevé una de les més crítiques de la planta. El disseny d'aquesta requereix una precisió absoluta, tant des del punt de vista del control del procés com des de la perspectiva de la seguretat industrial, evitant situacions com punts calents o reaccions run-away.

Els equips que intervenen són els dos reactors catalítics idèntics, els quals es definiran en el *Capítol 2. Equips*, així com la resta d'equips mencionats en la descripció de les àrees.

- **A-400: Absorció i purificació del producte**

Aquesta àrea comprèn els elements destinats al refredament dels gasos de sortida del reactor, la columna d'absorció a contracorrent per recuperar el formaldehid i els equips auxiliars per acabar de condicionar la solució de producte. La seva funció principal és dur a terme la transferència de matèria del formaldehid des de la fase gas a la fase líquida amb la màxima eficiència possible. Així mateix, es regula la concentració del producte per assegurar que la composició final sigui compatible amb l'especificació comercial de la formalina (solució aquosa de formaldehid al 37%, estabilitzada amb metanol per actuar contra la polimerització).

Els equips ubicats en aquesta són el bescanviador de calor per refredar la sortida del reactor, la columna d'absorció i els mescladors necessaris tant per la barreja de les dues sortides dels reactors com per barrejar el producte final amb la solució de metanol estabilitzant.

- **A-500: Emmagatzematge i expedició**

En aquesta zona se situen els tancs d'emmagatzematge del producte acabat, les línies d'enviament i les instal·lacions de càrrega de cisternes. Es busca garantir unes condicions adequades de temperatura i pressió per assegurar que el producte a comercialitzar es troba en perfectes condicions i que la seva conservació és segura. El dimensionament d'aquesta àrea permet tenir una logística contínua i segura de les cisternes de 33 Tm.

- **A-600: Serveis auxiliars**

Aquesta àrea agrupa totes les infraestructures indispensables perquè la planta operi de manera contínua i estable. Inclou el centre de transformació elèctrica, les xarxes de distribució d'energia, el subministrament i emmagatzematge de nitrogen, el subministrament de gas natural, els sistemes d'aigua de xarxa (i el seu tractament d'osmosi), aigua de refrigeració, la caldera d'oli tèrmic i la reserva d'aigua contra incendis amb la seva estació de bombament corresponent. Tot i que no intervenen directament en la síntesi química, aquests serveis condicionen l'operabilitat de la planta i s'han d'integrar de manera coordinada des de les fases inicials del disseny.

- **A-700: Sala de control i laboratori**

A l'àrea A-700 s'hi ubica la sala de control centralitzada, des d'on es monitoritzen i supervisen les variables crítiques del procés en temps real, així com el laboratori de planta, destinat als assaigs analítics de les matèries primeres, els corrents intermedis i el producte final. La integració d'aquest espai és imprescindible per garantir l'estabilitat del procés, verificar i certificar el compliment de les especificacions del producte així com poder actuar de manera ràpida davant possibles desviacions de procés o incidències en la producció.

- **A-800: Taller de manteniment**

L'àrea A-800 es destina a les operacions de manteniment preventiu i correctiu dels equips de processos i auxiliars. Pot incloure taller mecànic, magatzem de recanvis, espais per a petites reparacions i suport logístic a les intervencions en camp. La seva existència redueix temps d'aturada i afavoreix la fiabilitat global de la instal·lació, especialment en una planta contínua on la disponibilitat dels equips és un factor determinant.

- **A-900: Tractament d'efluents i emissions**

Aquesta àrea reuneix els sistemes de tractament de les aigües residuals i, especialment, de les emissions gasoses del procés. En una planta de formaldehid basada en tecnologia Formox, el tractament del gas de cua és un element essencial del disseny, ja que aquest corrent conté espècies residuals i no presenta normalment autoinflamabilitat suficient per a una combustió

directa sense combustible auxiliar. Per aquest motiu, la zona A-1000 té un paper clau en el compliment dels objectius ambientals del projecte i en la integració segura de la planta dins del seu entorn industrial. El detall del tractament realitzat a la planta es troba al *Capítol 6. Medi Ambient*.

- **A-1000 Oficines**

Aquesta àrea inclou les oficines tècniques i administratives, sales de reunió i espais de treball comunitari. Tot i no formar part directa del procés productiu, és necessària per al desenvolupament de les funcions de gestió, coordinació, documentació, seguretat laboral i organització del treball dins de la planta.

