



1. - Fundamentos del proyecto y objetivos.....	3
1.1 - Introducción.	3
1.2.-Necesidades y fundamentos del proyecto CICYT	3
1.2.1 -Objetivos del proyecto CICYT.	4
1.2.2 -Beneficios del proyecto CICYT:.....	6
1.3 -Plantas Piloto.....	8
1.4 -Fundamentos de la automatización. Estado del arte.	10
1.4.1 -Evolución histórica.....	11
1.4.2 -Sistemas distribuidos.....	18
1.5 -Objetivos del proyecto.	23
2. - Estudio, Modelización y Simulación de los Procesos.....	24
2.1 - Visita a empresas colaboradoras. Estudio de problemática y elección de procesos.	24
2.1.1 - Funcionamiento básico de una columna de destilación.	24
2.1.2 - Problemática de las columnas de destilación.	26
2.2 -Introducción a la destilación.	28
2.2.1 -Partes principales de una torre de destilación.	34
2.3 -Ecuaciones básicas de modelización.....	37
2.3.1 -Ecuaciones de platos (etapa genérica).....	37
2.3.2 -Etapa de alimentación.	40
2.3.3 -Fondo de la columna	41
2.3.4 -Condensador.....	43
2.3.5 -Modelo del depósito acumulador	45
2.4 -Simulación.....	46
2.4.1 -Conclusiones de la simulación.	56
3. -Diseño y Dimensionamiento de la Planta.	57
3.1 - Características exigibles:.....	57
3.2 - Estudio de plantas piloto existentes.	57
3.2.1 -Plantas piloto Repsol y Derivados Químicos.....	58
3.2.2 -Plantas piloto comerciales.	60
Los elementos que aparecen en la Figura 3.2 son los siguientes:.....	62
3.3 - Proceso de diseño inicial.	65
3.4 -Descripción funcional de los procesos adoptados. Partes fundamentales.....	70
3.4.1 -Proceso original.....	70
3.4.2 -Proceso adaptado.....	75
3.5 -Cálculos estimativos.....	80
4. - Sistema de Control y Actuadores.	82
4.1 - Elección del sistema de control.....	82
4.2 -Descripción del sistema de control.....	86
4.2.1 -Unidad de control principal I-8438:	89
4.2.2 -Unidad de expansión E/S I-87K8:.....	90
4.2.3 -Tarjetas de E/S.	91
4.3 -Actuadores.....	97
4.3.1 -Grupo bombas.	98
4.3.2 -Variadores de frecuencia.....	99
4.3.3 -Válvulas solenoides.....	105
4.3.4 -Válvulas de control	106
4.3.5 - Agitador del reactor:.....	117



4.3.6 -Resistencias calefactoras	117
5. -Diseño de Ingeniería y fabricación.....	124
5.1 -Depósito D-03	126
5.2 -Depósito D-04	127
5.3 -Depósito D-05	128
5.4 -Columna de Destilación C-02:	130
5.5 -Resistencias de abrazadera J-10	133
5.6 - Estado actual Planta Piloto.....	134
5.6.1 - Columna de Destilación. Bastidor 1.....	136
5.6.2 - Reactor Químico. Bastidor 2.....	142
5.6.3 - Armarios eléctricos y de control. Bastidor 1.....	144
5.6.4 - Fotografías generales Planta Piloto Completa.	147
6. -Conclusiones y trabajos futuros.	149
6.1 -Conclusiones.	149
6.2 -Trabajos futuros.....	150
Bibliografía.....	151

Anexo 1: Especificaciones Básicas.

Anexo 2: Planos.

Anexo 3: Hojas de datos. (Sólo formato electrónico)

Anexo 4: Simulación. (Sólo formato electrónico)

Anexo 5: Fotografías. (Sólo formato electrónico)



1.- Fundamentos del proyecto y objetivos.

1.1- Introducción.

