



PLANTA DE PRODUCCIÓ D'MDI

PROJECTE DE FI DE GRAU
Enginyeria Química
Juny 2025

Iván Romero Lozano
Hind Douief Merras
Carla Delgado Campaña
David Garcia Jounou
Kilian Correro Luque
Gino Zambrano Cedeño

TUTOR

Rafa Bosch Palacios



PLANTA DE PRODUCCIÓ D'MDI

PROJECTE DE FI DE GRAU
Enginyeria Química

CAPÍTOL 1. ESPECIFICACIONS DEL PROJECTE

Taula de continguts

1.1. Definició del projecte	3
1.1.1. Bases del projecte	3
1.1.2. Abast del projecte	3
1.1.3. Localització de la planta	4
1.2. Característiques dels reactius i productes	6
1.2.1. El fosgen	6
1.2.2. L'MDA	7
1.2.3. L'MDI	8
1.2.4. L'HCl	9
1.2.5. Clorobenzè	10
1.3. Descripció general del procés de producció	11
1.4. Balanç de matèria	16
1.5. Constitució de la planta	22
1.5.1. Emmagatzematge de les matèries primeres (A-100)	24
1.5.2. Mescla i preparació per la reacció (A-200)	25
1.5.3. Reacció (A-300)	25
1.5.4. Separació del producte (A-400)	26
1.5.5. Recuperació dels reactius i de l'HCl (A-500)	26
1.5.6. Emmagatzematge del producte (A-600)	27
1.5.7. Serveis (A-700)	27
1.5.7.1. Serveis de fred	27
1.5.7.2. Serveis de calor	29
1.5.7.3. Servei d'inertització amb nitrogen	30
1.5.7.4. Servei de compressió d'aire	31
1.5.8. Zona de càrrega i descàrrega de camions (A-800)	31
1.5.9. Sala de control i laboratoris (A-900)	32
1.5.10. Oficines (A-1000)	32
1.5.11. Zona de treballadors (A-1100)	32
1.5.12. Taller de manteniment (A-1200)	32
1.5.13. Zona de càrrega de residus (A-1300)	32
1.5.14. Tractament de gasos per part d'una empresa externa (A-1400)	32
1.6. Balanç d'energia	32

1.7. Especificacions i necessitats de serveis	34
1.7.1 Aigua glicolada (30%)	35
1.7.2. Therminol 55.....	35
1.8. Planificació temporal de construcció	36
1.9. Bibliografia	40

1.1. Definició del projecte

Aquest projecte té per objectiu el disseny conceptual i tècnic d'una planta de producció industrial contínua del diisocianat de difenilmetà o MDI, una substància fonamental en la fabricació de poliuretans rígids i escumes. Aquest projecte desenvolupa les bases operatives, tecnològiques, ambientals i econòmiques sobre les quals es defineix el conjunt del procés, detallant les necessitats productives, els requisits de seguretat i els criteris d'eficiència que regiran el funcionament de la instal·lació. En aquest primer apartat es presenten les especificacions fonamentals sobre les quals s'asseu el projecte de MDIchem.

1.1.1. Bases del projecte

La planta objecte d'aquest projecte ha estat concebuda per a la producció contínua de 200.000 tones anuals de MDI a escala industrial a partir de la fosgenació del MDA i la seva comercialització en forma líquida amb una puresa mínima garantida del 97%, tot això amb un enfocament centrat en la seguretat de l'operació, l'eficiència energètica i la sostenibilitat ambiental.

El disseny es basa en l'ús de tecnologies provades en el sector químic, garantint l'estabilitat del procés i la qualitat del producte final. S'han considerat condicions de treball contínues durant 335 dies a l'any, operant en diferents torns que cobreixen les 24 hores del dia; amb 3 períodes d'aturades programades que en conjunt sumen els 30 dies restants d'un any natural.

Els productes implicats, com el fosgen i els isocianats, són d'alta toxicitat, per la qual cosa el projecte parteix de criteris molt estrictes pel que fa a la inertització, confinament de fluids i protecció tant personal com ambiental.

En l'àmbit econòmic, el projecte respon a la necessitat d'incrementar la producció de MDI per a la seva aplicació en la indústria dels polímers, amb un plantejament tècnic que cerca optimitzar el cost per unitat produïda mitjançant la recuperació d'energia i matèries residuals dins del mateix procés. Així mateix, es preveu la integració d'un sistema de cogeneració, així com estratègies de recirculació de solvents i reactius no reaccionats per augmentar l'eficiència global de la planta.

Aquest conjunt de bases defineix els fonaments del projecte, i orienta a totes les decisions de disseny i planificació desenvolupades als pròxims capítols.

1.1.2. Abast del projecte

L'abast d'aquest projecte inclou el disseny conceptual i bàsic d'una planta de producció contínua de MDI, abastant totes les unitats de procés necessàries per garantir una producció estable, segura i eficient. El projecte considera tant aspectes tècnics com els criteris de seguretat, medi ambient, operació i viabilitat econòmica, tot definint els equips principals, els serveis auxiliars i l'organització general de la planta.

Per poder fer un disseny un bon disseny de la planta, el projecte ha de constar dels següents requisits per a poder ser finalitzat:

- El disseny de procés complet des de la recepció i emmagatzematge de matèries primeres fins a l'obtenció i condicionament del producte final.
- La definició de les unitats de mescla, reacció i separació, així com els bescanviadors de calor i tancs d'emmagatzematge així com altres equips necessaris en el procés i dels serveis auxiliars.
- La incorporació de sistemes de control i instrumentació, incloent-hi els llaços de control i la instrumentació corresponent, associats a les variables crítiques del procés.
- Un balanç de tots els paràmetres de seguretat i higiene dels que requereix la planta per tal de garantir una operació segura tant per al mateix procés com per al personal i altres aspectes externs.
- Una anàlisi exhaustiva dels efectes que suposarà la construcció i operació de la planta per al medi ambient, així com explicacions de bones pràctiques de funcionament i operació per a minimitzar les diferents vies de contaminació.
- Una estimació econòmica del projecte, incloent-hi una anàlisi dels costos i dels ingressos, acompanyats de l'estudi de rendibilitat pertinent pel projecte.
- Una guia a seguir en el moment de la posada en marxa i també per a les diferents aturades que poden existir en la planta. A més de l'organització operativa de la planta.

Aquest abast estableix els límits del projecte i garanteix una visió global de tots els aspectes clau per a la implantació futura de la planta de MDIchem.

1.1.3. Localització de la planta

La planta està localitzada al Polígon Industrial 'SATÈL·LITS', al municipi de Tarragona, precisament al Pol Petroquímic.

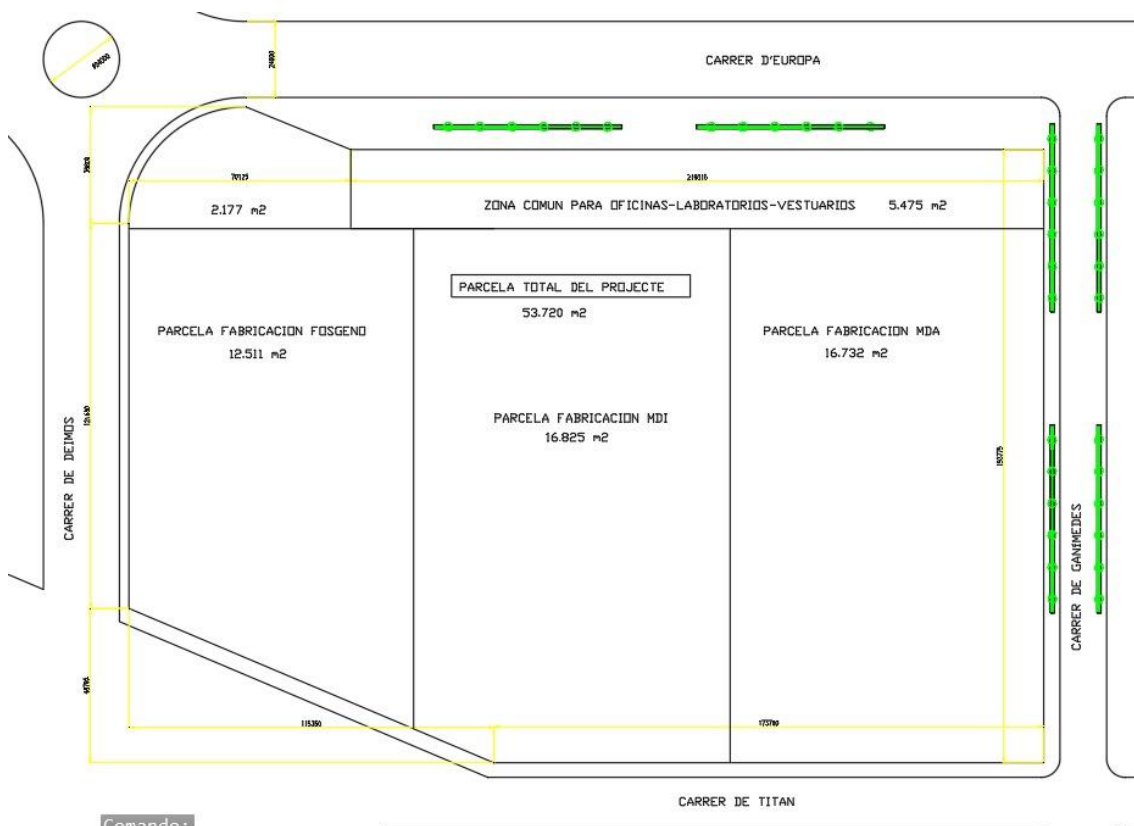
A continuació en la *Taula 1.1.1* es presenten els paràmetres d'edificació que ha de complir la parcel·la segons la normativa urbanística a la qual s'adhereix.

Taula 1.1.1 Paràmetres d'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 la superfície d'ocupació màxima
Reculades	5 m a vials i veïns
Altura màxima	16 m i 3 plantes excepte en producció justificant la necessitat pel procés
Altura mínima	4 m i 1 planta
Aparcaments	1 plaça/150m ² construïts
Distància entre edificis	1/3 de l'edifici més alt amb un mínim de 5 m

Seguidament, a la *Figura 1.1.1* es mostra el plànol del terreny on es construirà la planta. Es pot observar que la planta MDIchem es construirà entremig de les plantes de producció de fosgen i de MDA, la qual facilitarà l'arribada dels reactius del procés, el fosgen i l'MDA, per la producció d'MDI. D'aquesta forma, l'arribada de reactius a la planta serà contínua i ràpida.

Figura 1.1.1 Plànol del terreny on es construirà la planta



La planta té a la seva disposició una sèrie de serveis, que aquest es presenten a la *Taula 1.1.2*.

Taula 1.1.2. Serveis de planta

Energia elèctrica	Connexió des de la línia de 20 kV a peu de parcel·la
Gas natural	Connexió a peu de parcel·la a mitja pressió (1,5 kg/cm ²)
Clavegueram	Xarxa unitària al centre del carrer a una profunditat de 3,5 m (diàmetre del col·lector de 800 mm)
Aigua d'incendis	Màxima pressió de 4 kg/cm ²
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. El fosgen

El fosgen, també anomenat clorur de carbonil, és un gas incolor a temperatura ambient. És molt soluble en dissolvents orgànics com el benzè, el toluè i l'àcid acètic, i reacciona amb l'aigua i la humitat. Tampoc és compatible amb alcalins, l'amoníac, alcohols, agents oxidants (peròxids, permanganats, perclorats), metalls (coure, alumini, liti) ni materials combustibles (paper, fusta, olis). En la *Figura 1.2.1* es pot observar la seva estructura.

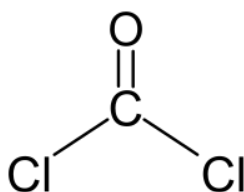


Figura 1.2.1. Estructura molecular del fosgen

El fosgen és un intermedi en la producció de compostos químics industrials, com els isocianats, carbamats, carbonats orgànics, resines plaguicides, herbicides, fàrmacs i tints.

El fosgen és una substància química molt perillosa, corrosiva i tòxica, i forma part de la Llista de Substàncies Perilloses i la Llista de Substàncies Extremadament Perilloses per la Salut. També està reglamentat per l'OSHA. Pot afectar a les persones si és inhalat, i el contacte amb ell pot provocar greus irritacions i cremades en la pell i els ulls. L'exposició continuada a la substància pot provocar problemes respiratoris greus.

