FORMICS
INDUSTRIAL CHEMICAL
FORMALDEHIDO DE CALIDAD

PLANTA DE PRODUCCIÓN DE FORMALDEHÍDO

LUIS M. APARICIO SÁNCHEZ
ALEJANDRO JUÁREZ SÁNCHEZ
MASOUMEH HONARKAR ASHNA
MANEL NÁJERA ROCABAYERA
EDUARD MARTÍ CARDONER
DAVID A. SARRIA VALDIVIA

TUTOR : JOSEP A. TORÀ SUAREZ

JUNIO 2026

UAB
Universitat Autònoma de Barcelona

CC BY NC ND

FORMICS
INDUSTRIAL CHEMICAL
FORMALDEHIDO DE CALIDAD

PLANTA DE PRODUCCIÓN DE FORMALDEHÍDO

CAPÍTULO 1. ESPECIFICACIONES

UAB
Universitat Autònoma de Barcelona

CC BY NC ND

Tabla de contenido

Capítulo 1. Especificaciones 1
1.1 Definición del proyecto 1
1.1.1 Bases del proyecto 1
1.1.2 Alcance del proyecto 2
1.1.3 Localización de la planta 4
1.2 Características de los reactivos y del producto 9
1.2.1 Metanol 9
1.2.2 Agua 10
1.2.3 Aire 11
1.2.4 Formaldehído 12
1.3 Descripción general del proceso de producción 13
1.3.1 Descripción detallada del proceso de producción 14
1.4 Balance de materia 16
1.5 Distribución de la planta 21
1.5.1 Almacenamiento y carga de metanol (A-100) 23
1.5.2 Reacción (A-200) 23
1.5.3 Separación y tratamiento de gases (A-300) 24
1.5.4 Almacenamiento y descarga de producto (A-400) 25
1.5.5 Zona de servicios auxiliares (A-500) 26
1.5.6 Instalaciones generales, logística y seguridad (A-600) 27
1.6 Balance de energía 28
1.7 Especificaciones y necesidades de servicios 29
1.7.1 Aceite térmico 30
1.7.2 Amoníaco líquido 30
1.7.3 Nitrógeno gas de inertización 30
1.7.4 Agua de proceso y de red 31
1.7.5 Sistema de agua contra incendios 31
1.7.6 Aire comprimido (Servicio e Instrumentos) 31
1.7.7 Energía eléctrica y transformación 31
1.7.8 Gas natural 32
1.8 Planificación temporal de construcción 32
1.9 Bibliografía 37

Capítulo 1. Especificaciones

1.1 Definición del proyecto

El presente proyecto tiene como objetivo el diseño conceptual y el cálculo básico de una planta industrial para la producción de formaldehído en disolución acuosa al 37 % en peso, estabilizada con metanol, a partir de metanol como materia prima. El trabajo se desarrolla en el marco de un Trabajo de Fin de Grado en Ingeniería Química y contempla las bases técnicas necesarias para evaluar la viabilidad de una instalación química de estas características.

El proceso seleccionado corresponde al proceso FORMOX, ampliamente utilizado a escala industrial, basado en la oxidación catalítica del metanol con aire para la obtención de formaldehído. El proceso incluye una etapa posterior de absorción gas-líquido mediante agua, en la que se recupera el formaldehído y se obtiene el producto comercial en forma de disolución acuosa.

1.1.1 Bases del proyecto

La planta del proyecto se ha creado para la obtención continua de formaldehído en disolución acuosa al 37 % en peso, utilizando como base el proceso industrial FORMOX y empleando metanol y aire como materias primas fundamentales. La instalación se plantea a escala industrial con el objetivo de suministrar un producto comercial con una concentración estable y unas características adecuadas para su posterior uso en la industria química, principalmente en la fabricación de resinas y productos intermedios.

El diseño del proyecto se apoya en la aplicación de tecnologías ampliamente implantadas en el sector químico, lo que permite asegurar una operación fiable, un control adecuado del proceso y una calidad constante del producto final. Se ha considerado un régimen de funcionamiento continuo, con operación durante las 24 horas del día a lo largo de 330 días al año, reservando el tiempo restante para paradas programadas destinadas a mantenimiento, inspección y ajustes operativos.

Dado que el proceso incluye el manejo de sustancias con un elevado grado de peligrosidad, como el metanol y el formaldehído, el planteamiento del diseño presta especial atención a los criterios de seguridad industrial. En este sentido, se adoptan condiciones de operación seguras y se contempla la implementación de sistemas de control básicos que permitan mantener estables las variables críticas del proceso, así como la correcta contención de los fluidos y la protección del entorno y del personal.

Desde el punto de vista del proceso, el proyecto se basa en alcanzar una alta conversión del metanol en la etapa de reacción, característica del proceso FORMOX, donde las conversiones superan habitualmente el 98 %, a diferencia de otros procesos alternativos como el de lecho de plata. Como consecuencia de esta elevada conversión, la cantidad de metanol residual presente

en la corriente gaseosa es reducida, por lo que, para cumplir los requisitos de estabilización de la formalina comercial al 37 %, se incorpora en el diseño una corriente de bypass de metanol que se añade directamente a la corriente líquida de salida del absorbedor, ajustando así la composición final del producto.

La recuperación del formaldehído se realiza mediante dos etapas de absorción gas-líquido con agua, que permite obtener de forma eficiente el producto comercial. En la primera etapa se recupera la mayor parte del formaldehído, y en la segunda se recupera una pequeña parte del producto, aunque necesaria para llegar a la concentración deseada.
Asimismo, el diseño de la planta se orienta hacia una operación eficiente y robusta, considerando la reducción de consumos energéticos y la minimización de pérdidas de materia prima. También se tienen en cuenta aspectos relacionados con la gestión de corrientes residuales y el control de emisiones, incorporando criterios básicos de sostenibilidad ambiental en el planteamiento global.
En términos generales, estas bases establecen el marco técnico y operativo del proyecto, definiendo los principios que guían las decisiones de diseño y cálculo desarrolladas en los capítulos posteriores de este Trabajo de Fin de Grado.

1.1.2 Alcance del proyecto

El alcance del proyecto incluye el desarrollo del diseño conceptual y del cálculo básico de una planta industrial para la producción de formaldehído en disolución acuosa al 37 % en peso, empleando el proceso industrial FORMOX como tecnología de referencia. El alcance se ha definido con el fin de establecer un marco técnico claro que permita describir el proceso, dimensionar las principales unidades de operación y analizar su funcionamiento global desde el punto de vista de la ingeniería química.
El proyecto se sitúa en el ámbito de la ingeniería básica, centrando su atención en el análisis del proceso productivo, en la aplicación de métodos teóricos de cálculo y en la adopción de criterios industriales aceptados. En ningún caso se pretende desarrollar un proyecto constructivo ni una ingeniería de detalle, sino proporcionar una base sólida que permita evaluar la viabilidad técnica del proceso y su desarrollo posterior.

1.1.2.1 Alcance del estudio del proceso

El proyecto incluye una descripción del proceso de producción de formaldehído, abarcando desde la entrada de las materias primas hasta la obtención del producto final. Este estudio identifica las etapas principales que conforman la tecnología FORMOX , así como el análisis de la reacción de oxidación catalítica del metanol con aire y la evaluación de las corrientes que contiene la instalación. Este desarrollo se expone de manera secuencial y coherente, detallando la función específica de cada operación unitaria dentro del conjunto de la planta. Así se garantiza una comprensión técnica y global del sistema operativo, manteniendo la descripción en el marco del diseño conceptual sin entrar en un nivel excesivo de detalle.

1.1.2.2 Alcance del balance de materia

La realización del balance de materia del proceso constituye la base fundamental para el cálculo y dimensionamiento de los equipos. Este análisis abarca de manera continua tanto las corrientes de alimentación de metanol y aire como el flujo de salida del reactor, identificando cuantitativamente el formaldehído, el agua, los gases inertes y el metanol residual. Asimismo, se integran las corrientes de entrada y salida de la etapa de absorción, la corriente final del producto comercial en disolución acuosa y la fracción gaseosa depurada. De este modo, el balance de materia permite determinar con precisión los caudales de cada componente del sistema, lo que valida la coherencia global del proceso y sirve como el punto de partida técnico para todos los desarrollos posteriores.

1.1.2.3 Alcance del diseño de equipos

El proyecto abarca el diseño conceptual y el dimensionamiento básico de los equipos principales que forman parte del proceso. En este sentido, el alcance contempla la selección del tipo de reactor y la definición de sus condiciones operativas a nivel teórico, el diseño de las unidades de separación gas-líquido y el diseño de los tanques de almacenamiento, entre otros equipos. Todos estos cálculos se desarrollan empleando metodologías y criterios clásicos de la ingeniería química, manteniendo el enfoque estrictamente en la ingeniería de proceso y excluyendo el desarrollo de detalles mecánicos o constructivos específicos de los equipos.

1.1.2.4 Alcance del estudio de control e instrumentación

El proyecto incluye también el planteamiento de los sistemas de control e instrumentación que son necesarios para que la planta funcione de manera segura y estable. Para ello, el estudio identifica las variables más importantes del proceso y establece los lazos básicos para controlar sobre todo la presión, la temperatura y el nivel en los equipos principales. Además, se incluye la creación de diagramas de tuberías e instrumentación (P&ID) para mostrar de forma visual el esquema de control que proponemos. Finalmente, hay que aclarar que no se van a realizar cálculos matemáticos complejos de control automático ni se van a elegir marcas o modelos concretos para los aparatos de medida, manteniendo de esta forma un nivel de profundidad que sea el adecuado y realista para un Trabajo de Fin de Grado.

1.1.2.5 Alcance en seguridad y operación

El proyecto contempla los aspectos de seguridad asociados al proceso, teniendo muy en cuenta el tipo de sustancias que se manejan. Dentro de este apartado, el trabajo se centra en identificar los principales riesgos que conllevan el uso de metanol y formaldehído, y en plantear unas condiciones de operación que sean lo más moderadas posibles para minimizar cualquier peligro. También se van a tener en cuenta los sistemas básicos de alivio y control de la presión

en la planta, así como las medidas necesarias para reducir al máximo las emisiones de formaldehído hacia la atmósfera.

1.1.2.6 Alcance de los servicios auxiliares

También se van a definir cuáles son los servicios auxiliares que la planta necesita para poder funcionar en el día a día. En concreto, se van a listar y describir brevemente recursos clave como el suministro de energía eléctrica, el gas natural, el agua de proceso y de red, el sistema de agua contra incendios, el aire comprimido, el nitrógeno para inertizar y los fluidos que de intercambio de calor. Hay que tener claro que el diseño técnico y detallado de todas estas instalaciones no forma parte de este Trabajo de Fin de Grado, por lo que únicamente se identificarán qué servicios hacen falta y justificarán para qué y cómo se utilizan dentro de la instalación.

1.1.2.7 Exclusiones del alcance

Con el fin de delimitar claramente el trabajo desarrollado, se especifica que no forman parte del alcance del proyecto:

- El diseño mecánico detallado de equipos.
- El cálculo estructural y de obra civil.
- El estudio económico completo de la planta.
- La evaluación ambiental cuantitativa.
- La planificación de la construcción y puesta en marcha.