Este proyecto comprende el análisis, diseño, simulación y supervisión de la construcción de una planta piloto de procesos químicos, la cual está compuesta por dos elementos principales: una columna de destilación o separación de dos componentes, donde se separan dos productos de volatilidad diferente, y un reactor químico batch para simular reacciones, controlando la temperatura de dichas reacciones a través de una camisa por la que circula un fluido. Este trabajo de desarrollo de la planta piloto se compone de dos proyectos fin de carrera realizados conjuntamente: “*Desarrollo de una Planta Piloto de Procesos Químicos. Columna de Destilación*” y “*Desarrollo de una Planta Piloto de Procesos Químicos. Reactor Químico*” encargándose cada uno de ellos de una de las partes principales comentadas antes.

Estos proyectos fin de carrera se engloban dentro de un proyecto CICYT de colaboración entre la Universidad Politécnica de Cartagena, Repsol YPF y Derivados Químicos S.A., denominado “*Sistema jerárquico para la supervisión y control inteligente de procesos farmacéuticos y petroquímicos*” (SUYCON), y más concretamente dentro de la primera parte del proyecto CICYT que consiste en el diseño y construcción de una planta piloto.

1.2.-Necesidades y fundamentos del proyecto CICYT

En el proyecto CICYT (SUYCON) [1] se pretende implantar en procesos industriales los logros obtenidos durante los últimos años en el campo de los sistemas de control inteligente y de control predictivo por el “Grupo de Neurotecnología, Control y Robótica”, en la Universidad Politécnica de Cartagena. Dicho grupo de investigación cuenta con una gran experiencia en el desarrollo y aplicación de sistemas neuronales, difusos y neurodifusos para el control, sensorización y supervisión de una amplia variedad de procesos y, en particular, de procesos químicos batch y continuos. [2, 3]



1.2.1-Objetivos del proyecto CICYT.

La función principal del proyecto CICYT es aprovechar dicha experiencia desarrollada en un entorno académico y corroborada en diversas aplicaciones prácticas, para realizar la supervisión, automatización y control inteligente en cuatro plantas piloto de procesos químicos batch y continuos pertenecientes a Repsol-YPF. y Derivados Químicos S.A. Dichas plantas piloto son modelos a escala de procesos que estas empresas llevan a cabo en plantas industriales situadas en la Región de Murcia. La aplicación de los algoritmos de control inteligente para la automatización, supervisión y control de dichas plantas es un primer paso para su implantación en los procesos a escala industrial.

Objetivo 1: Automatización de los procesos de las plantas piloto H-7 y CSTR-O1 de la empresa Repsol-YPF, así como de las plantas piloto SE y ST que la empresa Derivados Químicos tiene en sus instalaciones de Alcantarilla (Murcia). Dentro de este objetivo se incluye el estudio de los diagramas de proceso e instrumentación, la actualización o adecuación de los sensores y actuadores existentes, así como la introducción de nueva sensorización y actuadores adicionales con vistas al funcionamiento autónomo de las plantas.

Las tareas que supone este objetivo son:

- Requisitos y especificaciones de funcionamiento.
- Seguimiento.
- Desarrollo de diagramas de proceso e instrumentación de las plantas.
- Observación de las plantas piloto bajo supervisión del operador.
- Puesta en marcha y estudio del software necesario.
- Instalación de la planta piloto de la universidad.
- Adecuación de las plantas para un funcionamiento autónomo.

Objetivo 2: Adaptación e implantación de un sistema de control jerárquico para supervisión y control inteligente de las variables críticas de los procesos. Para conseguir este objetivo se deberá realizar un análisis minucioso de la correlación de las variables



de las plantas y lograr una buena inferencia de las variables no sensorizables. Las técnicas neurodifusas ya desarrolladas por el grupo de Neurotecnología, Control y Robótica de la UPCT han demostrado su buen funcionamiento para este tipo de tareas. También se hace necesario el desarrollo de estrategias de control predictivo y de control fuzzy para conseguir un buen seguimiento de las consignas, y un rápido y eficiente rechazo de perturbaciones, así como para dotar a las plantas de capacidad de reacción ante un cambio en la estrategia de producción. La experiencia de las empresas indica la gran dificultad de este objetivo.