És important fer una bona manipulació i emmagatzematge de la substància. Sempre que sigui possible, la substància s'ha de transferir des dels cilindres o els recipients d'emmagatzematge als recipients de processament, per evitar tenir contacte amb ell. Cal emmagatzemar-lo en recipients ben tancats i en àrees ben aïllades, lluny de la llum solar, els conductes de calefacció i l'aire condicionat. És necessari que es facin inspeccions sovint per assegurar que no existeixen fugues en els recipients.

En la *Taula 1.2.1* es consideren algunes de les propietats físiques que presenta el fosgen.

Taula 1.2.1. Algunes propietats físiques del fosgen [1][2]

Fórmula	COCl ₂
Pes molecular (g/mol)	98,82
Densitat (g/cm³) a 20°C	1,38
Pressió de vapor (kPa) a 20°C	157,3
Punt de fusió (°C) a 1 atm	-127,8

Punt d'ebullició (°C) a 1 atm	7,56
Viscositat (cP)	0,124

1.2.2. L'MDA

El 4,4'-Metilendianilina (MDA) és un sòlid cristal·lí de color groguenc a temperatura ambient. Té baixa solubilitat en aigua, però es dissol fàcilment en dissolvents orgànics. És una substància química reactiva i incompatible amb oxidants forts, àcids, anhídrids ni halògens. A la *Figura 1.2.2* es mostra la seva estructura molecular.

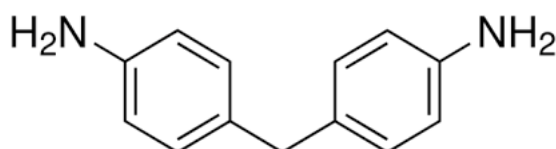


Figura 1.2.2. Estructura molecular de l'MDA

L'MDA és un component clau en la fabricació de diisocianats de difenilmetà (MDI). A més, s'utilitza en la fabricació de certs productes farmacèutics.

L'MDA és un compost químic nociu i figura en la Llista de Substàncies Perilloses i a la Llista de Substàncies Extremadament Perilloses per a la Salut. Es troba regulat per l'OSHA i altres entitats internacionals a causa de la seva toxicitat. L'exposició al MDA mitjançant inhalació, contacte amb la pell o ingesta pot provocar danys hepàtics greus, dificultats respiratòries, irritació de la pell i dels ulls, i en casos prolongats, pot ser cancerígena.

És fonamental respectar protocols rigorosos per la manipulació i l'emmagatzematge del MDA. La substància ha de ser traslladada dels contenidors d'emmagatzematge als equips de processament a través de sistemes tancats per minimitzar l'exposició. Cal emmagatzemar-lo en contenidors hermètics, en llocs frescos i ben ventilats, allunyats de fonts de calor. S'aconsella realitzar verificacions periòdiques per identificar possibles fuites.

En la *Taula 1.2.2* es troben algunes propietats físiques del MDA:

Taula 1.2.2. Algunes propietats físiques de l'MDA [3]

Fórmula	C ₁₃ H ₁₄ N ₂
Pes molecular (g/mol)	198,26
Densitat (g/cm³) a 20°C	1,06
Pressió de vapor (Pa) a 25°C	<0,01
Punt de fusió (°C) a 1 atm	89-91
Punt d'ebullició (°C) a 1 atm	398
Viscositat (cP)	50

1.2.3. L'MDI

L'MDI és sòlid groguenc insoluble en aigua. Sol ser utilitzat, en combinació amb poliols, glicols o diamines, per a la producció d'elastòmers i recobriments de poliuretà (plàstics destinats a estar en contacte amb aliments). També se sol fer servir per a determinar l'anàlit en aigües residuals, aire o mostres humanes, mitjançant diverses tècniques de cromatografia.

Existeixen tres formes isomèriques diferents de l'MDI, 2,2'-MDI, 2,4'-MDI i 4,4'-MDI (essent aquest últim el més emprat). Les seves estructures moleculars es veuen representades en la *Figura 1.2.3*, la *Figura 1.2.4* i la *Figura 1.2.5*, respectivament. [4]

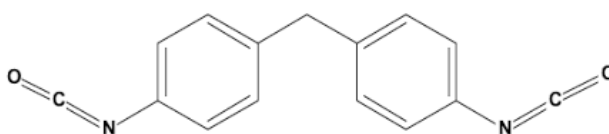


Figura 1.2.3. Estructura molecular del 4,4'-MDI

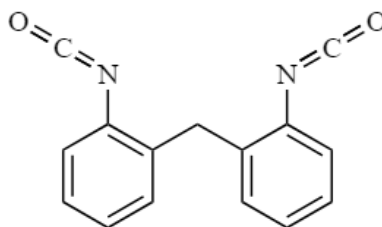


Figura 1.2.4. Estructura molecular del 2,2'-MDI

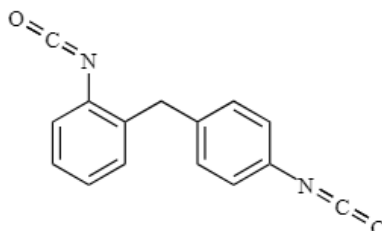


Figura 1.2.5. Estructura molecular del 2,4'-MDI

L'isòmer 4,4'-MDI és altament tòxic, pel qual s'ha d'evitar la seva inhalació, ingesta o el contacte directe d'aquest amb la pell, ja que pot ésser nociu i cancerigen. Per a la manipulació d'aquesta substància cal evitar que aquesta entri en contacte amb la pell, mitjançant equipament de protecció i cal evitar també que els gasos que emet siguin inhalats o entrin en contacte amb els ulls, mitjançant ulleres de protecció i proteccions respiratòries. [5]

En la *Taula 1.2.3* es consideren algunes de les propietats físiques que presenta el 4,4'-MDI.

Taula 1.2.3. Algunes propietats físiques de l'MDI [6]

Fórmula	C ₁₅ H ₁₀ N ₂ O ₂
Pes molecular (g/mol)	250.25
Densitat (g/cm³) a 25°C	1.21 - 1.25
Pressió de vapor (Pa) a 25°C	6.67E-4
Punt de fusió (°C) a 1 atm	37
Punt d'ebullició (°C) a 1 atm	314

1.2.4. L'HCl

L'HCl, es pot presentar en forma de dissolució aquosa (àcid clorhídric) o en forma gas (clorur d'hidrogen). Quan el clorur d'hidrogen entra en contacte amb l'aigua és forma àcid clorhídric. Reacciona violentament amb bases i agents oxidants.

Té moltes aplicacions diferents, en àrees molt diferents de la indústria. Entre les diferents aplicacions, es pot utilitzar per refinar, tractar metalls, netejar, regular l'acidesa.

En la *Figura 1.2.6* es pot veure la seva estructura.

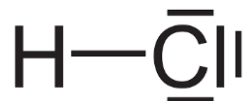


Figura 1.2.6. Estructura molecular de l'HCl

L'HCl és una substància altament tòxica, corrosiva i irritant. Pot provocar cremades en la pell i els ulls, pot irritar les vies respiratòries i pot deteriorar molts metalls. A més, quan s'emmagatzema a pressió presenta risc d'explosió si s'escalfa o es perfora.

En la *Taula 1.2.4* es troben algunes propietats físiques del clorur d'hidrogen i en la *Taula 1.2.5* de l'àcid clorhídric.

Taula 1.2.4. Algunes propietats físiques de l'HCl (clorur d'hidrogen) [7]

Fórmula	HCl
Pes molecular (g/mol)	36,46
Densitat (g/L) a 20°C	1,49
Pressió de vapor (hPa) a 20°C	23
Punt de fusió (°C) a 1 atm	-35
Punt d'ebullició (°C) a 1 atm	57

Taula 1.2.5. Algunes propietats físiques de l'HCl (àcid clorhídric) [8]

Fórmula	HCl
Pes molecular (g/mol)	36,46
Densitat (g/cm³) a 20°C	0,00156
Pressió de vapor (kPa) a 20°C	400
Punt de fusió (°C) a 1 atm	-114,3
Punt d'ebullició (°C) a 1 atm	-84,9

1.2.5. Clorobenzè

El clorobenzè és un compost orgànic aromàtic, amb la fórmula química C₆H₅Cl. És un compost incolor i inflamable, usar principalment com dissolvent, també es pot utilitzar com reactiu, i pot ser un intermedi. En la *Figura 1.2.7* es presenta l'estructura molecular del clorobenzè.

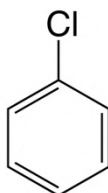


Figura 1.2.7. Estructura molecular del clorobenzè

Una part del clorobenzè es dissol en l'aigua, però és pràcticament insoluble en l'aigua, i s'evapora fàcilment en l'aire. Per això, per sobre dels 27°C es poden formar mescles explosives vapor/aire, i en cas d'incendi es desprenen gasos irritants i tòxics. Per tant, per sobre dels 27°C s'ha d'utilitzar sistemes tancats amb ventilació.

És un component que es desintegra si s'esposa a temperatures elevades, produint gasos corrosius i tòxics. A més reacciona de manera violenta amb oxidants forts, per aquest motiu s'ha d'emmagatzemar separat d'oxidant fort i a prova d'incendis. També ataca a alguns plàstics.

El clorobenzè presenta una toxicitat de baixa a moderada, amb una DL50 de 2,9 g/kg. I la seva exposició crònica, a llarg termini, en les persones, afecta el sistema nerviós central.

Seguidament en la *Taula 1.2.6* es presenten algunes propietats físiques importants del clorobenzè.

Taula 1.2.6. Algunes propietats físiques del clorobenzè [9]

Fórmula	C ₆ H ₅ Cl
Pes molecular (g/mol)	112.6
Densitat (g/cm³) a 20°C	1.11
Pressió de vapor (kPa) a 20°C	1.17
Punt d'inflamació (°C) c.c	27

Punt de fusió (°C) a 1 atm	-45
Punt d'ebullició (°C) a 1 atm	132
Viscositat	0,756

1.3. Descripció general del procés de producció

Abans de començar a descriure el procés de producció de MDI de la planta MDIchem, per a entendre i visualitzar millor tot el procés, es disposa de la *Figura 1.3.1*, en la qual es pot observar el diagrama de blocs del procés.