1.1.3 Localización de la planta

La planta se ubica en el polígono industrial ficticio “Satèl·lits”, en el término municipal de tarragona. Concretamente se encuentra en el Pol Petroquímic, una localización representativa de un entorno industrial con acceso a materias primas, infraestructuras energéticas y redes de transporte. La parcela queda delimitada por las calles de Europa, de Titán y de Deimos.

El municipio de Tarragona [6] abarca 57.9 km2 y tiene una densidad de población de 2475 habitantes por km2, con una población estimada de 143260 habitantes en 2025. Cabe mencionar que Tarragona es una localidad costera, por lo que si aire del ambiente presenta cierta salinidad que puede llegar a corroer o deteriorar con mayor rapidez ciertos materiales. Debido a estas condiciones de la localidad y al manejo de ciertos productos peligrosos y/o corrosivos se ha decidido fabricar los equipos de la planta con AISI 316L.

En las siguientes figuras se muestra la ubicación del término municipal de Tarragona dentro del Tarragonés, y también la ubicación de la comarca en Cataluña.



Figura 1.1.1. Área del municipio de Tarragona en la comarca de Tarragona



Figura 1.1.2. Ubicación de la comarca de Tarragona en Cataluña

1.1.3.1 Parámetros de edificación de la planta y plano de la parcela

La parcela donde se edificará la planta de producción de formol es la que se puede ver en la siguiente figura. Cuenta con 53720 m^2.

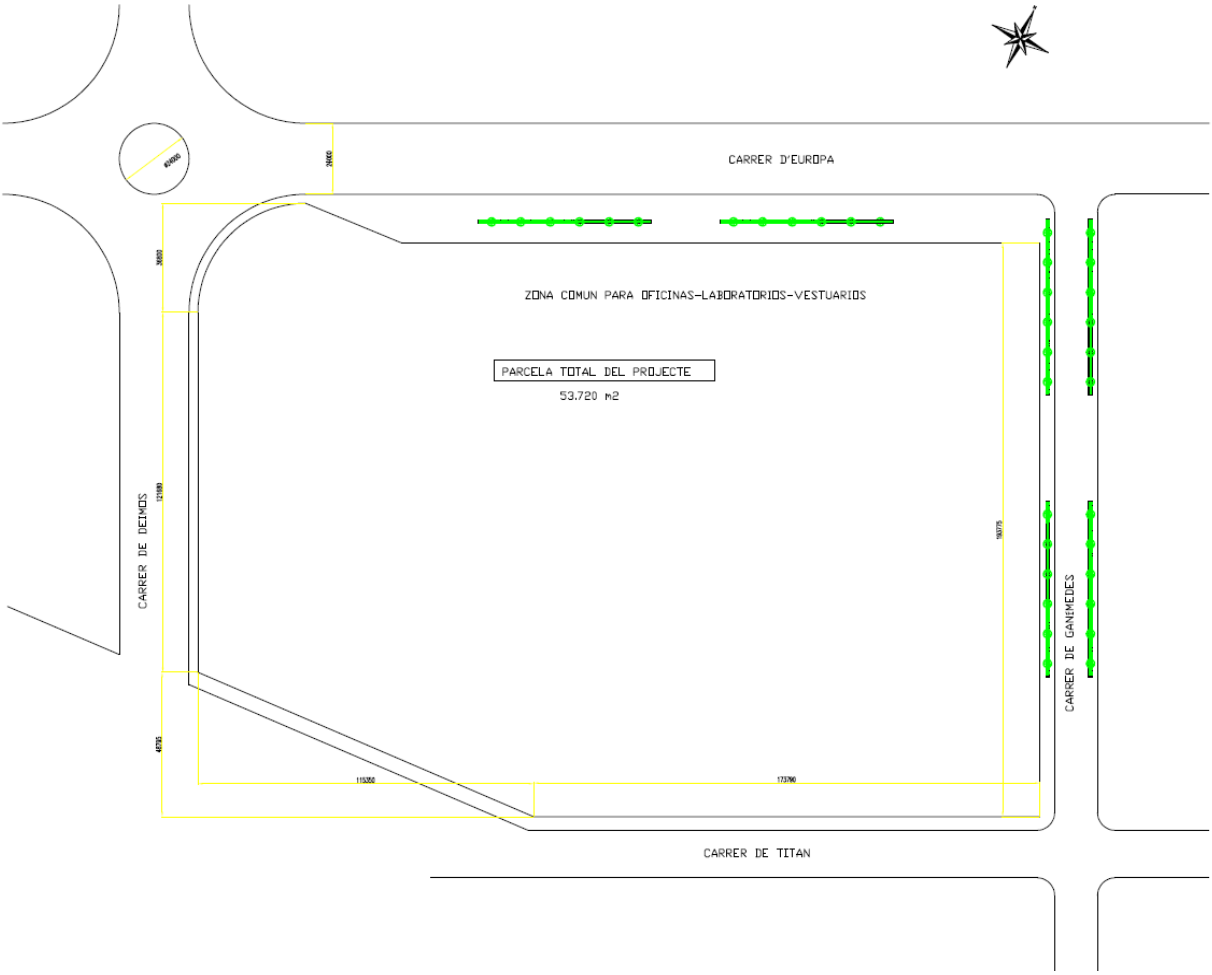


Figura 1.1.3. Plano de la parcela

En este polígono industrial hay una normativa urbanística que incluye ciertos parámetros de edificación que hay que cumplir. Estas restricciones obligatorias se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 1.1.1. Parámetros de edificación de la parcela

Parámetros de edificación	
EDIFICABILIDAD	1,5 m^2 TECHO/m^2 SUELO
OCUPACIÓN MÁXIMA DE PARCELA	75%
OCUPACION MINIMA DE PARCELA	20% DE LA SUPERFICIE DE OCUPACIÓN MÁXIMA
RETRANQUEOS	5 m A VIALES Y VECINOS
ALTURA MÁXIMA	6 m Y 3 PLANTAS EXCEPTO EN PRODUCCIÓN JUSTIFICANDO LA NECESIDAD POR EL PROCESO
ALTURA MÍNIMA	4 m Y 1 PLANTA
APARCAMIENTOS	1 plaza/150 m^2 CONSTRUIDOS
DISTANCIA ENTRE EDIFICIOS	1/3 DEL EDIFICIO MÁS ALTO CON UN MÍNIMO DE 5 m

Para cumplir con los siguientes parámetros se ha determinado una zona de proceso de 10400 m², llegando así a la superficie de ocupación mínima de la parcela.

1.1.3.2 Servicios disponibles de la planta

Para el correcto funcionamiento de la planta se requiere de una serie de servicios. Estos son servicios esenciales y son equivalentes a los del resto de instalaciones que se ubican en este mismo polígono industrial. En la tabla 1.2 se encuentran recogidas las características de estos servicios.

Tabla 1.1.2. Servicios disponibles de la planta

Servicios	
Energía eléctrica	Conexión desde la línea de 20 kV a pie de parcela, hay que prever una estación transformadora
Gas natural	Conexión a pie de parcela a media presión (1.5 kg/cm²)
Agua de incendios	La máxima presión es de 4 kg/cm², hay que diseñar una estación de bombeo y reserva de agua
Agua de red	Acometida a pie de parcela a 4 kg/cm² con un diámetro de 200 mm
Terreno	Resistencia del terreno de 2 kg/cm² a 1.5 m de profundidad sobre gravas
Alcantarillado	Red unitaria al centro de la calle a una profundidad de 3,5 m (diámetro del colector de 800 mm)

1.1.3.3 Evaluación de las comunicaciones y accesibilidad a la planta

La evaluación de las vías de comunicación y la accesibilidad de la planta constituye un factor fundamental para el diseño del proyecto. Se busca optimizar la ubicación para tener la mejor eficiencia operativa y logística. Una mala decisión puede repercutir gravemente en la rentabilidad económica y en los tiempos de operación, factores muy importantes para la empresa.

Debido a la naturaleza de la industria química, no es aconsejable almacenar volúmenes excesivos de sustancias peligrosas en la parcela. Esto resulta en un flujo continuo de entrada de materias primeras para el proceso, y una salida constante de producto. Esto requiere una red de transporte eficiente que facilite el suministro de los proveedores externos y garantice la correcta distribución del formol hacia los clientes. Además, disponer de unos accesos despejados y bien comunicados es clave para la gestión diaria, el tránsito de trabajadores y facilitar el trabajo a los equipos de emergencias.

Ubicada en el Complejo Petroquímico de Tarragona, la planta se beneficia de un entorno industrial para dar soporte a las instalaciones de producción. Esta localización estratégica se sitúa a unos 8 km de Reus, y a unos 100 km del área metropolitana de Barcelona.

A continuación, se detallan los principales medios de transporte proporcionan a Formics una muy buena conectividad.

1.1.3.3.1 Comunicación terrestre

Tarragona dispone de varias vías de transporte importantes, tales como la autopista AP-7 y la autovía A-7, que comunican directamente con el área metropolitana de Barcelona y se extienden hacia el sur de la península. Por estas vías transita gran parte del tráfico de mercancías que se dirige o proviene del resto de Europa siguiendo el litoral. Esta ubicación cuenta también con acceso a la autopista A-2, que llega a Madrid y otros sitios extendiéndose por la península.

En cuanto al acceso ferroviario, la zona goza de una situación privilegiada gracias a la estación de mercancías, la cual tiene una conexión directa con el Puerto de Tarragona. Esto permite transportar materias hacia otras zonas industriales como Zaragoza, Valencia, Madrid y Barcelona, además de enlazar con el mercado internacional siguiendo el Mediterráneo. A diferencia de otras ubicaciones con redes limitadas, esta doble vía de transporte garantiza poder soportar la alta carga de trabajo de la planta química, mientras que la red de cercanías y los trenes AVE aseguran la movilidad rápida del personal ante cualquier imprevisto o urgencia.

1.1.3.3.2 Comunicación marítima

La proximidad geográfica de la parcela al Port de Tarragona dota a la instalación de una ventaja competitiva, consolidándose como la infraestructura logística más relevante para la viabilidad global del proyecto. El Port de Tarragona es uno de los nodos marítimos e industriales más importantes del mar Mediterráneo, y está especialmente preparado para el tráfico de productos petroquímicos.

Este acceso marítimo directo resulta crucial para la viabilidad de la planta tanto en importación como en exportación:

Importación: Permite el suministro continuo de metanol mediante buques directamente desde los principales centros de producción internacionales, minimizando los costes en comparación con el transporte terrestre a larga distancia.

Exportación: Facilita la distribución a gran escala de la disolución acuosa del formol al 37% hacia mercados internacionales del sur de Europa, norte de África y América, permitiendo a Formics diversificar su cartera de clientes más allá de las fronteras nacionales sin estar tan restringidos por las limitaciones de carga del transporte por carretera.

1.1.3.3.3 Comunicación aérea

La comunicación aérea es la menos importante para Formics ya que el transporte de materiales por vía aérea está descartado debido a los elevados volúmenes y características de peligrosidad del metanol y el formol. Aun así, la infraestructura aérea de los alrededores aporta valor en términos de gestión, soporte técnico y relaciones comerciales. Tarragona cuenta con dos aeropuertos cercanos para cumplir con estas necesidades.