La aplicación construida deberá permitir el funcionamiento autónomo y continuo de las plantas durante un periodo de al menos 4 semanas con la única intervención del operador humano cada 24 horas para realizar operaciones de alimentación, revisión y mantenimiento. El sistema será capaz de realizar las tareas de puesta en marcha, ajuste y cambio de condiciones, parada, toma de muestras, adquisición de datos, elaboración de reports y corrección y anulación de incidencias de las plantas. Deberá detectar cualquier anomalía en el funcionamiento y actuar de forma inteligente para su corrección o aviso.

Las tareas que supone este objetivo son:

- Identificación de sistemas.
- Programación del control de las variables críticas.
- Programación del sistema de supervisión.
- Estudio de portabilidad.
- Implantación de las aplicaciones realizadas en las plantas piloto.
- Extrapolación y ampliación de resultados.

Los procesos que representan las plantas en las que se debe trabajar ofrecen problemáticas diferentes y complementarias, que abarcan varios de los objetivos fundamentales de la ingeniería de sistemas y automática. Así, las plantas piloto de Repsol Petróleo S.A. requieren un funcionamiento totalmente autónomo sin ninguna intervención humana durante al menos 24 horas. Es necesario por tanto desarrollar un sistema de monitorización, sensorización, control y supervisión avanzado. Las plantas de Derivados Químicos S.A. presentan dificultades en la regulación de variables críticas



debido a las no linealidades que aparecen y a la inexistencia de modelos adecuados, requiriéndose un nuevo sistema de inferencia y correlación de variables que permita una adecuada identificación. Es necesario también el desarrollo de un sistema de control inteligente o control predictivo que permita afrontar la regulación de esas variables críticas con la suficiente fiabilidad. [1]

1.2.2-Beneficios del proyecto CICYT:

Los beneficios derivados del proyecto tienen la doble vertiente del desarrollo de tecnologías que aplican la inteligencia artificial al control automático, y la transferencia de los resultados de investigación a empresas del entorno del centro de investigación, en este caso, la Universidad Politécnica de Cartagena.

Desglosadamente los beneficios que se obtienen en cada una de las entidades serían los siguientes:

◆ UPCT (Neurocor)

Aplicación de los algoritmos neurodifusos desarrollados a través de varios proyectos de investigación anteriores, a procesos industriales, con una gran connotación práctica. Además el Grupo está colaborando en el desarrollo de un microchip de potencia que integrará los algoritmos FasArt y FasBack, por lo cual estas aplicaciones pueden servir como "test bed" y referencia para la futura difusión del producto desarrollado. Además, una vez suficientemente avanzada la aplicación, durante la fase de difusión de resultados, tenemos contactos avanzados en compañías de control a nivel internacional, como Fisher&Rosemount, que ya han comunicado su interés por esta aplicación.

Además la Universidad Politécnica de Cartagena, conseguirá gracias a este proyecto, una planta piloto, lo cual permitirá incrementar la calidad práctica de la docencia e investigación en control de procesos, aspecto de vital importancia dada la juventud de la Universidad.



◆ **Repsol Y.P.F.**

El beneficio social más inmediato y relevante que proporcionará el desarrollo del Proyecto es la automatización de dos de sus plantas piloto, utilizando una metodología abierta que las libera del servilismo de las arquitecturas cerradas de las grandes compañías, contribuyendo así a mantener la competitividad de la empresa a nivel internacional. Para Repsol, como empresa involucrada en la realización del proyecto, el beneficio principal consiste en la posibilidad de actualizar a tiempo plantas piloto, de acuerdo a las nuevas tendencias más avanzadas. Ello implicará inicialmente la adecuación de dos de sus plantas para pasar más tarde a la automatización del resto de las plantas de la compañía.

◆ **Derivados Químicos S.A.**

Mejora en el sistema de control de la planta piloto de “stripping” con vapor. Con ello se podrá lograr disminuir la cantidad de vapor utilizada para realizar el “stripping”, se ahorrará además agua utilizada para la condensación del vapor de agua en exceso utilizado indebidamente, por el mal control de la temperatura de los vapores de cabeza de la torre de “stripping” con vapor. Como consecuencia del mejor control se espera por lo tanto una menor cantidad de agua condensada junto con los disolventes vaporizados en la torre de “stripping”, gracias a esto los disolventes no estarán contaminados con agua que dificulta el posterior tratamiento por incineración. Un mejor control en la separación de fases en nuestros procesos industriales serviría para evitar posteriores tratamientos de purificación y/o pérdidas de producto final.