- **A-1100 Vestuaris**

Tot l'equip que forma part de Formachem disposa d'un espai on poder canviar-se, guardar les seves pertinences i dutxar-se. L'espai està habilitat amb tots aquests serveis i, a més a més hi ha prou espai per a quan hi ha canvi de torn que tothom pugui tenir aquest espai personal.

- **A-1200**

En darrer lloc, l'àrea 1200 correspon al menjador i els espais de descans del personal. Aquesta part de la planta compta amb una zona amb microones i neveres, a més de taules suficients per a les hores de dinar, sopar i altres descansos de refrigeri com l'esmorzar o el berenar.

1.7 Especificacions i necessitats dels serveis de planta

Com s'ha mencionat en el punt anterior, l'àrea 600 recull tots els serveis indispensables pel funcionament de la planta. A continuació es descriuran tots els serveis que hi ha en aquesta i el seu ús.

1.7.1 Aigua

El primer servei a presentar és l'aigua, que és multifuncional en moltes de les plantes químiques. En el cas de la planta del projecte, aquesta es fa servir per a tres funcions: aigua de refrigeració, aigua de procés i de servei.

En primer lloc, l'aigua de xarxa es fa servir per a la refrigeració d'alguns dels bescanviadors de calor. Aquesta aigua, que està escalfada a causa de l'extracció d'energia tèrmica dels equips, es fa passar per una torre de refrigeració per tal de reduir la seva temperatura i poder-la tornar a fer servir en un circuit tancat.

En segon lloc, l'aigua que es fa servir per al procés d'absorció no pot provenir directament d'una xarxa normal d'aigua, ja que aquesta entra en contacte amb els productes químics del procés. S'ha de fer servir aigua altament pura, com per exemple desmineralitzada o desionitzada. Això és degut a que s'ha de prevenir la descomposició i polimerització del producte final, el qual es veuria afectat per un canvi de pH o de concentracions de sals, així com tenir un control de la formació d'àcid fòrmic, que pot estar potenciat si hi ha presència de minerals que acceleren aquest tipus de reaccions. Per aquest motiu, l'aigua que es fa servir en la columna és desionitzada, la qual es fa passar per un equip d'osmosi inversa present a la planta abans d'entrar a la columna.

En darrer lloc, l'aigua de xarxa es fa servir per a dues aplicacions més. La primera d'aquestes és pels sistemes de seguretat i contra incendis, els quals poden fer servir aigua directament provinent de la xarxa. Un exemple del seu ús pot ser per les dutxes o rentaülles d'emergències o bé les xarxes ruixadors en cas d'incendi. La segona aplicació és per la neteja i els serveis auxiliars sanitaris, els quals fan servir directament l'aigua de xarxa.

1.7.2 Nitrogen

L'ús del nitrogen és completament imprescindible en la planta de producció, ja que és un dels serveis més crítics i importants pel bon funcionament i la seguretat d'aquesta. Com ja s'ha mencionat prèviament, el metanol i el formaldehid són compostos volàtils i, en especial el metanol, altament inflamables. Com que el nitrogen és un gas inert, es fa servir com a barrera per evitar el contacte de l'oxigen amb aquests components inflamables.

L'ús principal d'aquest servei és per inertitzar els tancs d'emmagatzematge, el que també es coneix com a "blanketing". El que es fa és injectar nitrogen en aquests per desplaçar l'oxigen i evitar que aquest estigui en contacte amb substàncies com el metanol. D'aquesta manera el que s'aconsegueix és que si hi ha vapors de metanol i aquests es troben amb una font d'ignició, el foc no es pot iniciar perquè no hi ha oxigen.

Per altra banda, el nitrogen també es fa servir en les posades en marxa i les aturades, sigui en cas d'emergència o en les parades de manteniment exhaustiu. Abans d'introduir els fluids en l'arrencada, es purga tot el sistema amb nitrogen, eliminant qualsevol traça d'oxigen. Quan es fa l'aturada, se segueix el mateix procediment, però en aquest cas per eliminar els gasos tòxics o inflamables que hi pugui haver abans que s'obrin els equips per realitzar el seu manteniment.

La disposició d'aquest nitrogen es troba en un tanc criogènic, el qual emmagatzema el compost de forma líquida a $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$. Aquest tanc, juntament amb el de compressió de nitrogen, està sempre disponible per fer servir de manera contínua i en gran volum si fes falta en cas d'emergència. L'especificació d'aquests tancs es fa en el *Capítol 2. Equips*.