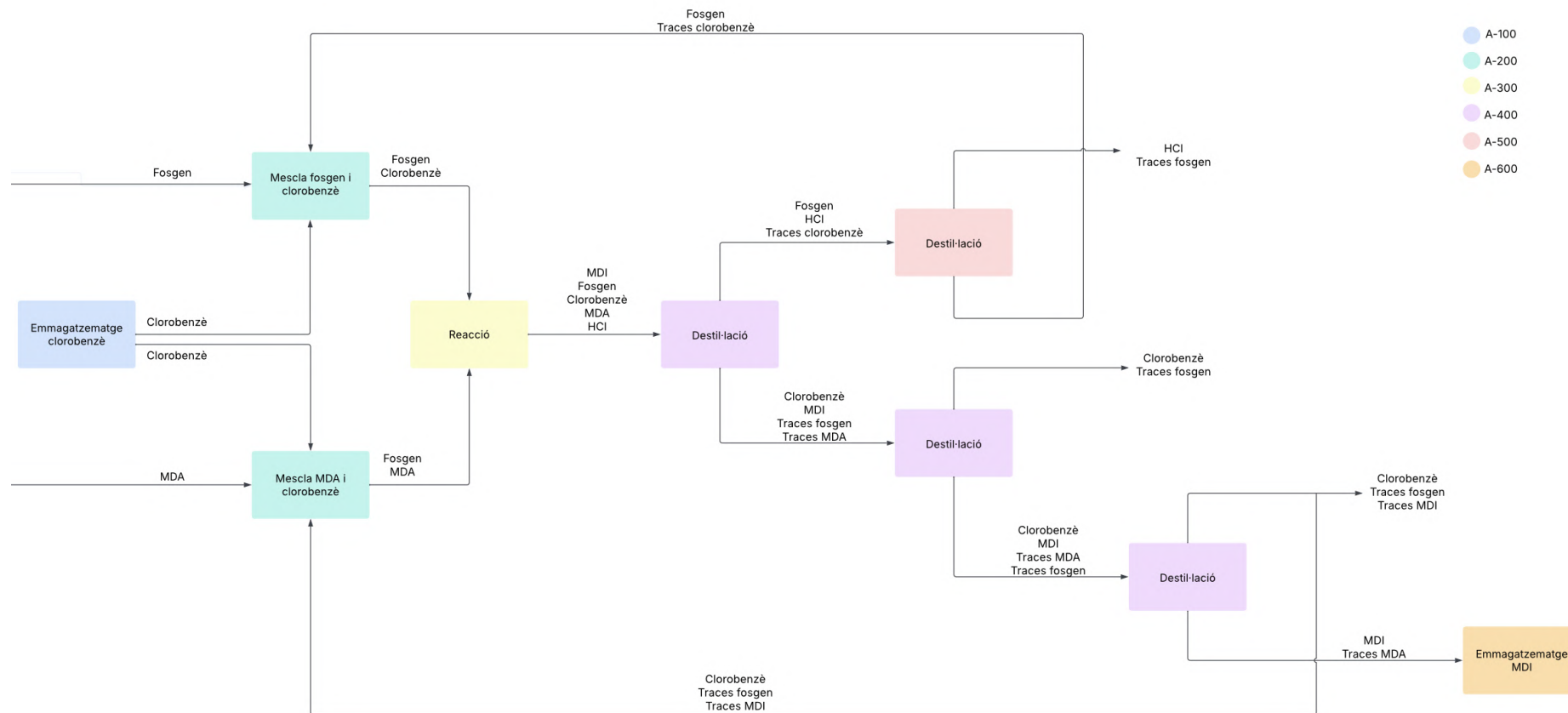


Figura 1.3.1. Diagrama de blocs del procés

Pel que fa als reactius que participen en la reacció, l'MDA i el fosgen arriben contínuament de les plantes de producció veïnes. Ambdós reactius s'acumulen per separat en dos tancs d'emmagatzematge, i en cas que per un problema s'aturi el subministrament continu, s'utilitzarà el contingut dels tancs. Pel que fa al clorobenzè, el dissolvent, s'emmagatzema en sis tancs d'emmagatzematge, els quals es carreguen a partir de camions cisterna. Aquests tancs permeten el subministrament de la planta per a una setmana, per tant, es programa el subministrament del dissolvent perquè arribi un cop per setmana.

El dissolvent utilitzat en el procés no ha de reaccionar amb els reactius ni els productes [10]. Es fa servir el clorobenzè com a dissolvent perquè serà més fàcil de separar en les etapes posteriors a la reacció a partir d'una destil·lació, per la diferència de temperatura d'ebullició amb els altres compostos. No es pot usar l'aigua com a dissolvent a causa de la seva incompatibilitat amb el fosgen, ja que reaccionen violentament si entren en contacte.

Abans de l'entrada al reactor hi ha una zona de mescla, on es permet dissoldre els dos reactius en el clorobenzè. Es disposa de dues tipologies de mesclador: dos d'estàtics i un dinàmic. Els dinàmics disposen d'un agitador, a diferència dels estàtics, que presenten en l'interior un seguit d'elements interns fixos que permeten mesclar i recombinar els corrents sense la necessitat d'haver d'estar agitant mecànicament. D'aquesta forma, es redueixen les necessitats d'energia en l'agitació.

En el mesclador dinàmic es combinen l'MDA i el clorobenzè, i en els mescladors estàtics es combina fosgen amb el dissolvent. En els mescladors també s'inclouen com a entrades les recirculacions respectives dins del procés. En el cas dels mescladors estàtics, en què primer es combinen fosgen i clorobenzè frescos, i en el segon es combina el corrent de sortida acabat d'explicar amb el recirculat. El clorobenzè, com bé s'ha explicat, actua com a dissolvent, i és, per tant, un inert de la reacció. Al final del procés productiu es torna a recuperar una part d'aquest dissolvent el qual és recirculat. MDIchem vetlla per la qualitat del producte final i per tal d'assegurar que sempre entra una fracció de clorobenzè pura, existeix un corrent de purga del dissolvent el qual és tractat per serveis externs, i contínuament s'introdueix una part de clorobenzè fresc al procés. És per això que és necessari disposar d'una gran quantitat de tancs d'emmagatzematge per al dissolvent.

Un cop els reactius es mesclen i s'habituen a les necessitats del reactor, ja poden entrar al reactor per dur a terme la reacció del procés.

La reacció de síntesi de l'MDI a partir de MDA i fosgen (o fosgenació del MDA) és una reacció en continu i en dues etapes. El fosgen permet transformar les amines que presenta l'MDA en isocianats en les condicions apropiades de temperatura en presència d'un dissolvent orgànic inert, el ja presentat clorobenzè.

En la primera etapa, es dona reacció exotèrmica entre el fosgen i el grup d'amina per tal de donar clorur de carbamil, un intermedi de reacció. Es poden formar altres compostos, però el disseny del mateix reactor, així com la relació de MDA amb el fosgen i el clorobenzè garanteixen que aquests no es formin. En la *Figura 1.3.1* es pot veure la reacció química que es dona en la primera etapa de la reacció.

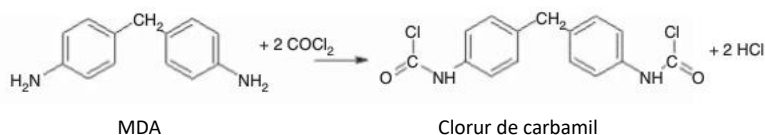


Figura 1.3.1. Primera etapa de la reacció entre el fosgen i l'MDA, per obtenir clorur de carbamil i HCl

Posteriorment, en la segona etapa, es dona una reacció en equilibri, on el producte intermedi reacciona amb el fosgen, també en excés, a una temperatura més elevada per desplaçar l'equilibri cap a la formació d'MDI. S'aconsegueix obtenir isocianat a partir del clorur de carbamil. En la *Figura 1.3.2* es pot veure la reacció química que es dona en la segona etapa de la reacció.

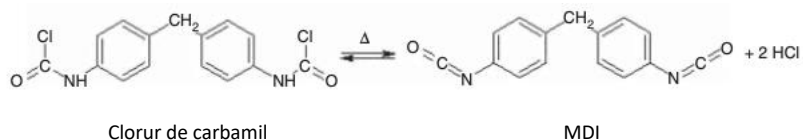


Figura 1.3.2. Segona etapa de la reacció entre el fosgen i l'MDA, per obtenir MDI i HCl

Tot i que la reacció està formada per dues etapes, la primera fase reactiva es dona de forma gairebé immediata a l'entrada del reactor, mentre que les condicions amb les quals opera aquest equip permetran que la segona reacció es desplaci completament cap a la formació del producte desitjat.

El clorur de carbamil, l'intermedi inestable format en la reacció, pot reaccionar amb l'amina per generar urea substituïda i poliurea, les quals disminueixen el rendiment de la reacció perquè no s'obté tant producte desitjat, l'isocianat. És per això, que per tal de disminuir la formació d'aquests subproductes s'han pres les decisions d'introduir el fosgen en un elevat excés respecte a l'MDA, a més de configurar el reactor amb dues entrades situades amb un angle determinat respecte a l'eix longitudinal del reactor. Concretament, s'han afegit 5 mols de fosgen per cada mol de MDA que entra al reactor. Aquestes dues mesures preses després d'una anàlisi de recerca en estudis i patents afavoreixen que la qualitat del producte final sigui la més alta possible. [11]

Pel que fa a les patents, moltes parlen d'un sistema combinat de dos reactors connectats en sèrie, essent un primer un reactor tubular del tipus RCFP, seguit d'un segon reactor anomenat columna de reacció, pel fet que la seva configuració es pot assimilar a una

columna de destil·lació. Pel cas particular de la planta de MDIchem, s'ha optat per l'elecció d'un únic reactor seguit per una columna de destil·lació. Per simplificar els càlculs s'ha considerat que el grau de conversió de la reacció és determinat pel que es transforma en l'RCFP, i que la columna de destil·lació només permet fer la separació dels compostos més volàtils dels que menys ho són. El grau de conversió a la sortida del reactor vindrà marcada per la petita part d'MDA que no haurà reaccionat. En un hipotètic cas en què la reacció no es donés completament al RCFP, acabaria de donar-se en aquesta columna de destil·lació, gràcies a les condicions de la mescla, entre elles la temperatura elevada. Les consideracions ja esmentades per a afavorir la conversió de MDA a MDI, permeten arribar a la conclusió que la reacció global es duu a terme en un període de temps força reduït, aproximat a pocs minuts. [9]

Pel que fa a aquest únic reactor, s'ha decidit construir un equip de carcassa i tubs per a aportar fred a aquest. A més a més, es podran rebaixar els efectes d'augment de la temperatura a causa del caràcter exotèrmic de la reacció. El fluid de procés que reacciona en aquest equip circula pels tubs aconseguint la formació de MDI desitjada. D'altra banda, per la carcassa circula aigua refrigerada de torre per tal d'aconseguir que la temperatura no pugui tenir efectes negatius sobre la seguretat del procés. La conversió que s'espera d'aquest reactor és del 97% en la primera etapa i del 100% en la segona etapa. Aquest segon percentatge de conversió, el qual és força inusual en un procés productiu en continu, s'ha determinat a raó que el clorur de carbamil és un compost força inestable i que es considera que no es podrà mantenir a la mescla i reaccionarà per donar el MDI, el qual és molt més estable per pròpia configuració dels àtoms. La combinació d'aquestes dues etapes permeten obtenir una conversió global de la reacció del 97% respecte a tot el MDA que entra al reactor.

A més, com que l'intermedi de reacció és un compost molt inestable i no es disposa de dades sobre ell, no apareixeran traces d'aquest a la sortida de la columna de destil·lació ni de l'RCFP.

Prèviament a la construcció de la planta s'hauria de fer una prova a escala pilot, per tal d'acabar de veure com funciona el procés de reacció i posterior separació, per acabar d'afinar els paràmetres de cadascun dels equips (el reactor i la posterior columna de destil·lació) i comprovar que s'aconsegueixi el resultat esperat.

Una vegada s'obté un corrent vapor i un altre líquid de la primera columna de destil·lació (la que substitueix la columna de reacció), es requereix un seguit d'operacions de separació, amb més columnes de destil·lació per tal de separar els diferents components del producte el qual es vol comercialitzar. Per tal d'obtenir el producte d'interès, es disposa de dues columnes de destil·lació més. Després del procés de separació del producte, s'arribarà a aconseguir un MDI amb una puresa del 97%, on el 3% restant és MDA no reaccionat i altres petites impureses.

L'MDI, amb un 97% de puresa, que és el que es comercialitzarà, s'emmagatzema en un tanc en estat líquid, que donarà subministrament als camions cisterna que arribin a la planta per recollir el producte diàriament, així com el mateix tanc permetrà omplir sistemes d'emmagatzematge i distribució del producte com són els IBC.

També es vol recuperar l'HCl que s'ha produït en la reacció per tal de subministrar-ho a la planta veïna de producció d'MDA, i es vol recircular el fosgen als mescladors, a l'inici del procés, per tal d'aprofitar-lo. Cal recordar que a la sortida del reactor i la primera columna de destil·lació encara resta fosgen perquè aquest s'ha introduït en excés en la reacció. Per aconseguir separar el corrent de fosgen i el corrent d'HCl, els compostos que surten mesclats per caps en la primera columna de destil·lació, es requereix una altra columna de destil·lació i un condensador.