Aeropuerto de Reus: Situado a 11 kilómetros de la instalación, ofrece una conectividad rápida y de proximidad.

Aeropuerto de Barcelona-El Prat: Ubicado a unos 90 kilómetros, es uno de los principales centros de conexión aérea de Europa. Este aeropuerto asegura un canal directo para la llegada de inversores extranjeros, proveedores internacionales de tecnología química y la recepción urgente de repuestos críticos que no puedan esperar al transporte terrestre.

1.2 Características de los reactivos y del producto

En este apartado se describen las principales características físicas, químicas y de seguridad de las materias primas empleadas en el proceso y del producto obtenido. Esta información resulta fundamental para la definición de las condiciones de operación, la selección de materiales de los equipos y el planteamiento de los criterios básicos de seguridad y control de la planta.

1.2.1 Metanol

El metanol [1] es la materia prima principal del proceso FORMOX y actúa como precursor directo del formaldehído. Desde el punto de vista molecular, el metanol es el alcohol alifático más simple, con fórmula química CH_3OH, formado por un grupo metilo unido a un grupo hidroxilo. En la figura X se puede observar su estructura molecular.

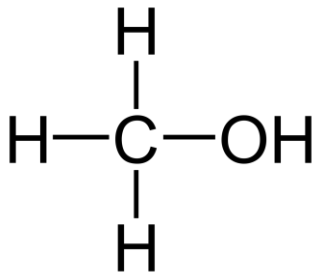


Figura 1.2.1. Estructura molecular del metanol

La presencia del grupo hidroxilo confiere al metanol una elevada polaridad y la capacidad de formar enlaces de hidrógeno, lo que explica su completa miscibilidad con el agua y su

comportamiento como disolvente polar. Estas características resultan ventajosas tanto para su vaporización previa a la reacción como para su posterior presencia como estabilizante en las disoluciones acuosas de formaldehído.

En el proceso FORMOX, el metanol se oxida catalíticamente con aire para dar lugar al formaldehído y agua. La estructura molecular del metanol facilita esta transformación, ya que la ruptura del enlace C–O y la posterior oxidación parcial conducen a la formación del grupo carbonilo característico del formaldehído. La elevada reactividad del metanol frente al oxígeno en presencia de catalizadores metálicos oxídicos es uno de los factores que permite alcanzar altas conversiones, superiores al 98 %.

Además de su función como reactivo, el metanol desempeña un papel importante como agente estabilizante del producto final. En disoluciones acuosas de formaldehído con concentraciones elevadas, la presencia de metanol inhibe la polimerización del formaldehído, contribuyendo a la estabilidad de la formalina comercial.

Tabla 1.2.1. Algunas propiedades físicas del metanol

Propiedad	Valor
Fórmula	CH_3OH
Peso molecular (g/mol)	32.04
Densidad (g/cm³) a 20 °C	0.7928
Presión de vapor (kPa) a 20 °C	12.8
Punto de fusión (°C) a 1 atm	-97.6
Punto de ebullición (°C) a 1 atm	64.7
Viscosidad dinámica (cP) a 20 °C	0.59

1.2.2 Agua

El agua [2] se utiliza en el proceso principalmente como agente absorbente del formaldehído en la columna de absorción. La molécula de agua, con su estructura angular y elevada polaridad, presenta una gran facilidad para interaccionar con el formaldehído mediante enlaces de hidrógeno. En la Figura 1.2.2. se puede observar su estructura molecular.

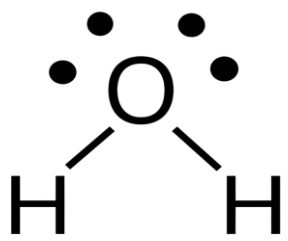


Figura 1.2.2. Estructura molecular del agua

Desde el punto de vista químico, el formaldehído no permanece mayoritariamente en forma monomérica cuando se disuelve en agua, sino que reacciona formando metilenglicol (HO–CH_2–OH) y sus oligómeros. Este comportamiento constituye la base de la elevada solubilidad del formaldehído en agua.

La disolución del formaldehído en agua es, además, un proceso exotérmico, lo que se tiene en cuenta en el diseño térmico de los equipos y en la necesidad de controlar la temperatura de operación.

Tabla 1.2.2. Algunas propiedades físicas del agua

Propiedad	Valor
Fórmula	H_2O
Peso molecular (g/mol)	18.02
Densidad (g/cm³) a 20 °C	0.998
Presión de vapor (kPa) a 20 °C	2.34
Punto de fusión (°C) a 1 atm	0
Punto de ebullición (°C) a 1 atm	100
Viscosidad dinámica (cP) a 20 °C	1

1.2.3 Aire

El aire se emplea como fuente de oxígeno para la reacción de oxidación del metanol. Desde el punto de vista químico, el aire se considera una mezcla gaseosa constituida mayoritariamente por nitrógeno (N_2) y oxígeno (O_2).

El oxígeno [4] es el agente oxidante del proceso y participa directamente en la reacción química que transforma el metanol en formaldehído. Su estructura molecular diatómica y su elevada electronegatividad permiten la transferencia de oxígeno en la superficie del catalizador, favoreciendo la formación del grupo carbonilo del formaldehído. En el proceso FORMOX se trabaja con exceso de aire para asegurar una elevada conversión del metanol y un control térmico adecuado de la reacción.

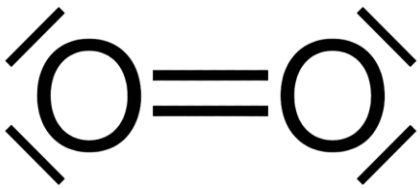


Figura 1.2.3. Estructura molecular del oxígeno

Tabla 1.2.3. Algunas propiedades físicas del oxígeno

Propiedad	Valor
Fórmula	O_2
Peso molecular (g/mol)	32
Densidad (kg/m³) a 20 °C y 1 atm	1.33
Punto de fusión (°C)	-219
Punto de ebullición (°C) a 1 atm	-183
Inflamabilidad	No inflamable (comburente)

El nitrógeno [3], por su parte, actúa como componente inerte. Su estructura diatómica con un enlace triple muy estable lo convierte en un gas químicamente poco reactivo bajo las condiciones del proceso. La función principal del nitrógeno es diluir la mezcla de reacción, contribuyendo a la seguridad del proceso y al control de la temperatura. Sin embargo, su presencia implica caudales elevados de gas que deben ser tratados posteriormente en la etapa de absorción.



Figura 1.2.4. Estructura molecular del nitrógeno

Tabla 1.2.4. Algunas propiedades físicas del nitrógeno

Propiedad	Valor
Fórmula	N_2
Peso molecular (g/mol)	28.01
Densidad (kg/m³) a 20 °C y 1 atm	1.18
Punto de fusión (°C)	-210
Punto de ebullición (°C) a 1 atm	-196
Inflamabilidad	No inflamable

1.2.4 Formaldehído

El formaldehído [5] es el producto principal del proceso y presenta una estructura molecular sencilla, con fórmula CH_2O, caracterizada por la presencia de un grupo carbonilo altamente reactivo. En condiciones normales, el formaldehído monomérico es un gas incoloro con fuerte olor irritante, extremadamente reactivo y con una marcada tendencia a polimerizar.

Debido a esta elevada reactividad, el formaldehído no se maneja ni comercializa en estado puro, sino principalmente en forma de disolución acuosa, conocida como formalina o formol. Según se describe en Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, en disoluciones acuosas el formaldehído se encuentra mayoritariamente en forma de metilenglicol y de polioximetileno de bajo peso molecular, siendo la fracción de formaldehído libre muy reducida.

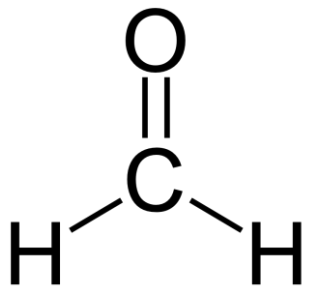


Figura 1.2.5. Estructura molecular del formaldehído

Para evitar la formación de polímeros insolubles durante el almacenamiento, las disoluciones comerciales de formaldehído contienen metanol como estabilizante, típicamente en concentraciones del orden del 5–15 % en peso según la formulación. La presencia de metanol modifica el equilibrio químico en disolución y reduce la velocidad de polimerización del formaldehído, garantizando la estabilidad del producto final.

La elevada reactividad del formaldehído justifica tanto su importancia industrial como las precauciones necesarias en su manipulación, almacenamiento y diseño del proceso, aspectos que se consideran de forma preliminar en el presente proyecto.

Tabla 1.2.5. Algunas propiedades físicas del formaldehído

Propiedad	Valor
Fórmula	CH_2O
Peso molecular (g/mol)	30.03
Densidad (gas, aire=1)	1.04
Presión de vapor (kPa a 20 °C)	Muy elevada (gas)
Punto de fusión (°C)	-92
Punto de ebullición (°C)	-19.2
Límites de explosividad (% vol)	7 – 72

1.3 Descripción general del proceso de producción

Para entender correctamente el funcionamiento de la planta Formics para obtener formol al 37% en peso con el proceso FORMOX, a continuación, se expone el diagrama de bloques y de proceso correspondientes a la planta. El objetivo de estos esquemas es proporcionar una simplificación visual del proceso para la obtención de la formalina comercial, pasando por las operaciones unitarias principales que intervienen en el proceso.