1.7.3 Oli tèrmic

El servei d'oli tèrmic és un altre dels sistemes d'utilitats més importants en una planta que realitza el procés Formox. A diferència d'altres indústries que fan servir el vapor d'aigua com a fluid tèrmic, la reacció de síntesi de formaldehid requereix un bon control de temperatura i uns valors elevats que l'aigua no sempre pot abastar. A Formachem es fa ús de dos tipus de fluids tèrmics: Therminol 66 i Dowtherm A.

El primer oli, el Therminol 66 es fa servir en el reactor, ja que l'oxidació del metanol és una reacció altament exotèrmica i aquest és l'amortidor per absorbir l'excés d'energia que es genera. La raó per escollir aquest tipus d'oli és perquè té una gran estabilitat tèrmica i una llarga vida útil, garantint així que es pot fer servir de manera contínua sense que la seva capacitat de transferència de calor no disminueixi. Aquest se subministra per mitjà d'un circuit tancat, escalfant-se pel seu pas per la carcassa del reactor i refredant-se en un bescanviador de calor posterior.

En canvi, el Dowtherm té la funció oposada, escalfar l'entrada dels tubs del reactor, és a dir, l'alimentació de la barreja de metanol i aire fins als 250 °C. Aquest tipus d'oli és una barreja de bifenil i òxid de bifenil i, el seu gran avantatge és que es pot utilitzar tant en fase líquida com en fase vapor. A diferència del circuit de Therminol, el que es fa és escalfar l'oli en una caldera i enviar-lo seguidament al bescanviador de calor de l'alimentació al reactor. Allà cedeix la seva calor al corrent de metanol i aire, assegurant que entren a les condicions òptimes de temperatura.

1.7.4 Aire comprimit

L'aire comprimit és un servei comú en totes les plantes industrials, ja que és necessari tant en els sistemes de control, com en les tasques de manteniment i altres auxiliars. Aquest servei és l'encarregat de subministrar l'energia pneumàtica i el gas de control mecànic. Depenent del seu ús es pot considerar aire d'instruments o aire de servei.

El primer tipus és el que s'empra en els elements de control i seguretat automatitzada de la planta, els quals són molt importants. És molt crític, ja que es necessita una alta precisió pel seu ús. És per això que aquest aire no pot contenir humitat o traces d'oli del compressor. Per evitar que això passi, s'integren filtres d'alta eficiència i assecatge per assegurar l'alta qualitat de l'aire.

Per altra banda, l'anomenat aire de servei es fa servir en tasques més generals com el manteniment o les operacions secundàries que no tenen un efecte directe en el control de les vàlvules del procés. Algunes de les seves aplicacions són en les eines pneumàtiques en les parades de manteniment o la neteja de purgues.

1.7.5 Electricitat

El servei d'electricitat a Formachem és l'encarregat de donar l'energia necessària als equips per funcionar i, per tant, la planta requereix una alimentació d'electricitat constant per evitar situacions perilloses com que el tanc es quedi sense refrigeració i la temperatura a l'interior arribi a uns valors realment perillosos.

El subministrament de xarxa és de 20 kV, els quals s'han de convertir en una unitat transformadora. En aquesta hi ha dos transformadors, per assegurar el subministrament continu en cas que un dels dos no funcioni. Aquests es troben a una zona segura i lluny de les zones classificades com a ATEX. Un cop l'electricitat ha passat pels transformadors, un quadre principal la reparteix als diferents punts necessaris, comptant també amb pressa a terra, sistemes de seguretat i detecció d'incendis per evitar possibles riscos.

La planta consumeix al voltant de 53,9 GW d'electricitat a l'any, que equival a una potència mitjana de 6,8 MW. Per garantir aquest servei, la planta compta amb dos transformadors elèctrics per transformar l'energia de 20 kV de xarxa a 400 V. La capacitat d'aquests és de 4,8 MVA, els quals es troben en transformadors estàndards de 5 MVA. Quan l'energia ja està transformada, aquesta es reparteix amb un quadre principal a tots els serveis necessaris. El quadre consta d'una configuració que inclou la seguretat integrada, incloent-hi detector d'incendi, ventilació i contacte a terra.

1.8 Planificació temporal de construcció

Per poder dissenyar i construir una planta, s'ha de desenvolupar una planificació temporal de la seva construcció. El que s'inclou en aquesta és l'ordre de prioritat de realització de totes les tasques i la durada que tenen aquestes, per tal d'assegurar que la construcció es fa en un temps raonable i de la manera òptima possible.

Per tal de saber el temps mínim que es triga a fer la construcció i com queda la planificació final, el que es fa és realitzar una taula recull la durada de les tasques i la precedència que han de seguir, per tal de tenir una bona organització i optimitzar el procés.