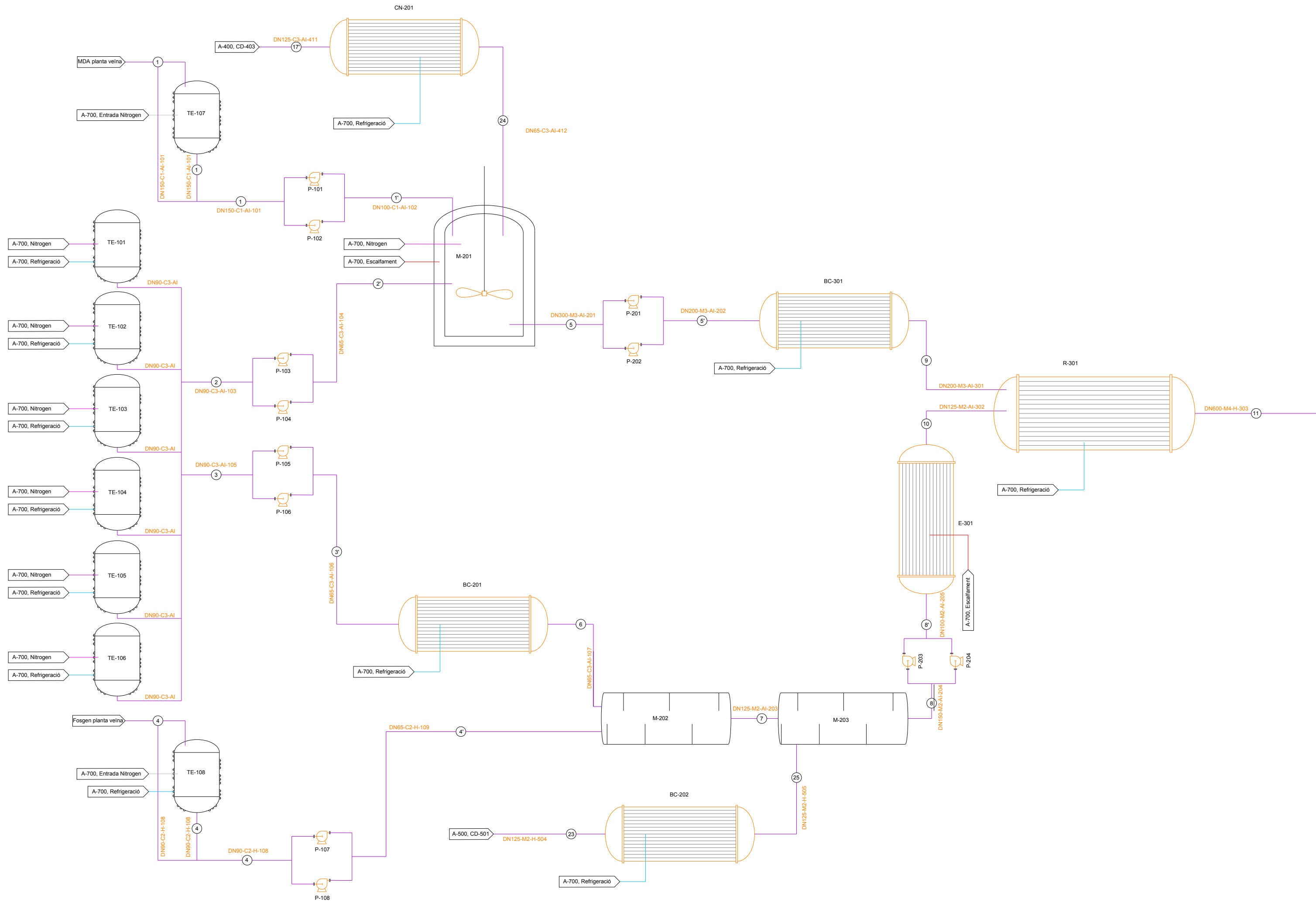
1.4. Balanç de matèria

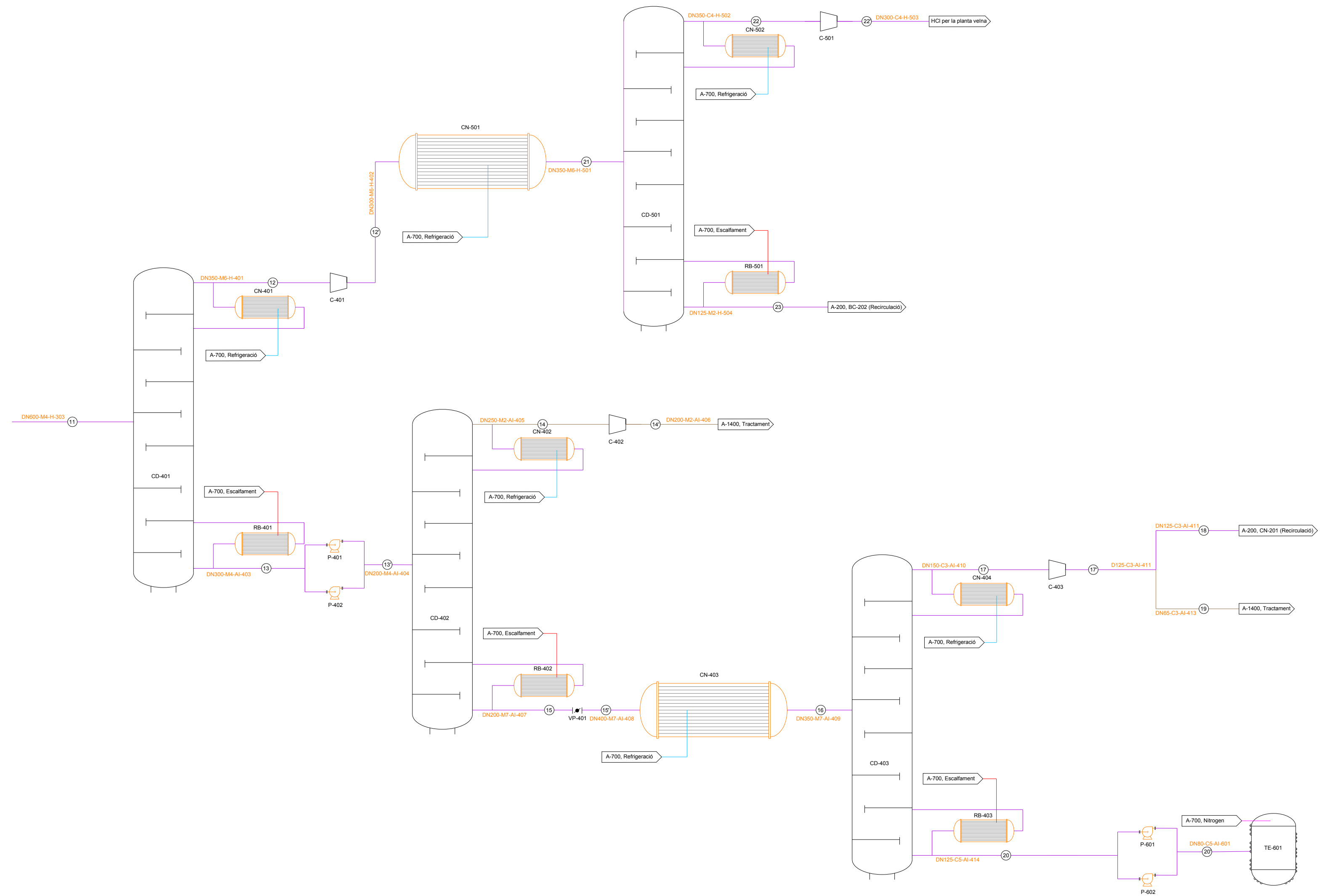
L'objectiu de qualsevol balanç de matèria és clau, i permet entendre la quantitat de matèria que entra, surt, s'acumula o es genera en un sistema o procés. En aquest cas, es comprovarà que la totalitat de la massa introduïda en el procés es correspon amb la de sortida.

A continuació es presenten la *Taula 1.4.1*, la *Taula 1.4.2* i la *Taula 1.4.3*, amb la caracterització de cadascun dels corrents del procés, juntament els diagrama de procés dividit en dues parts, per a poder situar cadascun d'aquests corrents. El diagrama s'ha dividit en dos per a poder visualitzar millor les diferents dades.

De cada corrent, es dona informació del seu cabal màssic, molar i volumètric global. També es dona informació sobre les fraccions màssiques dels diferents compostos en cadascun d'ells. A més, apareixen la seva temperatura i la seva pressió, i la fracció de vapor que presenta.

Quan un corrent entra en una bomba o en un compressor, el nou corrent presenta el mateix número que l'anterior, però se li afegeix un apòstrof. D'una altra banda, cada vegada que un corrent entra en un equip diferent d'un compressor i d'una bomba, el número de corrent canvia.





Taula 1.4.1. Caracterització de cadascun dels corrents del procés

Corrent	1	1'	2	2'	3	3'	4	4'	5	5'	6	7	8	8'
Temperatura (°C)	25	25	0	0	0	0	-10	-10	110	110	-10	-10	-10	-10
Pressió (bar)	1	3	1	3	1	4,11	1	4	3	15,13	4	3,79	3,58	15,12
Fracció de vapor	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cabal màssic (kg/h)	20320	20320	15159	15159	16328	16328	20533	20533	135480	135480	16328	36861	65484	65484
Cabal màssic (tones/h)	20,32	20,32	15,159	15,159	16	16	20,533	20,533	135,48	135,48	16	36,861	65,484	65,484
Cabal molar (kmol/h)	102	102	135	135	145	145	208	208	1080	1080	145	351	640	640,
Cabal volumètric (m³/h)	18	18	18	18	15	15	14	14	131	131	14	29	48	49
Fraccions màssiques components														
MDA	1	1	0	0	0	0	0	0	0,15	0,15	0	0	0	0
Fosgen	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0,56	0,75	0,75
Clorbenzè	0	0	1	1	1	1	0	0	0,85	0,85	1	0,44	0,25	0,25
MDI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
HCl	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Taula 1.4.2. Continuació de la caracterització de cadascun dels corrents del procés

Corrent	9	10	11	12	12'	13	13'	14	14'	15	15'	16	17	17'
Temperatura (°C)	136	86,69	115	-6,8	-10	177	177	173,8	173,8	196,8	194,3	80	110,4	110,4
Pressió (bar)	15	15	14,75	1,013	3,11	3,04	3,5	3	3,5	4	3,8	3,8	0,5	3,1
Fracció de vapor	0	0,74	0,46	1	1	0	0	1	1	0	0,02	0	1	1
Cabal màssic (kg/h)	135480	65484	200970	43123	43123	157847	157847	13190	13190	144657	144657	144657	119172	119172
Cabal màssic (tones/h)	135,48	65,4841	200,96	43,1228	43,1228	157,847	157,847	13,1896	13,1896	144,657	144,657	144,657	119,172	119,172
Cabal molar (kmol/h)	1080	640	1643	687	687	1280	1280	118	118	1161	1161	1161	1059	1059
Cabal volumètric (m³/h)	129	56	805	3093	3093	166	166	1465	1465	156	353	135	117	117
Fraccions màssiques components														
MDA	0,14999	0	0,003	0	0	0,0039	0,0039	0	0	0,0042	0,0042	0,0042	0	0
Fosgen	0	0,75	0,1466	0,6628	0,6628	0,0056	0,0056	0,0664	0,0664	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
Clorbenzè	0,84994	0,25	0,6544	0,001	0,001	0,8329	0,8329	0,9336	0,9336	0,8238	0,8238	0,8238	0,9999	0,9999
MDI	0	0	0,1238	0	0	0,1576	0,1576	0	0	0,172	0,172	0,172	0	0
HCl	0	0	0,0721	0,3362	0,3362	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Taula 1.4.3. Continuació de la caracterització de cadascun dels corrents del procés

Corrent	18	19	20	20'	21	22	22'	23	24	25
Temperatura (°C)	110,4	110,4	336,4	336,4	-10	-67,23	-67,23	53,46	100,2	-10
Pressió (bar)	3,1	3,1	1	1,1	3	2,5	4	4,5	3	4,35
Fracció de vapor	1	1	0	0	0,6139	1	1	0	0	0
Cabal màssic (kg/h)	100000	19172	25485	25485	43123	14496	14496	28620	100000	28620
Cabal màssic (tones/h)	100	19,172	25,485	25,485	43,123	14,496	14,496	28,62	100	28,62
Cabal molar (kmol/h)	888,5	170,3	102,5	102,5	686,9	397,6	397,6	289,3	888,5	289,3
Cabal volumètric (m³/h)	99	19	26	26	3093	2723	2723	22	98	20
Fraccions màssiques components										
MDA	0	0	0,0239	0,0239	0	0	0	0	0	0
Fosgen	0,0001	0,0001	0	0	0,6628	0,0002	0,0002	0,9985	0,0001	0,9985
Clorbenzè	0,9999	0,9999	0,0001	0,0001	0,001	0	0	0,0015	0,9999	0,0015
MDI	0	0	0,976	0,976	0	0	0	0	0	0
HCl	0	0	0	0	0,3362	0,9998	0,9998	0	0	0

Una vegada visualitzades les taules i el diagrama de procés, es poden entendre millor els passos seguits per tal de fer la comprovació del balanç de matèria global del procés:

$$\text{Cabals màssics d'entrada al procés} = \text{Cabals màssics de sortida del procés}$$

Les recirculacions no s'han de tenir en compte a l'hora de fer la comprovació del balanç. Els cabals màssics dels corrents que cal tenir en compte són els següents:

$$\text{Corrent 1'} + \text{Corrent 2'} + \text{Corrent 3'} + \text{Corrent 4'} = \text{Corrent 22'} + \text{Corrent 14'} + \text{Corrent 19} + \text{Corrent 20'}$$

Si ara s'agafen els valors numèrics dels cabals màssics d'aquests corrents:

$$20320 + 15159 + 16328 + 20533 = 14496 + 13190 + 19172 + 25485$$

$$72340 \text{ kg/h} = 72343 \text{ kg/h}$$

Amb aquesta última igualtat es pot demostrar l'acompliment del balanç de matèria, ja que aquest petit desajust es pot deure als valors agafats de les densitats i de les masses molars dels compostos entre altres. Tenint en compte la quantitat de massa que circula pel procés cada hora, aquesta diferència es pot considerar mínima.