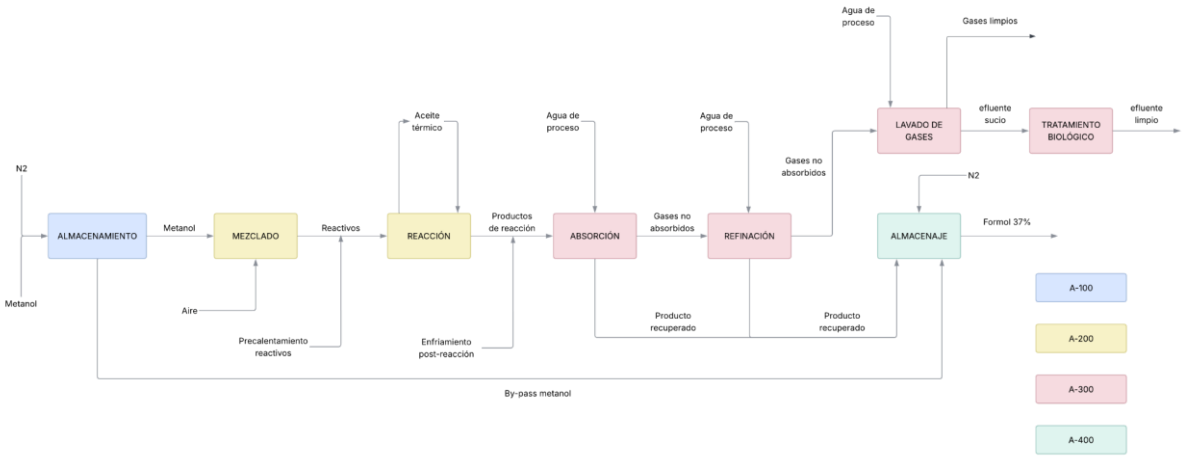


Figura 1.3.1. Diagrama de bloques del proceso

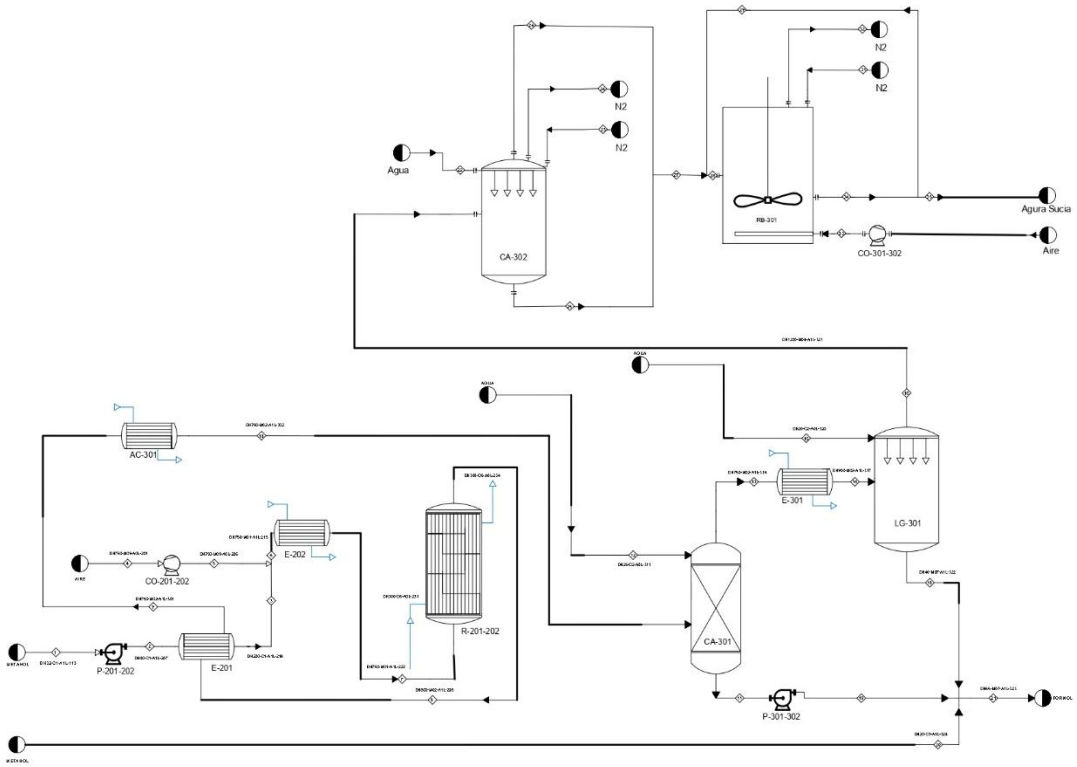


Figura 1.3.2. Diagrama proceso de la planta

1.3.1 Descripción detallada del proceso de producción

El proceso se inicia con los dos reactivos que se requieren para la obtención de formol; el metanol y el oxígeno. El metanol llega a la planta con un suministro continuo de camiones cisterna que llegan a la planta, y se almacena en cuatro tanques de almacenamiento distintos. Estos tanques están conectados a una red de nitrógeno que permite garantizar inertidad y mantener la presión constante dentro de los tanques. El oxígeno necesario para la reacción se

obtiene directamente del aire atmosférico. Este aire es aspirado y presurizado mediante un compresor centrífugo para vencer todas las pérdidas de carga del circuito.

Para que la reacción catalítica se produzca de forma óptima, los reactivos deben encontrarse en fase gaseosa. Por ello, el metanol líquido se bombea hacia un intercambiador de calor donde se precalienta y evapora en su totalidad. Luego, estas dos corrientes de vapor de metanol y de aire comprimido convergen en un mezclador estático. Este equipo, mediante turbulencia mecánica interna y sin partes móviles, garantiza una homogeneidad perfecta de la mezcla reactiva, evitando la existencia de zonas con mayor concentración de metanol que pudieran generar puntos calientes descontrolados en el reactor o entrar en el rango de inflamabilidad.

Una vez homogeneizada, la corriente gaseosa se dirige hacia otro intercambiador de calor. En este punto, la mezcla fría de alimentación se precalienta significativamente aprovechando la alta energía térmica que se reaprovecha de los gases que salen de los reactores. Esta integración de corrientes reduce drásticamente el consumo de servicios auxiliares externos, maximizando la eficiencia energética global del complejo.

Tras alcanzar la temperatura deseada, la mezcla gaseosa penetra en el núcleo del proceso: los dos reactores principales de oxidación. Cada uno es un reactor multitubular de lecho fijo que opera bajo condiciones isotérmicas. Para gestionar la cantidad de calor que se genera en la una reacción tan exotérmica, por el lado de la carcasa circula de manera continua un aceite térmico que absorbe y retira el calor generado. En el interior de los tubos se dispone el catalizador sólido que se ha seleccionado para este proceso. Se trata de un catalizador comercial sólido de óxidos metálicos, compuesto específicamente por hierro y molibdeno. Este catalizador presenta una alta selectividad hacia la formación de formaldehído y cuenta con una estructura física caracterizada por un área superficial de 6 m^2/g y una porosidad de 0,55. Gracias a estas propiedades, y a un control riguroso de la temperatura para proteger la capa superficial de molibdeno, se logra evitar la degradación del catalizador y minimizar al máximo las reacciones secundarias indeseadas que generan subproductos como el monóxido de carbono y el dióxido de carbono. De este modo, operando con un tiempo de residencia extremadamente corto en los tubos de 0,576 s, el sistema asegura una conversión del metanol del 97,96 %.

Al abandonar los reactores, la corriente de gases calientes atraviesa nuevamente el intercambiador de calor anteriormente mencionado, cediendo su energía a la alimentación fresca y experimentando un primer descenso de temperatura. Seguidamente, para terminar de adecuar la corriente antes de las etapas de separación, el gas se introduce en un aerorefrigerador. Este equipo emplea tiro forzado de aire ambiental mediante ventiladores para abatir rápidamente la temperatura de la mezcla, un paso fundamental para evitar la degradación térmica del formaldehído recién formado y favorecer a la absorción del formaldehído.

A continuación, los gases ya enfriados penetran por la zona inferior de la columna de absorción principal. En esta operación el gas asciende de forma continua y a contracorriente, cruzándose con un flujo descendente de agua. Al entrar en contacto, el formaldehído se transfiere eficientemente desde la corriente gaseosa hacia la fase líquida gracias a su alta solubilidad en agua. De este modo, se logra retener el producto y obtener la disolución acuosa concentrada

que se extrae por el fondo del equipo. Los gases residuales que no han sido retenidos y que escapan por la cabeza del absorbedor pasan a través de un *cooler* para ajustar su temperatura antes de entrar a un primer *scrubber* o columna de lavado. Este primer *scrubber* actúa como una etapa de afinamiento que permite recuperar una fracción extra de formaldehído, maximizando así el rendimiento másico global de la planta.

Los gases de cola remanentes tras la etapa de absorción se derivan hacia un segundo *scrubber*. En este equipo, los compuestos orgánicos volátiles residuales son transferidos a la fase líquida gracias a su elevada solubilidad en agua, permitiendo emitir por la cabeza de la columna una corriente gaseosa totalmente limpia y exenta de toxicidad hacia la atmósfera. Por su parte, para evitar la acumulación de contaminantes, una fracción de la corriente acuosa de este *scrubber* se purga de forma continua y se conduce hacia un reactor biológico aerobio. En este sistema, microorganismos especializados degradan biológicamente el formaldehído y el metanol disueltos utilizándolos como fuente de carbono. Esta solución biotecnológica se alinea perfectamente con las Mejores Técnicas Disponibles a nivel medioambiental para el tratamiento de efluentes residuales.

En la etapa final del proceso, el flujo líquido altamente concentrado que se extrae por el fondo del absorbedor principal se unifica con la corriente de producto recuperada en el fondo del primer *scrubber*. Debido a la eficiencia casi total del proceso catalítico FORMOX, esta disolución acuosa cruda carece prácticamente de metanol residual. Sin este alcohol, el formaldehído en alta concentración es altamente inestable y tiende a polimerizar espontáneamente a temperatura ambiente, precipitando en forma de paraformaldehído sólido. Para evitar este fenómeno, alcanzar las especificaciones comerciales de la formalina al 37% en peso y garantizar su estabilidad a largo plazo, la corriente unificada se somete a una dosificación precisa con un *bypass* de metanol puro, que actúa como inhibidor de la polimerización. Finalmente, este producto comercial estabilizado se bombea hacia los tanques de almacenamiento de producto. Al igual que en la recepción de materias primas, estos tanques operan bajo una red de inertización de nitrógeno, garantizando la preservación de la calidad del formol.

1.4 Balance de materia

La realización del balance de materia constituye la base fundamental sobre la que se sustenta el cálculo y el dimensionamiento conceptual de todos los equipos de nuestra planta. En este apartado detallamos y analizamos la masa que entra, se transforma y sale de nuestro sistema.

El objetivo principal de este balance es cuantificar de forma rigurosa los caudales másicos y molares de cada componente para asegurar la coherencia técnica de nuestra simulación. Este análisis abarca la totalidad del proceso: desde las corrientes de alimentación de materias primas (metanol y aire) , pasando por la salida de los reactores y las corrientes del absorbedor , hasta llegar a la corriente de nuestro producto final en disolución y la emisión de los gases depurados.

A continuación se presentan las tablas con la información correspondiente de todas las corrientes de la planta, para el posterior análisis.