A continuació, es mostraran totes les tasques, la seva durada i l'ordre de precedència en la *Taula 1.8.1*.

Taula 1.8.1 Planificació temporal de la construcció

Identificació	Tasca	Duració (dies)	Precedència
1	Enginyeria bàscia	60	0:1
2	Obtenció de permisos i llicència	130	0:2
3	Enginyeria de detall	140	1:3
4	Demanda d'equips	120	3:4
5	Neteja i preparació del terreny	30	2:5
6	Excavacions i cimentació	60	5:6
7	Vials i voreres	30	6:7
8	Aparcaments	10	6:8
9	Instal·lació de subministres	30	6:9
10	Edificació laboratoris, tallers i oficines	80	9:10
11	Construcció vestuaris i zones socials	50	9:11
12	Construcció zona de procés	60	9:12
13	Instal·lació de suports, portes i escales	30	10-12:13
14	Instal·lació dels equips	90	12:14
15	Calibratge dels equips	30	14:15
16	Construcció magatzem	55	9:16
17	Construcció àrea càrrega i descàrrega	40	9:17
18	Instal·lació de canonades de procés	70	14,16,17:18
19	Connexió canonades i equips	25	18:19
20	Instal·lació canonades de servei	60	14,16,17:20
21	Connexió canonades de servei	20	20:21
22	Instal·lació sistemes contra incendis	30	12:22
23	Instal·lació instrumentació	50	14,19,21,22:23
24	Connexió instrumentació	25	23:24
25	Instal·lació xarxa elèctrica	45	14:25
26	Connexió xarxa elèctrica	30	25:26
27	Aïllament d'equips i canonades	50	26:27
28	Prova d'equips	45	27:28
29	Pintura	30	28:29
30	Neteja de la planta	20	29:30

El camí crític de la realització de les tasques per a la construcció és 2, 5, 6, 9, 12, 14, 25, 26, 27, 28, 29 i 30. Els dies que corresponen a aquest camí crític són 620 dies. Per tant, durant el primer any i gran part del segon any la planta està dissenyant-se i construint-se.

1.9 Bibliografia

- [1] National Institute of Standards and Technology. *NIST Chemistry WebBook*, SRD 69: Methanol. National Institute of Standards and Technology. <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?Name=Methanol>
- [2] National Institute of Standards and Technology. *NIST Chemistry WebBook*, SRD 69: Oxygen. National Institute of Standards and Technology. <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C7782447>
- [3] National Institute of Standards and Technology. *NIST Chemistry WebBook*, SRD 69: Water. National Institute of Standards and Technology. <https://webbook.nist.gov/cgi/inchi/InChI%3D1S/H2O/h1H2>
- [4] National Institute of Standards and Technology. *NIST Chemistry WebBook*, SRD 69: Formaldehyde. National Institute of Standards and Technology. <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C50000&Mask=901>
- [5] National Center for Biotechnology Information. *PubChem: Formaldehyde*. PubChem. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/712>
- [6] Merck. *Formaldehyde solution 37%*. Merck Millipore. https://www.merckmillipore.com/INTL/en/product/msds/MDA_CHEM-818708
- [7] Merck. *Formaldehyde solution about 37%*. Merck Millipore. https://www.merckmillipore.com/INTL/en/product/msds/MDA_CHEM-104003
- [8] Franck, H. G., Stadelhofer, J. W. *Industrial Aromatic Chemistry*. Berlin: Springer, 1988.
- [9] Reuss, G., Disteldorf, W., Gamer, A. O., Hilt, A. *Formaldehyde*. In: *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. Weinheim: Wiley-VCH.
- [10] Malik, M. I., Abatzoglou, N., Achouri, I. E. *Methanol to Formaldehyde: An Overview of Surface Studies and Performance of an Iron Molybdate Catalyst*. *Catalysts*, 2021, 11(8), 893. <https://doi.org/10.3390/catal11080893>
- [11] Soares, A. P. V., Portela, M. F., Kiennemann, A. *Methanol Selective Oxidation to Formaldehyde over Iron-Molybdate Catalysts*. *Catalysis Reviews*, 2005, 47(1), 125–174. <https://doi.org/10.1081/CR-200049088>
- [12] Berčič, G., Levec, J. *Kinetics of the partial oxidation of methanol over an iron molybdate catalyst*. *Applied Catalysis A: General*, 2005, 289(2), 240–248. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2005.05.005>
- [13] Patel, H. J. *Handbook for Chemical Process Industries*. Boca Raton: CRC Press, 2023.