1.5. Constitució de la planta

En aquest apartat es podran veure les diferents àrees de la planta de producció de MDI.

Aquestes es poden veure en la *Taula 1.5.1*, amb la seva nomenclatura corresponent.

Taula 1.5.1. Diferents àrees que constitueixen la planta

Àrea	Nomenclatura
Emmagatzematge de les matèries primeres	A-100
Mescla i preparació per la reacció	A-200
Reacció	A-300
Separació del producte	A-400
Recuperació dels reactius i de l'HCl	A-500
Emmagatzematge del producte	A-600
Serveis	A-700
Zona de càrrega i descàrrega dels camions	A-800
Sala de control i laboratoris	A-900
Oficines	A-1000
Zona de treballadors	A-1100
Taller de manteniment	A-1200
Zona de càrrega dels residus	A-1300
Tractament de gasos per empresa externa	A-1400

En la *Figura 1.5.1* es poden veure visualment com estan repartides les diferents àrees en la planta.

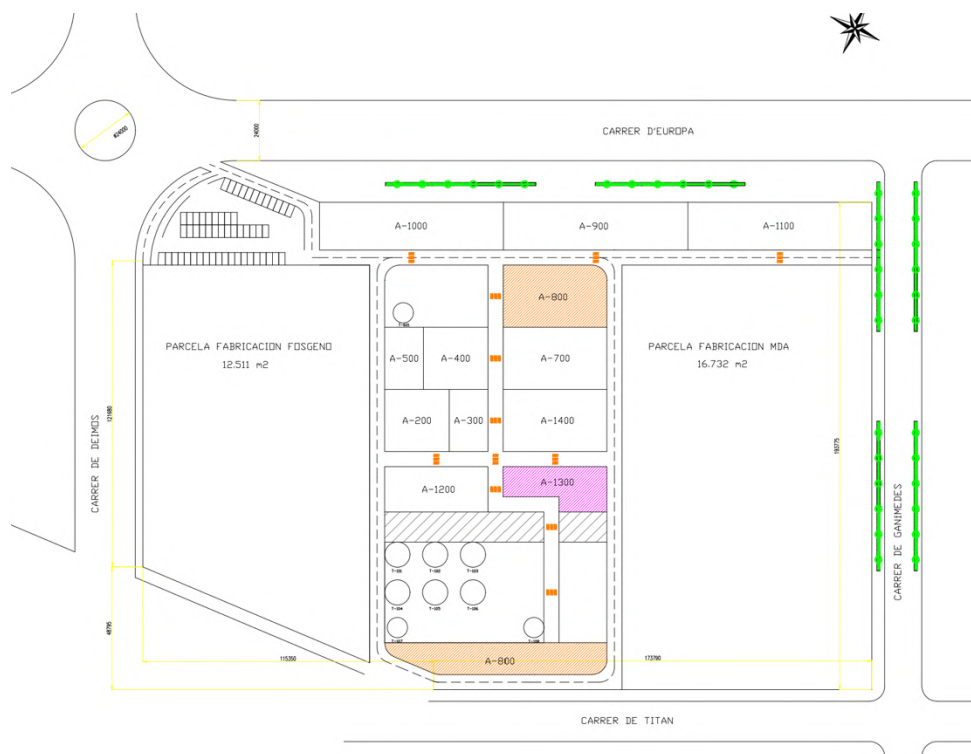


Figura 1.5.1. Plànol en 2D de la distribució de les diferents àrees de la planta química

Les diferents àrees de la planta es poden classificar en àrees que les engloben en diferents grups, segons la funció que compleixen, que són les següents:

- Àrea de producció. En formen part les àrees A-100, A-200, A-300, A-400, A-500 i A-600. Es té en compte tot el procés de transformació de les matèries primeres en el producte final, i compren l'emmagatzematge, la reacció, les operacions de separació i l'emmagatzematge del producte final.
- Àrea complementària al procés. En formen part les àrees A-700, A-800, A-1300 i A-1400. Entre aquestes àrees tenim els serveis de fred i calor, la zona dels tancs d'emmagatzematge del nitrogen que serveix per inertitzar, els equips per generar aire comprimit, el servei d'extinció d'incendis i la zona de càrrega i descàrrega dels camions. També s'inclou la zona de tractament i gestió de tots els corrents els quals ho requereixen. Es tracta de zones complementàries al procés, però igualment necessàries per al bon funcionament de l'àrea de producció.
- Àrea de suport. En formen part les àrees A-900, A-1000 i A-1200. Aquestes àrees donen suport a l'àrea de producció, ja sigui analitzant els corrents, les matèries primeres que intervenen en el procés o el producte acabat. Per una altra banda, es controlen paràmetres i les variables com les temperatures, pressions, cabals (entre d'altres) en l'àrea de producció, per tal que les condicions de treball siguin les definides. També es gestiona la part més econòmica de l'empresa, les relacions amb proveïdors, les vendes, les compres, els treballadors.
- Àrea de treballadors. En forma part l'àrea A-1100. Aquesta zona és exclusiva per al descans del personal i la seva preparació per a la jornada laboral.

1.5.1. Emmagatzematge de les matèries primeres (A-100)

En aquesta àrea serà on estaran ubicats els tancs d'emmagatzematge de clorobenzè i dels altres reactius. El fosgen i l'MDA arribaran de forma contínua de les plantes veïnes. Tot i això, caldrà disposar de cert emmagatzematge d'aquests reactius per si s'atura el subministrament per algun problema o tall en les altres plantes. És per això que s'ha decidit dimensionar dos tancs d'emmagatzematge, un per l'MDA i un altre pel fosgen. Els dimensionaments estan pensats per cobrir la producció de la planta durant 24 hores, en cas de tall del subministrament en les plantes veïnes.

Serà molt important tenir un bon control de la temperatura en l'àrea d'emmagatzematge. Això és especialment important pel fosgen, que per les seves propietats és un compost molt volàtil i que té un punt d'ebullició molt baix, i un augment de la temperatura provocarà la seva vaporització parcial, i a causa de la seva perillositat, això és crític. En el cas del clorobenzè, aquest compost presenta un punt d'ebullició molt més alt que el del fosgen.

Es vol assegurar que tots els compostos estiguin emmagatzemats en fase líquida, i evitar possibles vaporitzacions.

Es considera que el fosgen ve per canonada a la mateixa temperatura a la qual s'ha d'emmagatzemar, a $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. El tanc disposarà d'un aïllament d'escuma fenòlica, un material que destaca per les seves propietats aïllants i seguretat davant ambients amb riscos químics i d'incendi. A més, es disposarà d'un recobriment extra d'alumini per tal d'aïllar encara més el sistema. L'objectiu és que el fosgen es mantingui a aquesta temperatura durant el màxim temps possible, sense la necessitat d'una refrigeració constant. Per tal de refrigerar el tanc en els moments que la temperatura sigui superior a la que s'ha establert com a màxima, es disposa d'un serpentí intern, en contacte amb el fluid, el pas del qual s'activarà en moments puntals.

El clorobenzè també s'ha d'emmagatzemar a una temperatura molt baixa, tot i això, superior a la del fosgen. Aquest s'ha de mantenir a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, per la qual cosa els tancs també estan dissenyats de la mateixa forma, amb el mateix material aïllant i amb els serpentins interns de refrigeració, els quals s'activaran quan sigui necessari refrigerar.

En aquest cas és molt important el bon disseny de l'aïllament que recobreix els tancs, ja que això tindrà efectes directes sobre les necessitats de fred i les vegades que caldrà activar el sistema de refrigeració dels tancs. Tot i això, no és possible aïllar completament sistemes de l'entorn que els envolta, i per molt que es disposi de bons materials, la velocitat de bescanvi de calor serà més baixa, però continuarà estant present en certa manera.

S'ha considerat aquest tipus d'emmagatzematge i sistema de refrigeració, i no el d'una camisa amb refrigeració constant, per tal de reduir les despeses energètiques, la qual cosa suposaria un cost molt important en disposar de molts tancs d'emmagatzematge.

A més, els tancs de clorobenzè es van buidant, i fins que no arriba el camió cisterna per reomplir els tancs de nou, alguns d'ells estaran buits, i per tant inactius, la qual cosa afavoreix encara més el tipus d'emmagatzematge escollit.

Quant a l'MDA, la temperatura d'emmagatzematge no és un paràmetre que hagi d'estar controlat, ja que no té implicacions en la seguretat ni en altres aspectes que el compost es trobi a més o menys temperatura. Emmagatzemar l'MDA a temperatura ambient, tenint en compte les possibles variacions entre l'estiu i l'hivern, és suficient.

Per saber si és adient aplicar una APQ es necessitarà la fulla de seguretat de cada component que intervé en el procés que requereixi emmagatzematge.

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

L'àrea 200 de la planta MDIchem està dedicada exclusivament a les operacions de mescla dels diferents corrents de reactius implicats en la síntesi de MDI. En aquesta secció es duen a terme dues mescles principals: una entre el MDA i el dissolvent orgànic, el clorobenzè, i una altra entre fosgen i clorobenzè. Les operacions es realitzen sota condicions controlades de pressió i temperatura, adaptades a la naturalesa de cada substància i al comportament de la reacció posterior.

La mescla entre MDA i clorobenzè es realitza a un mesclador dinàmic, un tanc agitat mecànicament, on a més dels dos corrents purs dels reactius a dissoldre, s'introdueix un corrent de recirculació compost principalment per clorobenzè recuperat del procés. Aquesta mescla es porta a terme a 3 bars de pressió i a 110 °C, condicions que permeten assegurar la dissolució del sistema completa del MDA i garantir una composició homogènia abans de la seva introducció al reactor.

D'altra banda, la mescla entre fosgen i clorobenzè es realitza mitjançant dos mescladors estàtics en sèrie. Al primer, s'introdueixen fosgen i clorobenzè purs, i a través del disseny intern i els elements estàtics es garanteix una dispersió efectiva sense necessitat d'agitació mecànica. A continuació, la mescla parcial obtinguda s'introdueix al següent mesclador on s'afegeix un corrent de recirculació rica en fosgen. D'aquesta manera, s'assoleix una mescla final homogènia que compleix els requisits de concentració i estabilitat per a la seva posterior reacció amb el MDA. Aquesta operació es realitza a una pressió de 4 bar i una temperatura de -10 °C per garantir la seguretat i la integritat del fosgen.

Aquesta configuració de mescladors, tan dinàmica com estàtica, permet optimitzar la qualitat de mescles, minimitzar el consum d'energia i mantenir les condicions de seguretat necessàries per al tractament de reactius altament tòxics com el fosgen.

1.5.3. Reacció (A-300)

Es podria dir que es tracta de les àrees més importants de qualsevol planta química, ja que és on es transformen els reactius en el producte que es vol comercialitzar. No es

donaran més reaccions posteriorment, únicament operacions de separació, per tant, és molt important aconseguir les condicions òptimes per tal d'aconseguir que es transformi la màxima quantitat de reactiu en producte.