Tabla 1.4.1. Caracterización de los corrientes 1-12

Corriente	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Fracción de Vapor	0.00	1.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.90	0.00	0.00	1.00	1.00
Temperatura (ºC)	59.08	156.27	54.76	10.00	8.51	9.77	28.43	9.76	25.00	28.20	247.44	25.00
Presión (bar)	1.60	1.65	1.50	1.01	1.10	1.40	1.40	1.35	1.01	1.01	1.82	1.01
Flujo molar (kmol/h)	209.65	2649.75	2606.62	105.47	2344.22	367.86	577.52	2606.62	29.96	607.48	2649.70	2280.60
Flujo másico (kg/h)	4972.37	74610.00	72637.63	1900.00	67128.62	7409.01	12381.38	72637.63	960.03	13341.40	74610.00	65795.93
Flujo volumétrico (m3/h)	5.96	13191.32	12745.49	287.39	11815.81	1217.07	2116.68	12745.49	182.13	2298.81	13191.37	11481.67
Fracciones molares												
Metanol	0.0000	0.0013	0.0013	0.0000	0.0014	0.0005	0.0003	0.0013	1.0000	0.0496	0.0013	0.0000
Nitrógeno	0.0001	0.7155	0.7273	0.0000	0.8087	0.0000	0.0001	0.7273	0.0000	0.0001	0.7155	0.7900
Oxígeno	0.0000	0.1592	0.1618	0.0000	0.1799	0.0000	0.0000	0.1618	0.0000	0.0000	0.1592	0.2100
Formaldehído	0.4746	0.0620	0.0249	0.0000	0.0000	0.1764	0.2846	0.0249	0.0000	0.2706	0.0620	0.0000
Agua	0.5252	0.0620	0.0847	1.0000	0.0100	0.8231	0.7150	0.0847	0.0000	0.6797	0.0620	0.0000

Tabla 1.4.2. Caracterización de los corrientes 13-24

Corriente	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Fracción de Vapor	0.00	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	1.00	1.00
Temperatura (ºC)	25.00	140.31	25.06	148.22	241.85	240.96	210.08	257.37	257.37	216.85	120.41	66.00
Presión (bar)	1.01	2.50	2.20	2.17	2.03	3.55	2.17	45.00	45.00	3.55	1.93	1.55
Flujo molar (kmol/h)	159.66	2280.60	159.66	2440.26	2440.00	3006.00	159.66	235.80	235.80	3006.00	599.39	2649.75
Flujo másico (kg/h)	5115.81	65795.93	5115.81	70911.74	70904.30	497943.92	5115.81	4248.00	4248.00	497943.92	10798.00	74610.00
Flujo volumétrico (m3/h)	6.43	76.05	6.43	82.48	82.47	473.81	6.43	4.26	4.26	473.81	10.82	87.38
Fracciones molares												
Metanol	1.0000	0.0000	1.0000	0.0654	0.0654	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0013
Nitrógeno	0.0000	0.7900	0.0000	0.7383	0.7383	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.7155
Oxígeno	0.0000	0.2100	0.0000	0.1963	0.1963	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1592
Formaldehído	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0620
Agua	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	1.0000	0.0000	1.0000	0.0620

Tabla 1.4.3. Caracterización de los corrientes 25-36

Corriente	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
Fracción de Vapor	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Temperatura (ºC)	25.00	25.00	25.00	25.00	25.01	25.01	25.01	25.41	245.00	39.67	40.59	104.81
Presión (bar)	1.01	1.01	1.01	1.01	2.03	2.03	2.03	45.00	45.00	45.00	1.20	1.20
Flujo molar (kmol/h)	1107.18	704.85	166.53	235.80	704.85	105.47	599.39	235.80	235.80	235.80	235.80	599.39
Flujo másico (kg/h)	19946.00	12698.00	3000.00	4248.00	12698.00	1900.00	10798.00	4248.00	4248.00	4248.00	4248.00	10798.00
Flujo volumétrico (m3/h)	19.98	12.72	3.01	4.26	12.72	1.90	10.82	4.26	4.26	4.26	4.26	10.82
Fracciones molares												
Metanol	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Nitrógeno	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Oxígeno	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Formaldehído	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Agua	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000

Tabla 1.4.4. Caracterización de los corrientes 37-39

Corriente	37	38	39
Fracción de Vapor	0.00	0.00	0.00
Temperatura (ºC)	86.64	25.00	25.00
Presión (bar)	1.20	1.01	1.01
Flujo molar (kmol/h)	835.19	835.19	271.99
Flujo másico (kg/h)	15046.00	15046.00	4900.00
Flujo volumétrico (m3/h)	15.08	15.08	4.91
Fracciones molares			
Metanol	0.0000	0.0000	0.0000
Nitrógeno	0.0000	0.0000	0.0000
Oxígeno	0.0000	0.0000	0.0000
Formaldehído	0.0000	0.0000	0.0000
Agua	1.0000	1.0000	1.0000

Una vez definidas y caracterizadas todas las corrientes del proceso, hay que comprobar el balance de materia global de la planta. El objetivo de este cálculo es demostrar matemáticamente que se cumple el principio de conservación de la masa, verificando que la masa que entra y sale del sistema es la misma.

Según nuestro planteamiento, las corrientes principales que delimitan el proceso son cuatro entradas y dos salidas. Como entradas fijadas tenemos el aire de la corriente 12, el metanol principal de la corriente 13, el metanol en bypass de la corriente 9 y el aporte de agua de proceso agrupando las corrientes 39 y 27. Por otra parte, las salidas definitivas de la planta son el formol al 37% de la corriente 10 y el gas que se dirige al tratamiento biológico de la corriente 5. Si cogemos los números exactos de los flujos másicos en kg/h de nuestras tablas y hacemos las operaciones, los resultados son los siguientes.

Por el lado de las entradas, la suma de las corrientes 9, 12, 13, 39 y 27 nos da un total de materia entrante de 79771.77 kg/h. Por el lado de las salidas, la suma de la corriente 10 y la corriente 5 nos da un total de masa saliente de 80470.02 kg/h.

Al comparar resultados, observamos un flujo masivo de aproximadamente 80.000 kg/h atravesando la planta, con una pequeña diferencia de apenas 698 kg/h entre las entradas y las salidas. Esta pequeña desviación, que representa menos de un 0,9 % del caudal total, queda justificada por tolerancias numéricas que aplica el propio simulador al realizar los cálculos iterativos, lo que nos permite validar de forma satisfactoria la coherencia de nuestro balance de materia global.

1.5 Distribución de la planta

Para diseñar la distribución en planta de FORMICS, se han tenido en cuenta tanto los requisitos del proceso productivo como el cumplimiento de la normativa de seguridad industrial. Concretamente, a la hora de ubicar los equipos y separar las distintas áreas, el diseño se ha basado en el Real Decreto 656/2017 (Reglamento de Almacenamiento de Productos Químicos) y en el Real Decreto 2267/2004 (Reglamento de seguridad contra incendios en los establecimientos industriales).

El concepto principal del plano es separar claramente las áreas de proceso, donde se manejan fluidos inflamables o tóxicos (zonas clasificadas con riesgo de explosión o ATEX), de las zonas destinadas a servicios y oficinas, que se consideran áreas seguras o libres de riesgo.

En la Tabla 1.5.1 se muestran las diferentes áreas en las que se ha dividido la instalación, y seguidamente se puede ver también el plano de la planta para ver la distribución visual de las zonas que se mencionan.

Tabla 1.5.1. Áreas que constituyen la planta

Área	Nomenclatura
Almacenamiento y carga de metanol	A-100
Reacción	A-200
Separación y tratamiento de gases	A-300
Almacenamiento y descarga de producto	A-400
Zona de servicios	A-500
Zona de soporte y trabajadores	A-600

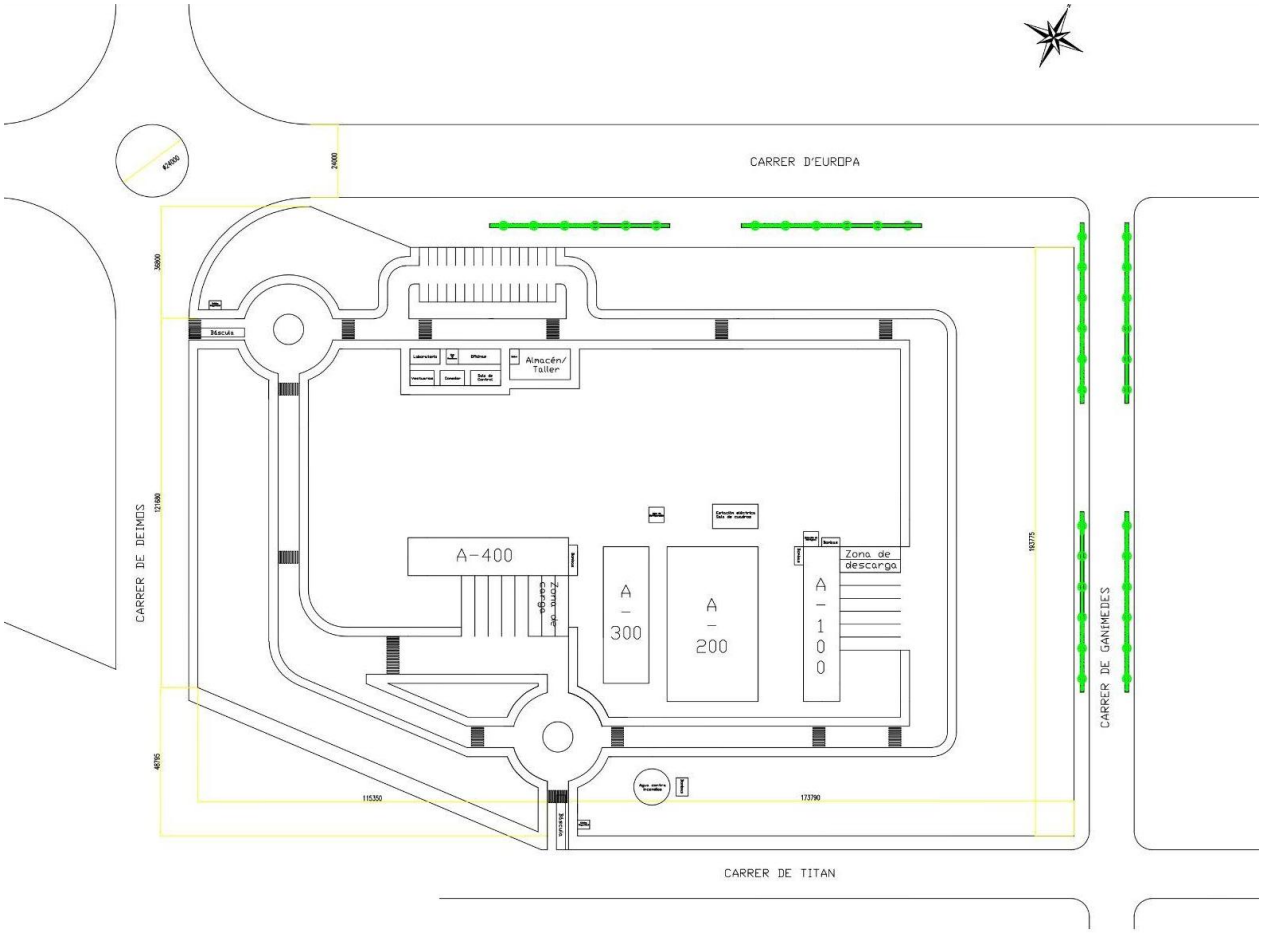


Figura 1.5.1. Plano 2D de la distribución de la planta

Las diferentes áreas de la planta se pueden clasificar en bloques que las engloban en diferentes grupos, según la función de soporte o transformación que cumplen en el día a día de la instalación:

Área de producción: Forman parte las áreas A-100, A-200, A-300 y A-400. En este bloque se da todo el proceso de transformación de las materias primas en el producto comercial final. Comprende desde la recepción y bombeo de la línea de alimentación, pasando por la compresión y la transformación catalítica en fase gas, hasta la absorción y lavado de la mezcla con su posterior ajuste químico de la disolución de formalina al 37%. Estas zonas comparten un alto riesgo de incendio o toxicidad y operan bajo clasificaciones ATEX.

Área complementaria al proceso: Forma parte el área A-500. Reúne todas las utilidades industriales y sistemas de distribución de fluidos de servicio que, aunque no forman parte de la reacción química principal, son indispensables para mantener las condiciones térmicas, de presión y de seguridad de la planta de producción.

Área de soporte y trabajadores: Se constituye por el área A-600. Este bloque agrupa todas las infraestructuras civiles y edificaciones de la planta. Su función es dar soporte técnico a la fabricación mediante el control centralizado de variables, el análisis químico de muestras de control de calidad y la ejecución de tareas de mantenimiento mecánico. También incluye los

espacios destinados a la gestión administrativa de la empresa y a cubrir las necesidades de higiene y descanso de la plantilla.