Conclusión:

La justificación del desarrollo de este proyecto viene dada por dos puntos principales que vienen a resumirse:

- **La construcción de una planta piloto para investigación con fin a mejorar ciertos procesos productivos** muy habituales en la industria y conseguir por tanto mayor rentabilidad, además de su uso docente que consigue un acercamiento del alumnado a la industria.



- **Automatizar** dicha planta con las últimas tecnologías tele-informáticas en el control de producción, **minimizando la intervención humana** y crear sistemas que sean capaces de cerrar un lazo con la mínima intervención del operador.

1.3 -Plantas Piloto

Una planta piloto no es sino la adaptación de un proceso productivo industrial a una escala intermedia entre laboratorio y la propia producción industrial. Generalmente se destinan a la investigación sobre la producción con el fin de obtener mejoras sobre el propio producto, proceso productivo o incluso para la obtención de nuevos productos. Por supuesto también pueden estar destinadas a un uso docente, en universidades o institutos, lo que permite el acercamiento de estas instituciones a la industria.



Figura 1. 1- Columna de destilación portátil de laboratorio.

Hay que distinguir claramente entre lo que es una planta piloto y lo que es una planta de laboratorio (Figura 1.1). La planta piloto, aunque puede tener las mismas dimensiones que una planta de laboratorio, se diferencia de ésta sobre todo en que se puede utilizar para la producción real, debido a que esta primera refleja fielmente tanto



el método como el proceso de fabricación, cosa que en las plantas de laboratorio no tiene porque cumplirse. Normalmente una instalación de laboratorio se usa para la realización de experimentos cuyos resultados se interpolan en la producción.

La utilización de las plantas piloto se lleva a cabo en campos muy diversos de la industria. Debido a ello no hay unas características generales que se puedan aplicar a todas ellas sino que dependerán del campo de la industria en el que se encuentren y de las necesidades que se precisen. Una de esas características que se puede observar a simple vista es el tamaño de la planta que, debido a esas necesidades, puede variar enormemente (Figuras 1.2 y 1.3).



Figura 1. 2-Pequeña planta piloto de fermentación

Un ejemplo del uso de plantas piloto en producción se puede encontrar en la empresa Derivados Químicos S.A. con su planta piloto de electrólisis en la que realiza tanto experimentos de investigación como producción cuando es necesario debido, por ejemplo, a una fuerte demanda.



Figura 1. 3-Planta piloto de gran tamaño.

Estas plantas necesitan, generalmente, estar permanentemente monitorizadas y controladas para su correcto funcionamiento. En la actualidad, los desafíos a los que se enfrenta una empresa moderna son mejorar la calidad de sus productos y la eficiencia de su producción, y al mismo tiempo mantener su responsabilidad medioambiental y de seguridad. La automatización de los sistemas es un contribuyente importante para lograr esas metas.

1.4-Fundamentos de la automatización. Estado del arte.

El control de procesos industriales, tanto desde el punto de vista de las estrategias de control así como de las tecnologías, ha evolucionado de manera muy importante durante las últimas décadas.

La industria química fue una de las primeras en aceptar el concepto de control digital por computador. Las primeras aplicaciones de computadores datan de mediados de la década de 1950, usándose al comienzo sólo para monitorización. Luego el control de lazos cerrados comenzó a ser popular y surgieron las primeras aplicaciones de control digital directo (DDC), así como el control de “set points” desde un computador central. A medida que el tamaño de estos computadores crecía cada vez más, se deseaba



aplicar técnicas más avanzadas de control y optimización, aumentando también la complejidad de su operación y el costo de instalación de estos computadores centrales.

1.4.1-Evolución histórica.

La química industrial, también conocida con el nombre de química técnica o ingeniería química, es la rama de la química que se dedica a transformar compuestos químicos básicos en otros productos químicos de gran demanda. La industria química se ocupa de la extracción y procesamiento de las materias primas, tanto naturales como sintéticas, y de su transformación en otras sustancias con características diferentes de las que tenían originariamente. Estas transformaciones se llevan a cabo mediante una serie de reacciones químicas muy complejas.