L'àrea de reacció està formada per un RCFP refrigerat, on els reactius entren en el reactor en estat líquid, i es dona la reacció pràcticament del tot, fins a assolir un grau de conversió del 97%. A la sortida de l'àrea de reacció apareix l'HCl i l'MDI, una petita quantitat d'MDA que no ha reaccionat, el fosgen que ha entrat en excés i no ha reaccionat. El corrent de sortida del reactor presenta una combinació de fase líquida i de fase gasosa.

1.5.4. Separació del producte (A-400)

En aquesta àrea, l'objectiu principal és separar el producte obtingut en la reacció de la resta de components mitjançant un conjunt de columnes de destil·lació, les condicions de treball de les quals es van ajustant i afinant en funció dels diferents corrents que s'han d'anar destil·lant.

Justament a la sortida de l'RCFP hi ha la primera columna de destil·lació, on acaben de reaccionar tots els components completament i a més s'aconsegueixen separar dos corrents diferenciats. Com que l'HCl i el fosgen tenen punts d'ebullició més baixos que la resta dels components, aquests sortiran per la part superior de la columna de destil·lació en fase gas. Els altres, l'MDI, l'MDA no reaccionat, el clorobenzè i restes de fosgen, sortiran per cues en estat líquid. El corrent gasós s'enviarà cap a l'àrea 500 i el corrent líquid s'introduirà en una nova columna de destil·lació.

En la segona columna de destil·lació s'acaben d'eliminar les restes de fosgen que havien quedat en el corrent i una part del dissolvent.

L'última de les columnes de destil·lació permet obtenir el producte per comercialitzar, i en aquesta s'acaba de separar una gran quantitat de dissolvent que encara restava en el corrent. A diferència de les altres columnes, es tracta d'una columna treballa al buit, ja que les temperatures d'ebullicions dels components que queden a la mescla que s'alimenta a la columna són molt elevades. Això permet separar els components a temperatures més baixes.

S'ha aconseguit obtenir un MDI amb un 97% en puresa, perquè el corrent de producte conté una petita quantitat d'MDA i altres traces. Tot i això, s'ha considerat una puresa prou elevada, ja que augmentar encara més el grau de separació implicaria un augment important dels costos, de la dificultat del procés i de les condicions que permetrien aconseguir una separació encara més refinada.

1.5.5. Recuperació dels reactius i de l'HCl (A-500)

L'objectiu principal d'aquesta àrea és separar el fosgen prèviament introduït en excés de l'HCl format en la reacció. És d'especial importància recircular el reactiu no reaccionat

per tal de no tenir un malbaratament d'aquesta matèria en la planta, la qual cosa elevaria encara més els costos de producció del producte.

En aquesta àrea es vol separar el fosgen que no ha reaccionat i el clorobenzè de l'HCl. Es vol recuperar el reactiu que s'havia introduït en excés i el dissolvent per tal de poder-los recircular procés i poder aprofitar-los. L'HCl s'enviarà com a matèria primera a la planta veïna de producció de fosgen.

En aquesta àrea també serà necessària una columna de destil·lació per poder fer una bona separació.

1.5.6. Emmagatzematge del producte (A-600)

En aquesta àrea s'emmagatzema el producte que surt de l'última de les columnes de destil·lació. Es busca mantenir el producte emmagatzemat en unes condicions òptimes per tal d'assegurar que manté les seves propietats i no pateix cap degradació.

El corrent de producte que es comercialitzarà i que surt de l'última columna de destil·lació de l'A-400 s'acumularà en un tanc d'emmagatzematge, des d'on s'aniran omplint els camions cisterna, els quals venen diàriament a recollir el producte.

1.5.7. Serveis (A-700)

En aquesta àrea es troben serveis de diferents tipus, necessaris pel bon funcionament de la planta. Aquests no formen part del procés com a tal, però permeten que procés es desenvolupi amb les condicions normals i esperades.

1.5.7.1. Serveis de fred

Els sistemes de refrigeració de la planta es basa en dos subsistemes principals: les torres de refrigeració i un chiller industrial. Ambdós sistemes són essencials per mantenir les condicions tèrmiques adequades durant els diversos processos productius i garantir tant la seguretat operativa com l'eficiència energètica.

Les torres de refrigeració s'encarreguen de refredar aigua de xarxa prèviament descalcificada, la qual s'empra principalment per eliminar la calor generada en processos que operen a temperatures moderades. L'aigua entra a les torres a elevades temperatures, provinent de bescanviadors i del mateix reactor de la planta, on s'extreu energia tèrmica d'aquests equips i línies de procés, i surt a una temperatura més baixa després de ser refredada mitjançant el contacte amb l'aire atmosfèric amb el qual treballa la torre. Aquests equips de refrigeració són fonamentals en operacions de refredament i condensació.

Quantitativament, les torres de refrigeració refreden aproximadament $2,09 \cdot 10^6$ kg/h, necessitant una aportació energètica de -51.241,29 kW.

D'altra banda, el chiller s'encarrega de refrigerar un corrent d'aigua glicolada al 30%, que permet arribar temperatures molt més baixes que l'aigua de xarxa per si sola, essent

útil en processos on es requereix refrigeració més intensa. Aquest fluid, en presentar un punt de congelació més baix, circula a temperatures compreses entre -15°C i els 0°C , necessàries per línies de refrigeració de productes sensibles i perillosos si es tracten a temperatures més altes.

La capacitat del chiller instal·lat permet treballar amb un cabal de 529.160 kg/h amb una potència de 5.482,65 kW. La seva operació assegura una refrigeració eficaç i continua clau de la infraestructura de suport a la producció.

Tot i això, presentats aquests serveis de fred, cal destacar que existeix una peculiaritat en la planta la qual és explicada a continuació. Un dels processos més exigents de MDIchem requereix operar una columna de destil·lació a temperatures extremadament baixes, concretament arribant als -67°C , per a aconseguir la condensació d'uns certs compostos que no poden separar-se eficientment a temperatures més elevades. Per a aconseguir aquestes condicions de treball de manera contínua i controlada, s'ha dissenyat un sistema de refrigeració en cascada, una tecnologia àmpliament utilitzada en la indústria química per a processos que demanden temperatures per sota del punt de congelació de l'aigua i fins a rangs criogènics moderats.

El principi del sistema de refrigeració en cascada consisteix a combinar dos cicles de refrigeració acoblats tèrmicament, cadascun d'ells funcionant amb un refrigerant diferent i adaptat a un determinat rang de temperatura. Aquest disseny escalonat permet que el sistema superi les limitacions individuals de cada refrigerant i s'aconsegueixin temperatures que no serien possibles amb un sol circuit. El funcionament general del sistema consta de dos circuits:

- Primer circuit (etapa alta de temperatura): Aquest circuit utilitza un refrigerant convencional, com pot ser el R-404A, que és eficaç en un rang de temperatura intermèdia (per exemple -30°C). Aquest primer circuit actua com un prerefrigerador, reduint la temperatura del sistema fins a un nivell on pot operar el segon refrigerant més especialitzat. En aquest primer llaç, el refrigerant passa per un compressor, on és comprimit, elevant la seva pressió i temperatura. Posteriorment, passa per un condensador on cedeix la calor absorbida a l'ambient (normalment mitjançant aire), i es liqua. Després del seu pas per una vàlvula d'expansió, el refrigerant es refreda i entra a l'evaporador, on absorbeix calor del segon circuit (de baixa temperatura), cosa que permet la seva condensació.
- Segon circuit (etapa de baixa temperatura): En aquesta etapa s'empra un refrigerant criogènic, com el R-23, que pot operar eficientment a temperatures de l'ordre de -70°C . Aquest segon refrigerant s'encarrega d'absorbir la calor directament del condensador criogènic de la columna, cosa que permet que part dels vapors que emergeixen de la destil·lació es condensin i continuï així la separació de components volàtils. En aquest circuit, el refrigerant també segueix

un cicle clàssic de compressió, condensació, expansió i evaporació. La diferència clau és que la condensació no es produeix mitjançant contacte directe amb l'entorn, sinó que es realitza gràcies al bescanviador tèrmic connectat a l'evaporador del primer circuit, que actua com a embornal tèrmic intermedi.

Aquest sistema requereix una sèrie de components clau per a garantir un funcionament segur i eficient entre els quals es troben: compressors (un per a cada circuit, seleccionats en funció del refrigerant i el rang de temperatura corresponent), condensadors (el primer circuit empra un condensador convencional, mentre que el segon condensa gràcies l'intercanviador amb el primer circuit), reboilers (en el segon circuit l'evaporador es troba tèrmicament acoblat al condensador de la columna criogènica), intercanviador de calor intermedi (element clau que permet connectar tèrmicament ambdós circuits i permet l'intercanvi eficient de calor entre ells sense mescla de refrigerants), vàlvules d'expansió (regulen la pressió i temperatura del refrigerant abans de la seva entrada als reboilers).

A més presenta sistemes de control automàtic compost per sensors de temperatura i pressió, PLC i sistemes d'alarma que garanteixen un control precís del procés. Altrament, presenta elements de seguretat com ara vàlvules de sobrepressió, detectors de fugues i proteccions tèrmiques que assegurin la integritat del sistema i dels operadors.

Aquesta solució en cascada presenta múltiples avantatges per a la planta com ara una alta eficiència energètica, un funcionament continu i estable, reducció del consum de fums externs, control automàtic i precís i un menor impacte mediambiental.

Tot i això, aquest sistema és un sistema molt complicat de dissenyar i de calcular els paràmetres necessaris esdevenint pràcticament com a un altre projecte nou que s'hauria d'encetar de forma similar a aquest. És per aquest motiu que se suposarà que la columna afectada per aquestes condicions (CD-501) té un sistema similar de funcionament a la resta de columnes de la planta, tot i que no es dissenyarà un condensador (CN-501) per aquella columna, ja que no es poden donar resultats lògics, tot i que sí que és present en diagrames, plànols i en el càlcul de canonades. Per tant, aquest suposat condensador englobaria tot aquest servei de fred particular. Tampoc es farà més referència als fluids refrigerants esmentats, pel fet que no es poden calcular les necessitats màssiques d'aquests fluids.

1.5.7.2. Serveis de calor

El sistema de calor de la planta està dissenyat per abastir les necessitats tèrmiques de diferents processos mitjançant l'ús de calderes industrials. Aquestes unitats permeten escalfar un fluid tèrmic que es distribueix per la planta per arribar a temperatures demandades en les diferents etapes del procés productiu.

La planta disposa de diferents calderes que treballen en diferents rangs de temperatures, cobrint des d'escalfaments moderats des dels 50 °C, fins a condicions més

exigents on arriben als 400 °C. Això permet una elevada versatilitat d'operació, ja que alguns processos necessiten temperatures moderades, mentre que d'altres precisen condicions més extremes per a separacions o evaporacions.

Els cabals de fluid tèrmic mobilitzats són considerables, amb una demanda tèrmica total superior a 77.000 kW, dividit entre les 5 calderes de les quals disposa la planta. Les calderes estan dimensionades i distribuïdes per a garantir el subministrament continu de calor, incloent en condicions d'alta càrrega tèrmica o funcionament prolongat.

La calor generada es transfereix al fluid tèrmic i mitjançant bescanviadors de calor permeten la seva circulació en la xarxa de procés. Les temperatures de sortida del Therminol 55 des de les calderes oscil·len entre els 58 °C fins als 400 °C, depenent de la caldera i les necessitats tèrmiques del procés al qual donen servei.

A més el sistema inclou tots els elements auxiliars necessaris per al seu funcionament segur i eficient, com vàlvules de control, bombes de recirculació, sistemes d'aïllament i dispositius de seguretat com s'exposarà en pròxims capítols.

Aquest disseny modular i esglaonat de xarxa tèrmica no només millora l'eficiència energètica global de la planta, sinó que també permet una millor adaptació a les diferents operacions i una reducció del consum energètic, ja que cada caldera treballa en el rang més adequat a la seva funció específica.

1.5.7.3. Servei d'inertització amb nitrogen

El sistema d'inertització de la planta MDIchem té un paper clau en la seguretat del procés, especialment per la presència de productes altament reactius com el fosgen, el MDI i el MDA. L'agent inert utilitzat és nitrogen (N_2), que s'emmagatzema a pressió a l'àrea 700 i es distribueix cap als diferents punts de la planta mitjançant una xarxa de canonades i reguladors de pressió.