A continuación, se detalla qué equipos forman cada área y el porqué de su diseño.

1.5.1 Almacenamiento y carga de metanol (A-100)

El objetivo de esta zona es recibir el metanol, almacenarlo de forma segura y bombearlo hacia los reactores. Al tratarse de la entrada de materias primas, se ha ubicado en el perímetro de la parcela para que los camiones cisterna puedan maniobrar fácilmente.

Para el almacenamiento se ha diseñado un parque con cuatro tanques (T-101 a T-104) diseñados según la norma API 650. Tienen un diámetro de 8,45 metros y una altura de 10,12 metros. Para cumplir con la ley de almacenamiento de productos químicos (MIE APQ-1), están colocados dentro de un cubeto de retención de hormigón. Este cubeto sirve para que, si hay una fuga o se rompe un tanque, el líquido no se derrame por la planta. Además, como el metanol es muy inflamable, los tanques tienen una red de nitrógeno que mantiene su interior a una presión constante de 0,68 bar para evitar que se formen atmósferas explosivas.

En esta misma área se encuentran las plataformas logísticas donde los camiones descargan el metanol de forma continua, operando bajo las estrictas normas del acuerdo ADR para mercancías peligrosas. Justo a la salida de los tanques, se ha colocado la estación de bombeo. Aquí, unas bombas se encargan de impulsar el líquido hacia la zona de reacción.

1.5.2 Reacción (A-200)

El Área 200 es donde se transforma el metanol en formaldehído. El proceso empieza preparando los reactivos: el metanol líquido llega del Área 100 y lo primero que se hace es pasarlo por el intercambiador E-202, donde se vaporiza por completo aprovechando el calor que llevan los gases a la salida del reactor. Mientras tanto, el aire que necesitamos para la reacción es aspirado de la atmósfera y presurizado por el compresor K-101. Cuando ya tenemos el metanol en fase gas y el aire a la presión necesaria, ambas corrientes se juntan en el mezclador estático MZ-201 para asegurar que la mezcla entre al reactor totalmente homogénea.

Después, esta mezcla se calienta en el intercambiador E-203 hasta el punto óptimo para la reacción utilizando el vapor generado por la caldera acuotubular de la planta. En esta parte del circuito contamos con el intercambiador E-201, que se encarga de precalentar el agua de alimentación antes de que entre a la caldera acuotubular, consiguiendo así que esta tenga que trabajar menos y reduzcamos el consumo energético global.

La reacción tiene lugar en los reactores multitubulares verticales R-201 y R-202. Los tubos contienen el catalizador sólido (Fe-Mo) que se obtiene de la compañía Perstorp. Como la reacción es muy exotérmica, llenar los tubos solo con catalizador dispararía la temperatura. Para evitarlo, el catalizador se diluye con un material inerte, que son piezas sólidas con la misma forma pero sin actividad química. Esto permite mantener el flujo de gas perfecto mientras se frena la reacción.

El llenado se hace por capas, dejando también 0,075 m solo con inerte en los extremos del tubo. Los 1,85 metros restantes se dividen en tres tramos con concentraciones crecientes de catalizador: 17,5 % al principio (donde hay mucho metanol fresco y hay que frenar el calor), 23 % en el medio, y 36 % al final (para consumir el reactivo que queda). Así se pueden evitar puntos calientes y lograr una conversión del 97,96 % en apenas 0,576 segundos.

Para controlar el calor de la reacción, por la carcasa exterior de los tubos del reactor circula aceite térmico. Este aceite absorbe la energía liberada y se dirige al intercambiador E-204, cuya función es refrigerar el aceite para mantener la temperatura de operación estable dentro de los márgenes que marca el diseño.

Por otra parte, para la gestión del agua del proceso, esta área dispone de los air coolers AC-201 y AC-202. Estos equipos se encargan específicamente de enfriar el agua de proceso que viene caliente, reduciendo su temperatura mediante ventiladores para que pueda volver a reintroducirse en el circuito del agua de proceso y reaprovecharse por completo.

Por último, cuando los gases de proceso salen del reactor están muy calientes. Antes de enviarlos al Área 300 para la etapa de absorción, los enfriamos pasándolos en serie primero por el intercambiador E-202 ya mencionado, y después por el air cooler AC-203. Ambos equipos se encargan de bajar la temperatura de la corriente de gases hasta el valor adecuado para que la absorción posterior sea efectiva y no se pierda producto por el camino.

1.5.3 Separación y tratamiento de gases (A-300)

El Área 300 se encarga de absorber el formaldehído gaseoso en agua para obtener la formalina comercial y de depurar los gases residuales del proceso antes de emitirlos a la atmósfera. Esta sección está formada por 6 equipos principales.

El proceso de separación comienza cuando los gases que provienen de la zona de reacción entran por la parte inferior de la columna de absorción principal CA-301. Esta torre trabaja a contracorriente, recibiendo la inyección de agua por la parte superior. Como el formaldehído es muy soluble, el agua lo atrapa a medida que cae, y la disolución de formalina terminada se recoge por el fondo de la columna.

Los gases incondensables que no se han disuelto escapan por la cabeza del absorbedor y pasan por el cooler C-301, enfriando la corriente gaseosa antes de introducirla por la base del primer

scrubber de separación SC-301. En esta torre de lavado se realiza una absorción final para recuperar las trazas de producto que se hayan escapado de la columna principal. Para garantizar que este último lavado sea efectivo, el agua de proceso que alimenta la cabeza del scrubber se enfría previamente a la temperatura de diseño en el cooler C-302. Con este doble sistema de enfriamiento y lavado, conseguimos aumentar el rendimiento másico global de la instalación.

Por último, los gases que salen por la parte superior de este primer scrubber todavía arrastran compuestos orgánicos volátiles que está prohibido liberar directamente. Para solucionarlo, la corriente se envía al sistema de gestión ambiental de la planta, que está compuesto por un segundo scrubber conectado directamente a un reactor biológico aerobio. En este sistema final, los contaminantes gaseosos (restos de metanol y formaldehído sobre todo) se transfieren al agua y los microorganismos del reactor los degradan biológicamente utilizándolos como fuente de alimento. Tras pasar por esta etapa de depuración, el aire limpio e inocuo se expulsa al exterior por la chimenea como una emisión atmosférica, cumpliendo con los estándares de las Mejores Técnicas Disponibles (MTD) que marca la normativa europea.

1.5.4 Almacenamiento y descarga de producto (A-400)

El Área 400 se destina a la recepción, almacenamiento seguro y posterior descarga del producto final obtenido en el proceso, el cual consiste en una disolución acuosa de formaldehído al 37 %.

Para garantizar la viabilidad del producto, justo antes de su entrada a los tanques de almacenamiento se incorpora una línea de bypass de metanol proveniente directamente del Área 100. Este metanol fresco se inyecta y se mezcla con la corriente de producto para alcanzar una concentración de estabilizante del 10 %. Esta adición es estrictamente necesaria para evitar que el formaldehído polimerice y precipite en forma de paraformaldehído sólido durante su almacenamiento.

Para la fase de almacenamiento, esta sección dispone de una batería de cuatro tanques principales T-401, T-402, T-403 y T-404. Para mantener las propiedades fisicoquímicas de la mezcla, estos equipos están recubiertos con lana de roca como aislante térmico, conservando el líquido a una temperatura óptima de 25 ºC. Este control térmico es crítico: si la temperatura descendiera de 15 ºC el producto precipitaría en fase sólida, y si superase los 35 ºC se aceleraría la formación de ácido fórmico corrosivo. Además, por la toxicidad del formaldehído, los tanques se mantienen inertizados bajo una ligera sobrepresión de nitrógeno para impedir cualquier fuga de vapores a la atmósfera.

El transporte del fluido a través de esta área se lleva a cabo mediante un sistema de impulsión equipado con bombas centrífugas del fabricante Liquiflo. Estos equipos se encargan de transferir la disolución desde la zona de absorción hacia los tanques de almacenamiento, y posteriormente de bombear el producto hacia las isletas para su carga. Dado que todos los componentes de esta área operan en contacto directo con el formaldehído que presenta un

carácter corrosivo, especialmente si se generan trazas de ácido fórmico, la totalidad de las tuberías, válvulas y carcasas de las bombas están fabricadas en acero inoxidable AISI 316L para garantizar su inercia química.

Finalmente, la distribución del producto se ejecuta en la zona de carga. Estas isletas permiten el llenado seguro de los camiones cisterna e incorporan válvulas de globo de acero inoxidable diseñadas específicamente para modular y dosificar el caudal de forma precisa durante las transferencias. El diseño y la operativa logística de esta sección de carga cumplen de manera estricta con las exigencias del Acuerdo europeo relativo al transporte internacional de mercancías peligrosas por carretera (ADR), asegurando un transporte controlado y sin riesgos.

1.5.5 Zona de servicios auxiliares (A-500)

El Área 500 recopila las infraestructuras destinadas al suministro y distribución de los fluidos auxiliares y la energía eléctrica necesarios para el funcionamiento continuo de la planta. Al no procesar ni almacenar los compuestos químicos principales del proceso productivo, esta instalación se clasifica operativamente como una zona segura. Esta área centraliza las siguientes estaciones de servicio:

Estación de agua de proceso: Sistema encargado del abastecimiento, tratamiento y bombeo del agua de servicio de la planta. Esta red distribuye el caudal de agua necesario tanto para las operaciones de limpieza y mantenimiento como para alimentar los circuitos de los equipos de refrigeración e intercambiadores térmicos ubicados en las zonas de proceso.

Estación de distribución de nitrógeno: Esta unidad actúa para regular y distribuir nitrógeno gas para la inertización del proceso. Debido a la localización de la planta en el polígono industrial de Tarragona, el suministro de nitrógeno se realiza directamente a través de la red de tuberías de distribución externa, prescindiendo así de tanques de almacenamiento criogénico. La estación regula la presión del gas entrante y lo distribuye hacia las áreas A-100 y A-400. Su función es mantener los tanques de metanol y de formol a una presión constante, para su correcto almacenamiento.

Estación de aire comprimido: Central de compresión dedicada a generar el aire necesario para la instrumentación y los servicios generales. Este sistema somete el aire a un proceso exhaustivo de filtrado y secado para suministrar el denominado "aire de instrumentos", un recurso absolutamente indispensable para el accionamiento neumático de las válvulas de control automático, garantizando la operatividad de los lazos de control de los reactores y las columnas.

Subestación eléctrica: Infraestructura de transformación y distribución de energía. Recibe la alimentación eléctrica en media/alta tensión de la red exterior y la adapta a las tensiones de operación requeridas por la planta. Desde este punto se alimentan de forma segura los motores de gran potencia de los compresores y bombas centrífugas, los armarios electrónicos del

Sistema de Control Distribuido (DCS) encargados de procesar los datos del proceso, y la red de iluminación de toda la planta.