La domesticación del fuego fue lo que permitió a la humanidad manipular las primeras artes químicas, pero hasta el siglo XVI no se percibe una actividad productiva organizada. El aumento del nivel de vida y las demandas crecientes de la población en los países industrializados trajeron consigo nuevos requerimientos energéticos y de suministros. Hoy la química es uno de los pilares de la producción primaria de cualquier país desarrollado.

Todo proceso industrial nace en un laboratorio, donde se hacen los cálculos precisos, pero el proyecto del proceso en una planta de producción debe prever aspectos que no se consideran en un laboratorio antes de la puesta en marcha de un proceso de producción. Para ello se construyen las plantas piloto, donde se comprueba la viabilidad del proceso de fabricación y se evalúan los rendimientos y los posibles riesgos sobre un funcionamiento muy parecido al que tendría la planta definitiva.

En la actualidad cualquier proceso químico tiene que seguir una serie de pasos obligados (que asegurarán el perfeccionamiento de dicho proceso) antes de convertirse en proceso industrial (además, no se desarrollará a gran escala hasta que se haya demostrado su rentabilidad). En primer lugar es necesario un estudio detallado en un laboratorio de la viabilidad de las reacciones, estos estudios previos a la utilización de una reacción con fines industriales son esenciales y tienen como objetivo el conocimiento de las condiciones óptimas en las que se debería llevar a cabo una



reacción de forma que se obtenga el máximo rendimiento posible en el menor tiempo. Tras estos primeros estudios se harán ensayos en plantas o instalaciones piloto, momento en el cual habrá que enfrentarse con los problemas prácticos que se plantean en las industrias. Una vez hecho todo esto, el proceso de producción se llevará a cabo en la planta industrial.

Con el paso del tiempo se han ido consiguiendo procesos industriales cada vez más autónomos, es decir, con menos necesidad de manipulación por parte del hombre mediante la aplicación de sistemas automáticos que los controlen total o parcialmente. Estos sistemas ayudan indudablemente en la mejora de los procesos productivos ya que no sólo aportan una gran precisión en la consecución de los puntos de funcionamiento y su mantenimiento sino que también facilitan un estudio detallado del proceso al almacenar todos los datos que sean necesarios.

La automática, se define como la disciplina que se ocupa de los métodos y procedimientos cuya finalidad es la sustitución del operador humano por un operador artificial en la ejecución de una tarea física y mental previamente programada.

La sustitución del trabajo físico humano por el de la máquina es una meta que el hombre ha perseguido, y logrado en mayor o menor medida, desde que inventara el fuego. La sustitución del trabajo mental no ha podido lograrse hasta el presente siglo. Ha sido preciso para ello la invención de máquinas capaces de emular, en parte, el proceso humano de razonamiento y decisión.

El mecanismo clave que confiere a las máquinas su capacidad de control automático es la realimentación (Figura 1.4). Mediante este mecanismo las máquinas son capaces de realizar los procesos de observación de la realidad, abstracción de la misma, comparación con modelos memorizados, obtención de una solución óptima al problema planteado, toma de decisión y actuación, característicos de los procesos animales o humanos.

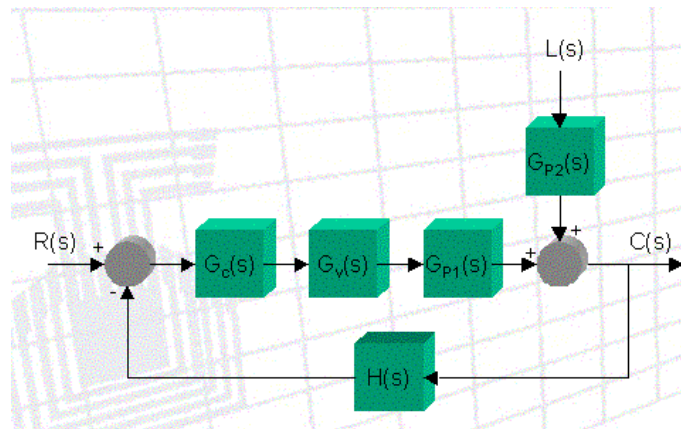


Figura 1. 4-Sistema realimentado.