L'objectiu principal del sistema és desplaçar l'oxigen atmosfèric a l'interior d'equips i línies per tal de prevenir riscos d'ignició, explosió o reaccions no desitjades. Aquesta funció és especialment crítica en tancs d'emmagatzematge de reactius i dissolvents, així com en línies de transferència, mescladors i equips on es produeixen o manipulen compostos volàtils.

Els usos concrets del nitrogen inert a la planta són:

- Inertització de tancs d'emmagatzematge: es manté una atmosfera inerta permanent per evitar acumulació de vapors inflamables o reaccions amb oxigen.
- Purgues de línies de procés abans de posada en marxa o després d'aturades, per garantir l'absència d'aire.
- Compensació de pressió durant operacions de buidatge de tancs, evitant la formació de buit i entrant nitrogen quan disminueix el volum intern.

- Sistemes de venteig controlat per a l'expulsió de gasos en cas de sobrepressió durant l'ompliment, sempre dins dels límits de seguretat.
- Inertització puntual d'equips abans de manteniment o intervencions tècniques.

El sistema disposa de vàlvules automàtiques, reguladors de cabal, pressòstats i alarmes per garantir un funcionament segur i estable, mantenint en tot moment condicions de pressió positiva controlada i evitant l'entrada d'aire atmosfèric.

1.5.7.4. Servei de compressió d'aire

L'aire comprimit és un servei bàsic i imprescindible a la planta MDIchem, amb aplicacions que cobreixen tant el control de processos com les tasques auxiliars i de manteniment. El sistema es divideix en dues línies principals: aire d'instruments i aire de servei, cadascuna amb característiques i requisits diferenciats.

L'aire d'instruments, de gran puresa, sec i lliure d'oli, s'utilitza per a l'accionament de vàlvules de control pneumàtiques, presents a pràcticament tots els equips de la planta: tancs d'emmagatzematge, mescladors, reactor, columnes de destil·lació i bescanviadors de calor. Aquest aire permet regular cabals, nivells, pressions i temperatures en temps real, garantint un funcionament estable i segur del procés. També alimenta actuadors pneumàtics per a vàlvules on-off, desviadors de flux i dispositius d'automatització.

Paral·lelament, l'aire de servei és emprat en aplicacions generals com l'alimentació d'eines pneumàtiques per a manteniment, i neteja puntual d'equips de forma controlada. Ambdues línies d'aire s'integren amb filtres i reguladors específics per garantir la qualitat i pressió adequades segons la funció a desenvolupar.

A més, algunes bombes pneumàtiques (AODD) utilitzen directament aire comprimit per funcionar, requerint una connexió dedicada amb filtre-regulador per garantir la protecció i l'eficiència de l'equip.

Aquest sistema de compressió assegura una elevada fiabilitat operativa, cosa que permet l'automatització segura de múltiples punts crítics del procés productiu.

1.5.8. Zona de càrrega i descàrrega de camions (A-800)

L'àrea de càrrega i descàrrega està dissenyada per gestionar de manera segura i eficient l'entrada i sortida dels materials de la planta. El solvent arriba en cisternes líquides adaptades per al transport de substàncies perilloses, i es descarreguen en canonades connectades directament als tancs d'emmagatzematge; les línies compten amb sistemes de control de pressió, vàlvules de seguretat i connexions estandarditzades. D'altra banda, el producte final, el MDI, es carrega tant en cisternes líquides per distribució a granel com en contenidors tipus IBC, segons les necessitats del client. L'àrea disposa de sistemes de contenció secundària, zones d'accessos segregats i mesures de seguretat per minimitzar qualsevol risc d'abocament accidental o exposició química durant les operacions logístiques.

1.5.9. Sala de control i laboratoris (A-900)

En la sala de control es disposa de tot el material per a monitorar i controlar les variables del procés. Gràcies al conjunt de llaços de control, els PLC, l'SCADA i els ordinadors, es pot mostrar com evoluciona el procés per pantalla. Es podrà actuar sobre els elements de la planta en cas que sigui necessari, encara que això també es pot arribar a fer en planta.

En els laboratoris generalment s'analitzen diferents mostres dels corrents de procés i de les matèries que entren i surten, per tal de veure que es compleixen amb les especificacions.

1.5.10. Oficines (A-1000)

En aquesta àrea és on es troba la gestió administrativa de l'empresa, es controlen les compres i les vendes, es negocia amb els proveïdors i es coordina la compra de les matèries primeres, etc.

1.5.11. Zona de treballadors (A-1100)

És l'àrea que inclou el menjador i els vestuaris. Aquesta àrea està pensada pel descans dels treballadors, on aquests puguin fer les pauses corresponents pels menjars. També és la zona on els treballadors es preparen per accedir amb la vestimenta adequada a la zona de treball i on disposen de privacitat.

1.5.12. Taller de manteniment (A-1200)

Aquesta àrea està equipada amb tot el material de recanvi i les eines per a fer el manteniment adequat dels equips de processos i qualsevol element que es pugui espatllar. Aquesta àrea permet assegurar la continuïtat operativa del procés químic.

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

Aquesta zona està destinada a la càrrega de residus per al seu posterior tractament extern. Aquesta zona es diferencia de la A-800 per a no mesclar els residus amb l'entrada i sortida de materials. En aquesta, es classificaran de manera ordenada i degudament separada els diferents tipus de residus en els seus respectius recipients. Els residus d'aquesta àrea seran sòlids. L'explicació de la seva gestió, així com el seu emmagatzematge es troba argumentat en el **Capítol 6. Medi ambient**.

1.5.14. Tractament de gasos per part d'una empresa externa (A-1400)

Aquesta zona està destinada a ser cedida a l'empresa externa que s'ocupa de la gestió de residus gasosos. En aquesta no hi haurà cap edificació ni cap equip, serà una zona d'ús exclusiu de la empresa de tractament.

1.6. Balanç d'energia

En una planta com la que presenta MDIchem, el balanç d'energia és una eina fonamental en l'anàlisi d'aquesta i és, per tant, un punt important a comentar com a especificació

del projecte. El balanç energètic permet conèixer la demanda tèrmica global de la planta i optimitzar el dimensionament dels equips de calefacció i refrigeració; així com avaluar la viabilitat energètica, i per banda econòmica, dels sistemes de serveis prèviament presentats en l'especificació de la seva àrea corresponent.

A més, un balanç energètic rigorós permet detectar possibles excedents d'energia que poden ser recuperats o reaprofitats, reduint així el consum de recursos i millorant la sostenibilitat del procés.

En la *Taula 1.6.1* es presenten els equips de serveis que intervenen en el balanç tèrmic de la planta, indicant l'energia tèrmica que consumeixen o generen. Cal destacar que s'ha seguit el criteri convencional en què una potència positiva indica que s'ha aportat energia a la planta, mentre que una potència negativa indica una demanda o consum energètic. Fet aquest aclariment es presenta el balanç d'energia dels equips i finalment es determina el balanç global de tots els equips.

Taula 1.6.1. Balanç d'energia

Identificació	Equip	Potència calorífica (kW)
CL-701	Caldera	4972,34
CL-702	Caldera	13252,17
CL-703	Caldera	2017,15
CL-704	Caldera	55543,70
CL-705	Caldera	0,23
TR-701	Torre de refrigeració	-45279,99
TR-702	Torre de refrigeració	-5961,31
CH-701	Chiller	-5482,65
Balanç d'energia calorífica total		19061,64

Es pot observar a la *Taula 1.6.1* com el valor resultant del balanç total d'energia pren un valor positiu, la qual cosa indica que es genera més energia calorífica de la que els equips de serveis de la planta requereixen. Tenint en compte aquest paràmetre, l'equip encarregat del disseny d'aquest projecte ha decidit buscar un sistema que permeti transformar aquesta energia calorífica en energia elèctrica per tal d'abastir la planta, el que es coneix tècnicament com a un sistema de cogeneració.

S'ha optat per implementar un sistema de cogeneració basat en una turbina de vapor de contrapressió. Les calderes presents en MDIchem, generen un vapor sobreescalfat que, després de complir la seva funció tèrmica principal, encara conserven una quantitat significativa d'entalpia que pot ser aprofitada per generació elèctrica. D'aquesta manera, les calderes produeixen un vapor en condicions prou elevades, la qual cosa

permet dirigir la part del vapor generat que resta després de cobrir la demanda tèrmica del procés fins a una turbina de contrapressió. Aquesta decisió és viable, ja que la planta ha estat dissenyada per a treballar en circuits tancats de fluids tèrmics i, per tant, és possible derivar el vapor sobrant sense comprometre el procés principal.

Un cop el vapor excedent s'introdueix en la turbina de vapor de contrapressió, on s'expandeix generant energia mecànica. Aquesta energia és transformada immediatament en energia elèctrica mitjançant un generador acoblat, que es connecta al sistema elèctric de la planta.

L'eficiència de conversió de calor en electricitat depèn de molts factors, però s'ha decidit agafar un valor típic i realista de rendiment net del sistema al voltant del 15%, ja que es tenen presents coeficients d'eficiència mecànica, elèctrica i pèrdues tèrmiques de tot el conjunt del sistema de reaprofitament energètic. Aquest valor vol dir que únicament es podrà transformar i injectar a la xarxa elèctrica interna el 15% de tota l'energia calorífica que resultava del balanç d'energia.

Quantitativament, es pot calcular i determinar que s'obtenen 68,46 MWh diaris. Aquest valor és prou elevat per a considerar que permet donar electricitat a tota la planta, la qual cosa suposa beneficis per a la planta que engloba aquest projecte, tant ambientalment, ja que la planta és més autosostenible per aquesta banda i no depèn de la xarxa elèctrica, com econòmicament, que permet no comptar amb la despesa que suposa l'electricitat que es necessitaria a la planta.

1.7. Especificacions i necessitats de serveis

MDIchem requereix una sèrie de serveis complementaris i auxiliars, imprescindibles per al funcionament de la planta.

En la *Taula 1.7.1* es pot veure informació sobre cadascun dels serveis.

Taula 1.7.1. Serveis de la planta química

Servei	Classificació	Font	Àrea
Aigua de xarxa	Matèria	Externa	Peu de parcel·la
Aigua contra incendis	Matèria	Externa	700
Nitrogen gas	Matèria	Interna	700
Aigua glicolada (30%)	Matèria	interna	700
Therminol 55	Matèria	Interna	700
Aire comprimit	Matèria	Interna	700
Electricitat	Energia	Interna	Peu de parcel·la

Servei	Classificació	Font	Àrea
Gas natural	Energia	Externa	700

1.7.1 Aigua glicolada (30%)

L'aigua glicolada al 30% s'ha utilitzat com a refrigerant en bescanviadors, condensadors, tancs d'emmagatzematge, i el mixer.

L'aigua glicolada al 30 % és una mescla líquida formada per aigua i un 30 % en volum de propilenglicol (PG). Aquest tipus de fluid s'usa àmpliament com a agent de transferència de calor en sistemes de refrigeració i calefacció, especialment en circuits tancats on es vol evitar la congelació de l'aigua. És incolora o lleugerament blavosa, amb una olor suau, i no és inflamable en condicions normals. Es presenta com una solució estable i homogènia.

El líquid no presenta perill d'ignició espontània, i té un punt d'inflamació superior als 100 °C, per la qual cosa és considerat un producte relativament segur. En cas d'exposició a temperatures molt altes, es pot descompondre lentament, generant compostos orgànics volàtils i irritants. A més, pot reaccionar amb agents oxidants forts.

En relació amb la seva toxicitat, el propilenglicol és considerat de baixa toxicitat. Tot i això, una exposició crònica o la ingestió en grans quantitats pot afectar el sistema nerviós o provocar irritacions lleus en pell i mucoses.

1.7.2. Therminol 55

Per l'evaporador, i els reboliers del procés, s'ha decidit emprar el Therminol 55 com a fluid tèrmic. Ja que el Therminol està pensat per ser utilitzat en un rang de temperatures de 100 °C fins a 400 °C, que és el rang de temperatures en el que opera l'evaporador i el rebolier de la planta d'MDIchem. A més, com el Therminol 55 és químicament estable i té baixa reactivitat, redueix el risc de reaccions no desitjades, en cas de fuites.