1.5.6 Instalaciones generales, logística y seguridad (A-600)

Esta área contiene las infraestructuras civiles destinadas a la administración, el mantenimiento mecánico, el control de calidad y la supervisión remota del proceso. Con el fin de garantizar la seguridad del personal ante posibles escenarios de emergencia, estas edificaciones se localizan en el perímetro de la parcela, al lado de los aparcamientos principales y alejadas de las unidades de reacción y almacenamiento químico.

Oficinas y sala de reuniones: Este bloque administrativo centraliza los despachos de la dirección de planta, la gestión comercial y los departamentos técnicos. El espacio cuenta con una sala de reuniones rectangular integrada, habilitada para la celebración de juntas, comités de seguridad y auditorías, además de recibir invitados.

Vestuarios: Edificación independiente destinada al cambio de ropa y aseo personal. El diseño interior aplica el criterio de separación entre "zona limpia" y "zona sucia" mediante un sistema de esclusas y duchas, lo cual obliga a los operarios a despojarse de la ropa de trabajo antes de acceder a las áreas comunes, evitando así la dispersión de trazas de formaldehído hacia el exterior.

Comedor: Espacio independiente destinado al descanso y manutención del personal durante los turnos de trabajo, situado en el bloque de servicios del personal.

Laboratorio: Unidad equipada con sistemas de extracción forzada y equipos analíticos de precisión, tales como cromatógrafos de gases. Aquí el equipo de Calidad certifica que el formol producido cumple la especificación comercial del 37 % en peso de formaldehído y el 10 % de metanol estabilizante. Paralelamente, el área de I+D+i realiza el seguimiento del catalizador de hierro-molibdeno para planificar su sustitución, entre otras cosas.

Sala de Control Central: Estructura de hormigón armado reforzado construida como refugio ante sobrepresiones externas. Dispone de climatización con presión positiva, lo que impide la infiltración de gases en caso de fuga en el exterior. Centraliza las estaciones del Sistema de Control Distribuido (DCS) para la monitorización y regulación remota de las variables operativas de la planta.

Taller de mantenimiento y aseos: Nave diseñada para el resguardo de herramientas, utillaje y piezas críticas de recambio, como componentes para las bombas centrífugas Liquiflo. Esta sección también integra los aseos y baños de servicio para el personal. Al encontrarse en un área exenta de atmósferas inflamables, el taller permite ejecutar trabajos mecánicos en caliente (soldadura, oxicorte) de forma segura.

Casetas de control de accesos: Instalaciones de seguridad ubicadas en los dos puntos de acceso del perímetro de la parcela. Su función es centralizar la vigilancia de la planta, realizar el registro obligatorio de contratas y camiones cisterna bajo la normativa ADR, y actuar como primer filtro de seguridad del complejo industrial. Además, cada una de estas casetas lleva anexa una báscula de pesaje industrial para camiones; esta dotación doble permite agilizar la logística y asegurar un control de masas riguroso en ambos puntos, registrando con exactitud el tonelaje tanto de la materia prima recibida como del producto final expedido.

Tanque de agua contra incendios: Infraestructura de almacenamiento de seguridad situada en el perímetro, adyacente al acceso de camiones y vehículos de emergencia. Este depósito almacena una reserva estática de agua dedicada en exclusiva al sistema de protección contra incendios de la planta. Al operar de manera autónoma junto a un grupo de bombeo de alta presión, garantiza el caudal y la presión requeridos legalmente por el Reglamento de seguridad contra incendios en establecimientos industriales (RSCIEI) para alimentar la red perimetral de hidrantes, monitores y rociadores, asegurando la extinción incluso en caso de fallo en el suministro público exterior.

1.6 Balance de energía

El balance de energía es una herramienta fundamental para el análisis de la planta y para el correcto dimensionamiento de los equipos. Este estudio nos permite conocer la demanda térmica global, optimizar los sistemas de calefacción y refrigeración, y evaluar la viabilidad de los servicios auxiliares presentados en las áreas correspondientes. Además, un balance riguroso ayuda a detectar excedentes de energía que pueden recuperarse para mejorar la sostenibilidad y eficiencia del proceso.

En la Tabla 1.6.1. se presentan los equipos que intervienen en el balance térmico de la planta, indicando el intercambio de energía en cada uno. Se ha seguido el criterio convencional donde una potencia positiva indica que se aporta energía al proceso, mientras que una potencia negativa indica una demanda de extracción o consumo para refrigeración.

Tabla 1.6.1. Equipos de generación de frio/calor

Equipo	Código	Potencia Térmica (kW)
Intercambiador	E-201	*1123.76*
Intercambiador	E-202	*2107.24*
Intercambiador	E-203	*2045.31*
Intercambiador	E-204	*-7687.32*
Caldera	CR-201	2106.8
Air cooler	AC-201	-6687.89
Air cooler	AC-202	-1085.38
Air cooler	AC-203	-2032.75

Equipo	Código	Potencia Térmica (kW)
Cooler	C-301	-3776.32
Cooler	C-302	-33.24
Balance de energía calorífica total		-1391979

El resultado neto del balance es de -13.919,79 kW. Este valor negativo es una característica intrínseca del proceso FORMOX debido a la alta exotermidad de la reacción de oxidación del metanol.

Este resultado no implica una ineficiencia, sino que representa la carga térmica que el sistema de refrigeración debe ser capaz de gestionar. La planta genera más calor del que puede aprovechar internamente, por lo que el diseño debe asegurar la evacuación de este excedente para evitar problemas de seguridad y mantener el reactor en su rango de operación óptimo.

1.7 Especificaciones y necesidades de servicios

La planta de producción de formol requiere una serie de servicios complementarios y auxiliares, imprescindibles para el funcionamiento continuo, eficiente y seguro de toda la instalación. En la Tabla 1.7.1. se presenta la información clasificada de cada uno de los servicios, indicando su naturaleza, procedencia externa o interna y el área física donde se localiza su punto de regulación, distribución o intercambio central.

Tabla 1.7.1. Servicios de la planta

Servicio	Clasificación	Fuente	Área
Agua de proceso	Materia	Externa	Pie de parcela / A-500
Agua contra incendios	Materia	Externa / Interna	A-600
Nitrógeno gas	Materia	Externa	Pie de parcela / A-500
Aceite térmico	Materia	Interna	A-200
Amoníaco líquido	Materia	Interna	A-300
Aire comprimido	Materia	Interna	A-600
Electricidad	Energía	Externa	Pie de parcela / A-500
Gas natural	Energía	Externa	Pie de parcela / A-200

1.7.1 Aceite térmico

Para el sistema de refrigeración de la carcasa de los reactores de oxidación multitubulares del Área 200, se dispone de un circuito cerrado de aceite térmico sintético de alta temperatura como agente de transferencia de calor. Este fluido es el encargado de absorber de manera directa y continua la gran cantidad de energía liberada por la reacción altamente exotérmica de síntesis del formaldehído, manteniendo los tubos del reactor en condiciones isotérmicas de diseño.

El aceite calentado se bombea hacia el intercambiador de calor E-204 para restablecer su temperatura y reintroducirlo al proceso. Este fluido destaca por una elevada estabilidad térmica y una baja presión de vapor a altas temperaturas, reduciendo drásticamente el riesgo de sobrepresión o fugas en la carcasa del reactor. En caso de fuga accidental a altas temperaturas, puede generar vapores orgánicos inflamables, por lo que cuenta con monitoreo de seguridad.

1.7.2 Amoníaco líquido

El suministro de frío industrial se concentra de forma exclusiva en el Área 300 para dar servicio a los dos *coolers* de la parte final de la refinación. El amoníaco opera en un circuito cerrado de compresión mecánica y se utiliza como refrigerante para enfriar drásticamente el agua de proceso y los gases de cola antes de entrar al primer *scrubber*.

Esta operación es crítica, ya que la solubilidad del formaldehído gaseoso aumenta exponencialmente al disminuir la temperatura, maximizando así la recuperación de producto en fase líquida y el rendimiento de la planta.

1.7.3 Nitrógeno gas de inertización

La red de distribución de nitrógeno gas constituye el principal pilar de seguridad pasiva de la planta. El gas llega a pie de parcela procedente de la red de distribución externa del polígono industrial de Tarragona, lo que permite prescindir de costosos tanques criogénicos de almacenamiento en el recinto.

El flujo se dirige hacia la estación de regulación y medida del Área 500, desde donde se redistribuye hacia las zonas de proceso. Este nitrógeno se inyecta en los tanques de almacenamiento de productos y de reactivos para garantizar inertidad y eliminar el riesgo de inflamabilidad, así como mantener la presión constante en los tanques

1.7.4 Agua de proceso y de red

El agua se introduce desde el pie de parcela hacia el Área 500, la cual actúa como el nodo central de tratamiento y distribución hacia el resto de la instalación. El *agua de red* se desvía hacia servicios generales, por el contrario, el *agua de proceso* se somete a una etapa de descalcificación y desmineralización en la misma Área 500 para evitar incrustaciones.

Una vez tratada, se bombea de forma centralizada hacia los equipos del proceso que requieran de esta agua.

1.7.5 Sistema de agua contra incendios

Este servicio de seguridad activa se localiza físicamente en el Área 600, aprovechando el espacio perimetral seguro al lado del acceso de vehículos de emergencia. Consta de un gran tanque de almacenamiento estático de agua que contiene la reserva de autonomía legal obligatoria exigida por el Reglamento de seguridad contra incendios en establecimientos industriales (RSCIEI).

1.7.6 Aire comprimido (Servicio e Instrumentos)

Para optimizar el espacio y facilitar la supervisión mecánica de mantenimiento, la estación de compresión de aire se ubica integrada dentro del edificio de los talleres generales en el Área 600, eliminando la necesidad de una edificación civil independiente. La sala de compresores aspira el aire atmosférico y abastece dos redes paralelas:

Aire de servicio: Canalizado hacia el taller y puntos de planta para el uso de herramientas neumáticas y limpieza mecánica.

Aire de instrumentos: Sometido a un filtrado micrométrico y a un secado profundo en torres de adsorción para eliminar cualquier traza de humedad o aceite. Este es un servicio crítico de control, ya que proporciona la fuerza neumática para mover de forma precisa los actuadores de todas las válvulas automáticas de los reactores y columnas, evitando obstrucciones o congelamientos internos.

1.7.7 Energía eléctrica y transformación

La energía eléctrica se recibe en media/alta tensión (20 kV) directamente desde la red exterior a pie de parcela y se conecta a la subestación eléctrica central del Área 500. Los

transformadores de la subestación adaptan el voltaje a las tensiones de trabajo industriales de la planta.

Desde este punto se ramifica la línea de potencia para alimentar los grandes motores eléctricos como el del compressor K-101 o las bombas centrífugas, y también distribuye corriente de baja tensión para la iluminación, los equipos de laboratorio y los armarios electrónicos del Sistema de Control Distribuído (DCS), contando con bancos de baterías (SAI/UPS) para mantener el control activo frente a un apagón eléctrico externo.

1.7.8 Gas natural

El gas natural llega desde la red de distribución externa de media presión a pie de parcela y se canaliza de forma directa y exclusiva hacia el Área 200. El gas sirve para alimentar directamente a los quemadores de la caldera acuotubular CR-201.

Dado que el proceso de síntesis FORMOX es altamente exotérmico y genera su propio vapor una vez iniciado, el gas natural solo se requiere para este equipo.