El primer trabajo significativo en control automático fue el regulador de velocidad centrífugo de James Watt (Figura 1.5) para el control de la velocidad de una máquina de vapor, en el siglo XVIII. Minorsky, Hazen y Nyquist, entre muchos otros, aportaron trabajos importantes en las etapas iniciales del desarrollo de la teoría de control. [4]

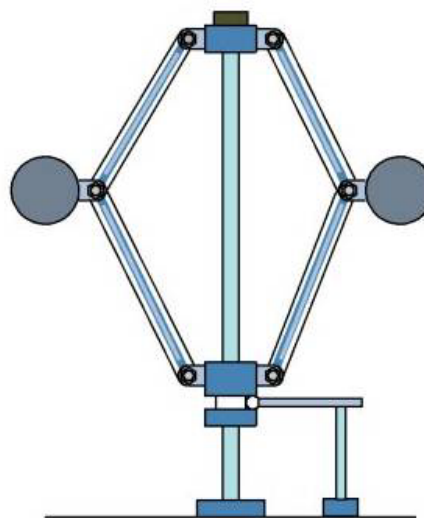


Figura 1. 5-Regulador centrífugo de James Watt.

En 1922, Minorsky trabajó en los controladores automáticos para dirigir embarcaciones, y mostró que la estabilidad puede determinarse a partir de las ecuaciones diferenciales que describen el sistema. En 1932, Nyquist diseñó un procedimiento relativamente simple para determinar la estabilidad de sistemas en lazo cerrado, con base en la respuesta en lazo abierto en estado estable cuando la entrada



aplicada es una senoidal. En 1934, Hazen, quien introdujo el término servomecanismo para los sistemas de control de posición, analizó el diseño de los servomecanismos capaces de seguir con precisión una entrada cambiante.

Durante la década de los cuarenta, los métodos de la respuesta en frecuencia hicieron posible que los ingenieros diseñaran sistemas de control lineales en lazo cerrado que cumplieron con los requerimientos de desempeño. A finales de los años cuarenta y principios de los cincuenta, se desarrolló por completo el método del lugar geométrico de las raíces propuesto por Ewars.

Los métodos de respuesta en frecuencia y del lugar geométrico de las raíces, que forman el núcleo de la teoría de control clásica, conducen a sistemas estables que satisfacen un conjunto más o menos arbitrario en requerimientos de desempeño. En general estos sistemas son aceptables pero no óptimos en forma significativa. Desde el final de la década de los cincuenta, el énfasis en los problemas de diseño de uno de los muchos sistemas que trabajen apropiadamente al diseño de un sistema óptimo de algún modo significado

Conforme las plantas modernas con muchas entradas y salidas se vuelven más y más complejas, la descripción de un sistema de control moderno requiere de una gran cantidad de ecuaciones. La teoría del control clásica, que trata de los sistemas con una entrada y una salida, pierde su solidez ante sistemas con entradas y salidas múltiples. Desde alrededor de 1960 debido a que la disponibilidad de los computadores digitales hizo posible el análisis en el dominio del tiempo y la síntesis a partir de variables de estados, se ha desarrollado para enfrentar la creciente complejidad de las plantas modernas y los requerimientos limitativos respecto de la precisión, en el peso y el costo en aplicaciones militares, espaciales e industriales.

Durante los años comprendidos entre 1960 y 1980 se investigaron a fondo el control óptimo tanto de sistemas determinísticos como estocásticos, y el control adaptable, mediante el aprendizaje de sistemas complejos. De 1989 a la fecha, los descubrimientos en la teoría de control moderna se centraron en el control robusto.



En la siguiente figura podemos observar un diagrama ilustrativo de la historia del control automático y sus diferentes ramas. Las necesidades derivadas del desarrollo industrial y tecnológico (aviación, navegación, comunicaciones, energía, etc.) provocan a su vez el avance y la creación de las distintas técnicas y sistemas de control (Figura 1.6). La Universidad constituye una importante base en la que han sido creadas gran parte de estas teorías debido al estudio e investigación en estos campos.