El Therminol 55 és un fluid tèrmic sintètic de base orgànica, dissenyat per la transferència de calor. Es fa servir principalment en processos industrials que requereixen temperatures de treball mitjanes i altes, com ara evaporadors, reboliers i reactors.

Una de les característiques principals del Therminol 55 és que presenta una gran estabilitat tèrmica, la qual cosa permet una llarga vida útil del fluid sense necessitat de canvis freqüents. A més, té una baixa pressió de vapor, fins i tot a temperatures elevades, cosa que redueix el risc de fuites i sobrepressió als sistemes.

Tot i ser un compost orgànic, no és miscible amb l'aigua i no s'evapora fàcilment en condicions ambientals normals, però sí que pot generar vapors en condicions de sobreescalfament. En cas d'incendi, pot alliberar compostos irritants i tòxics.

El Therminol 55 no és compatible amb oxidants forts i pot reaccionar de forma perillosa en cas de contacte amb aquests. També pot afectar alguns tipus de plàstics i elastòmers.

Quant a toxicitat, el Therminol 55 presenta una toxicitat baixa a moderada. Una exposició crònica i prolongada pot tenir efectes sobre el sistema nerviós i altres òrgans.

A continuació en la *Taula 1.7.2* es presenten algunes propietats físiques del Therminol 55.

Taula 1.7.2. Algunes propietats físiques del Therminol 55 [11]

Pes molecular (g/mol)	320
Densitat (kg/m³) a 20°C	872
Pressió de vapor (kPa) a 20°C	-
Punt d'inflamació (°C) c.c	177
Punt de fusió (°C) a 1 atm	-56
Punt d'ebullició (°C) a 1 atm	351
Viscositat (cP) a 20°C	41,6

1.8. Planificació temporal de construcció

En tots els projectes, és molt important la planificació temporal, per tal de tenir un seguiment de les tasques a realitzar, marcar límits en el temps, i completar les activitats de forma eficient. Això sobretot és molt important quan s'ha de construir una planta des de zero.

Per fer una planificació temporal cal fer una definició de totes les tasques a realitzar, la durada de cadascuna d'elles i la precedència entre tasques. La precedència fa referència al fet que una tasca concreta es pot començar una vegada s'acabi una altra o unes altres tasques.

En la *Taula 1.8.1* es pot veure la llista de totes les tasques a realitzar per tal de fer la construcció de la planta, amb la seva durada i la precedència.

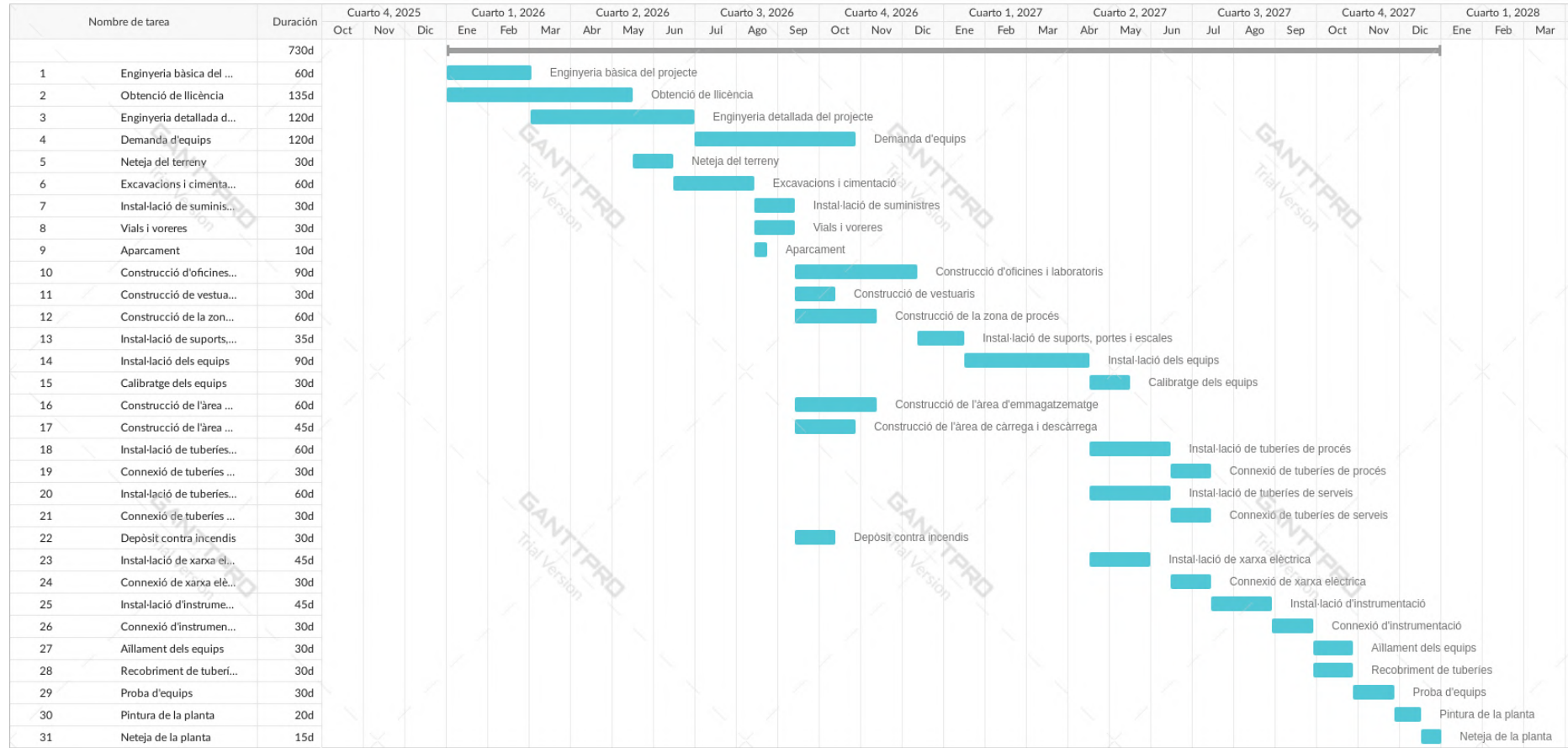
Taula 1.8.1. Planificació temporal de la construcció de la planta

Nº tasca	Tasca	Duració	Precedència
A	Enginyeria bàsica del projecte	60	0:A
B	Obtenció de llicència	135	0:B
C	Enginyeria detallada del projecte	120	A:C
D	Demanda d'equips	120	C:D
E	Neteja del terreny	30	B:E
F	Excavacions i cimentació	60	E:F
G	Instal·lació de subministraments	30	F:G
H	Vials i voreres	30	F:H
I	Aparcament	10	F:I
J	Construcció d'oficines i laboratoris	90	G:J

Nº tasca	Tasca	Duració	Precedència
K	Construcció de vestuaris	30	G:K
L	Construcció de la zona de procés	60	G:L
M	Instal·lació de suports, portes i escales	35	J-L:M
N	Instal·lació dels equips	90	L:N
O	Calibratge dels equips	30	N:O
P	Construcció de l'àrea d'emmagatzematge	60	G:P
Q	Construcció l'àrea de càrrega i descàrrega	45	G:Q
R	Instal·lació de xarxa de canonades de procés	60	N,P,Q:R
S	Connexió de canonades de procés	30	R:S
T	Instal·lació de canonades de serveis	60	N,P,Q:T
U	Connexió de canonades de serveis	30	T:U
V	Dipòsit contra incendis	30	G:V
W	Instal·lació de xarxa elèctrica	45	J,N:W
X	Connexió de xarxa elèctrica	30	W:X
Y	Instal·lació d'instrumentació	45	N,R,T,W:Y
Z	Connexió d'instrumentació	30	Y:Z
AA	Aïllament dels equips	30	Z:AA
AB	Recobriments de canonades	30	Z:AB
AC	Prova d'equips	30	AA,AB:AC
AD	Pintura de la planta	20	AC:AD
AE	Neteja de la planta	15	AD:AE

En la *Figura 1.8.1* es pot veure la representació d'aquestes tasques en un diagrama de Gantt.

Figura 1.8.1. Diagrama de Gantt de les tasques a realitzar



Veient la *Figura 1.8.1* es pot determinar el camí crític de les tasques presentades per a tenir-les presents en el període de construcció i així no allargar aquest temps, per poder començar a partir del tercer any tal com és previst en el **Capítol 9. Valoració econòmica**. Aquest camí crític es regeix per les accions presentades a la *Taula 1.8.2*, mostrada a continuació:

Taula 1.8.2. Tasques del camí crític

Tasques del camí crític	Especificació de la tasca
B	Obtenció de llicència
E	Neteja de terreny
F	Excavacions i cimentació
G	Instal·lació de subministraments
J	Construcció d'oficines i laboratoris
M	Instal·lació de suports, portes i escales
N	Instal·lació d'equips
R	Instal·lació de la xarxa de canonades de procés
S	Connexió de canonades de procés
Y	Instal·lació d'instrumentació
Z	Connexió d'instrumentació
AA	Aïllament dels equips
AC	Prova d'equips
AD	Pintura de la planta
AE	Neteja de la planta

El camí seguit per les tasques de la *Taula 1.8.2* no és l'única opció possible, i per tant hi ha rutes alternatives que també condueixen a la mateixa durada. Aquest aspecte cal tenir-ho present en el desenvolupament de la construcció de la planta, ja que no totes les tasques restants que no es presenten en la taula anterior esdevenen tasques flotants i caldria fer un estudi per veure si retardar alguna de les tasques provoca que la construcció de la planta trigui més dels 730 dies estipulats.

1.9. Bibliografia

- [1]. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, Sixth Edition, 2002 Electronic Release PHOSGENE - Figure 1. (2002). *Electronic Release PHOSGENE - Figure, 1.*
- [2] de Carbonilo, D. T. P. E. L. E. D. E. L. L. D. E. E. P. D. E. L. C. (s/d). *CLORURO DE CARBONILO*. Insst.es. Recuperado el 6 de junio de 2025, de <https://www.insst.es/documents/94886/290254/DLEP+34.pdf/bc083aba-9b6f-43bb-bdb4-6d44c3a27dbd?version=1.0&t=1528396280667>
- [3]. PubChem. (s/d). *4,4'-Methylenedianiline*. Nih.gov. Recuperat el 6 de juny del 2025, de https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/4_4_-Methylenedianiline
- [4]. *DIISOCIANATO DE DIFENILMETANO (MDI)*. (2020, mayo 21). TRASKEM. <https://traskem.com/producto/diisocianato-de-difenilmetano-mdi/>
- [5]. *Substance Information - ECHA*. (s/d). Europa.eu. Recuperat el 6 de juny del 2025, de <https://echa.europa.eu/substance-information/-/substanceinfo/100.002.697>
- [6]. PubChem. (s/d). *Methylene Diphenyl Diisocyanate*. Nih.gov. Recuperat el 6 de juny de 2025, de <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/7570>
- [7]. de Hidrógeno, D. T. P. E. L. E. D. E. L. L. D. E. E. P. D. E. L. C. (s/d). *CLORURO DE HIDRÓGENO*. Insst.es. Recuperat el 6 de juny del 2025, de <https://www.insst.es/documents/94886/288901/DLEP+55+Cloruro+de+hidr%C3%B3geno.pdf/1e65a75e-6c6d-4125-bc52-f2aa9da2388d?version=1.0&t=1528396175200>
- [8]. *Icsc 0642 - clorobenceno*. (s/d). Ilo.org. Recuperat el 6 de juny de 2025, de https://chemicalsafety.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p_lang=es&p_card_id=0642&p_version=2
- [9]. Hettich, B. V., & Latourette, H. K. (1965). *Continuous method of preparing aromatic isocyanates*
- [10]. Sohn, M., Stroefer, E., Nevejans, F., Penzel, U., Pallasch, H.-J., Leuthold, R., Brodhagen, A., Wölfert, A., Mackenroth, W., & Maurer, M. (2014). *Método para la producción continua de isocianatos (Patente española n.º ES 2 353 005 T5)*.
- [11]. *Home page*. (s/d). Eastman.com. Recuperat el 6 de juny de 2025, de https://productcatalog.eastman.com/tds/ProdDatasheet.aspx?product=71093433&gl=1*1oh40d4*_gcl_au*MjA1OTUzMzE5Ny4xNzQ1OTlwNzcw