1.8 Planificación temporal de construcción

Para poder llevar a cabo la ejecución material del proyecto, es necesario organizar adecuadamente los tiempos de cada una de las fases constructivas y de puesta en marcha de la instalación. Aunque en el estudio económico se simplifica la etapa de inversión inicial concentrándola en los primeros años para facilitar el cálculo del flujo de caja, la realidad técnica de una planta química de esta envergadura requiere una planificación detallada basada en los plazos reales de fabricación, obra y montaje.

Para elaborar el calendario del proyecto, las actividades se han ordenado siguiendo una lógica de construcción secuencial. Esto implica que ciertas tareas no pueden comenzar hasta que haya finalizado por completo la actividad anterior que les sirve de base. En la Tabla 1.8.1 se detallan todas las tareas necesarias para construir la planta en el Polígono Satel·lits de Tarragona, indicando la duración estimada de cada una y sus requisitos de inicio.

Tabla 1.8.1. Lista de tareas para la construcción de la planta

Tarea	Descripción de la fase	Duración (días)	Precedencia
T1	Ingeniería básica del proyecto y diagramas de flujo	60	—
T2	Trámites legales y licencias ambientales	180	T1
T3	Ingeniería de detalle del proceso FORMOX	120	T1
T4	Compra y fabricación de equipos	180	T3
T5	Limpieza y preparación del terreno en Tarragona	30	T1
T6	Movimiento de tierras y cimentaciones de hormigón	60	T3, T5
T7	Instalación de tuberías de agua de red y luz eléctrica	50	T6
T8	Pavimentación de calles interiores y accesos de camiones ADR	30	T12
T9	Construcción de oficinas, laboratorios y sala de control (A-600)	90	T6
T10	Estructuras civiles para las zonas de proceso (Áreas 200 y 300)	60	T6
T11	Montaje de los tanques de metanol (A-100) y de formol (A-400)	60	T6
T12	Colocación y montaje (A-200 y A-300)	90	T4, T10
T13	Instalación de tuberías de proceso de acero inoxidable	90	T11, T12
T14	Montaje de válvulas y pruebas de presión e hidrostáticas	30	T13
T15	Instalación del tanque y de la red de agua contra incendios	45	T7
T16	Montaje de la subestación y los transformadores eléctricos (A-500)	45	T9
T17	Instalación de cables eléctricos e instrumentación de campo	60	T14, T16
T18	Puesta de aislamiento térmico en tuberías y equipos calientes	30	T17
T19	Revisiones mecánicas en frío y limpieza interna de líneas	30	T18

Tarea	Descripción de la fase	Duración (días)	Precedencia
T20	Arranque de servicios auxiliares (luz, agua, nitrógeno y aire)	20	T19
T21	Configuración y comprobación de lazos de control en el DCS	30	T20
T22	Puesta en marcha desde cero con agua y recirculaciones	45	T21
T23	Arranque real, estabilización y análisis del formol al 37%	30	T22

La representación gráfica del solapamiento de estas tareas a lo largo del tiempo se muestra en un diagrama de Gantt, el cual se encuentra disponible en los anexos del proyecto.

A partir de la relación temporal y secuencial entre estas tareas, se ha calculado la ruta crítica del proyecto. La ruta crítica se define como la cadena de actividades consecutivas que no disponen de ningún margen de tiempo libre. Si una sola de estas actividades sufre un retraso durante la construcción, la fecha de finalización e inauguración de toda la instalación se verá pospuesta automáticamente.

En la planta de producción de formol, esta ruta viene marcada principalmente por los elevados tiempos de entrega en la fabricación de los equipos a presión, la complejidad en el montaje de la red de tuberías de acero inoxidable y las estrictas pruebas de seguridad previas a la operación química. Las tareas que conforman la ruta crítica se encuentran listadas en la Tabla 1.8.2.

Tabla 1.8.2. Tareas que forman la ruta crítica

Actividad Crítica	Nombre de la tarea en la ruta crítica
T1	Ingeniería básica del proyecto y diagramas de flujo
T3	Ingeniería de detalle del proceso FORMOX
T4	Compra y fabricación de equipos
T12	Colocación y montaje de A-200 y A-300
T13	Instalación de tuberías de proceso de acero inoxidable
T14	Montaje de válvulas y pruebas de presión e hidrostáticas
T17	Instalación de cables eléctricos e instrumentación de campo
T18	Puesta de aislamiento térmico en tuberías y equipos calientes
T19	Revisiones mecánicas en frío y limpieza interna de líneas
T20	Arranque de servicios auxiliares (luz, agua, nitrógeno y aire)
T21	Configuración y comprobación de lazos de control en el DCS
T22	Puesta en marcha desde cero con agua y recirculaciones
T23	Arranque real, estabilización y análisis del formol al 37%

La suma total de los días correspondientes a las tareas críticas (T1 + T3 + T4 + T12 + T13 + T14 + T17 + T18 + T19 + T20 + T21 + T22 + T23) conlleva 815 días. Esta cifra representa el tiempo constructivo físico y real estimado para la ejecución del proyecto antes de lograr la estabilización comercial.

Las tareas restantes se ejecutan en paralelo a la ruta principal, dado que disponen de cierta holgura. Sin embargo, resulta indispensable realizar un control continuo sobre el avance de estas actividades. Si dichos trabajos secundarios acumulan retrasos superiores a su margen disponible, se podrian llegar a incorporar a la ruta crítica, prolongando la duración global de la obra y afectando de forma directa a las proyecciones de rentabilidad estimadas.

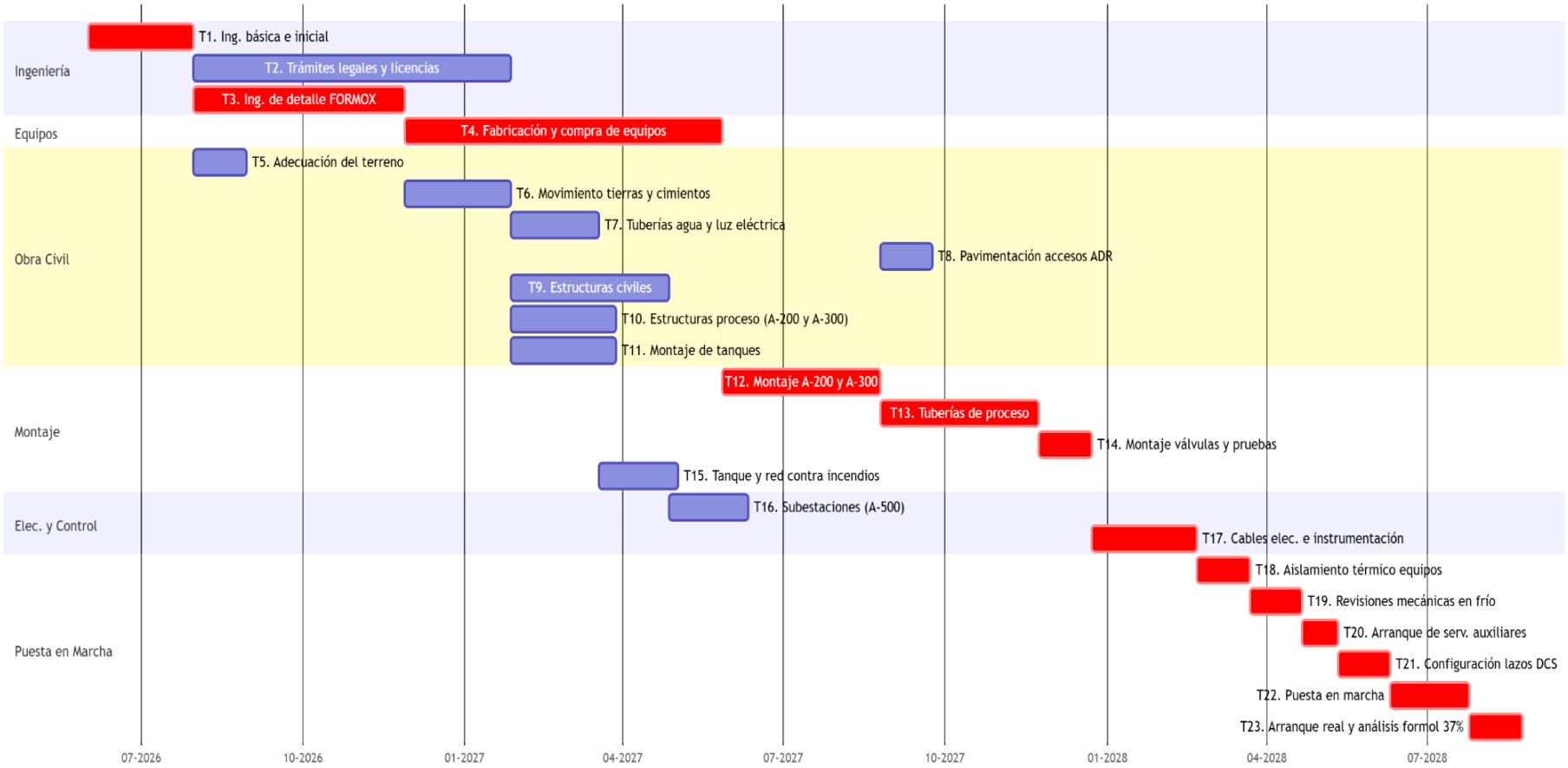


Figura 1.8.1. Diagrama de Gantt

1.9 Bibliografía

[1] Metanol:

National Center for Biotechnology Information. (s.f.). *Methanol*. PubChem Compound Summary. https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Methanol

National Institute for Occupational Safety and Health. (s.f.). *Methyl alcohol*. NIOSH Pocket Guide to Chemical Hazards. http://cdc.gov/niosh/npg/npgd0397.html

National Institute of Standards and Technology. (s.f.). *NIST Chemistry WebBook*. https://webbook.nist.gov/

[2] Agua:

National Institute of Standards and Technology. (s.f.). *Water*. NIST Chemistry WebBook. https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C7732185

Engineering Toolbox. (s.f.). *Water - Properties*. https://www.engineeringtoolbox.com/water-properties-d_1258.html

[3] Nitrógeno:

National Institute of Standards and Technology. (s.f.). *Nitrogen*. NIST Chemistry WebBook. https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=7727-37-9

National Institute for Occupational Safety and Health. (s.f.). *NIOSH Pocket Guide to Chemical Hazards*. https://www.cdc.gov/niosh/npg/default.html

[4] Oxígeno:

National Institute of Standards and Technology. (s.f.). *NIST Chemistry WebBook*. https://webbook.nist.gov/

National Institute for Occupational Safety and Health. (s.f.). *NIOSH Pocket Guide to Chemical Hazards*. https://www.cdc.gov/niosh/npg/default.html

[5] Formol (formaldehido):

National Center for Biotechnology Information. (s.f.). *Formaldehyde*. PubChem Compound Summary. https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Formaldehyde

National Institute of Standards and Technology. (s.f.). *Formaldehyde*. NIST Chemistry WebBook. https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=50-00-0

[6] Datos Tarragona:
Institut d'Estadística de Catalunya. (s.f.). *Indicadores económicos y anuales macroeconómicos*. https://www.idescat.cat/indicadors/?id=aec&n=15228&lang=es