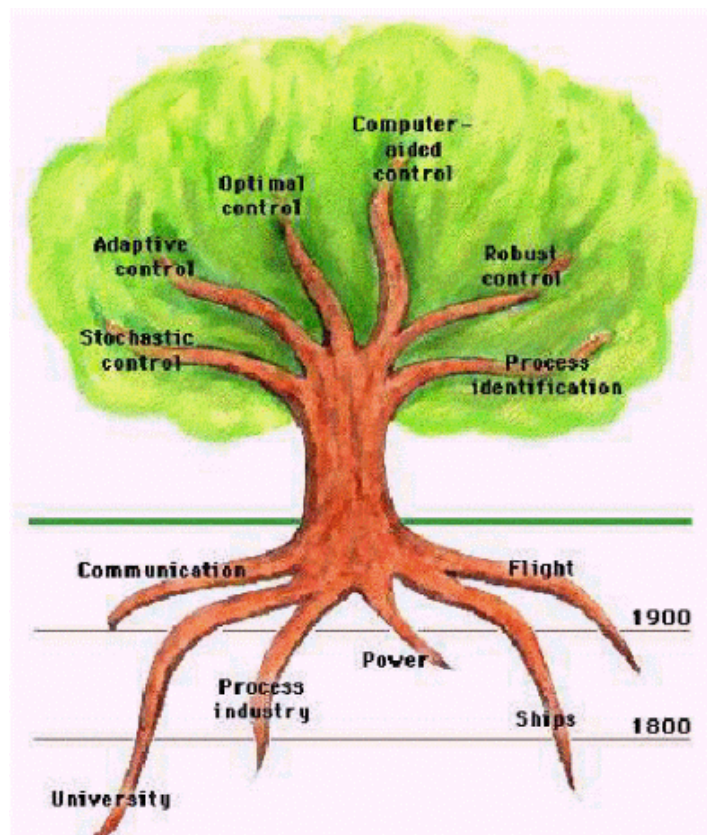


Figura 1. 6-Árbol del control automático

Ahora que los computadores digitales son más compactos, se usan como parte integral de los sistemas de control. Las aplicaciones recientes de la teoría de control moderna incluyen sistemas ajenos a la ingeniería.



Atendiendo a la configuración de los sensores y el equipo de gobierno del proceso se destacan tres configuraciones principales: el control centralizado, el control descentralizado y el control distribuido. [5]

• **El control centralizado** consiste en un único procesador central que controla todas las entradas y salidas del sistema (Figura 1.7).

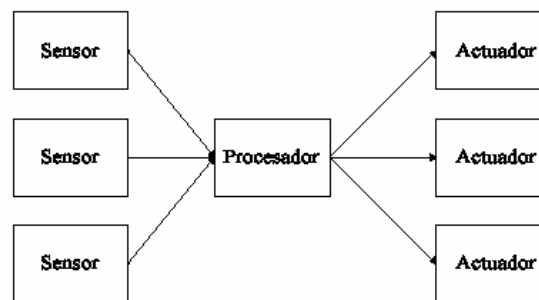


Figura 1. 7-Sistema de control centralizado.

Este tipo de sistemas presenta como inconvenientes que se necesita mucho cableado y si falla el procesador central deja de funcionar todo el sistema.

• **En el control descentralizado** los elementos de campo (sensores y actuadores) son inteligentes característica que les otorga una gran autonomía, frente a los elementos convencionales los cuales deben estar continuamente siendo controlados por la CPU. Esta inteligencia permite que se comuniquen mediante un bus sin necesidad de CPU que los gobierne; estos elementos suelen ser bastante caros, las herramientas de desarrollo son complicadas y la cantidad de diseños es limitada (Figura1.8).

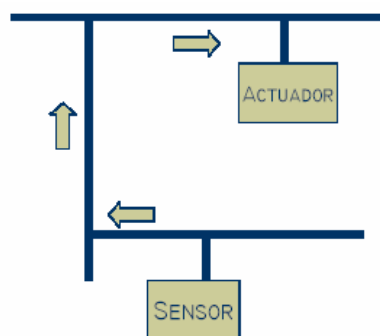


Figura 1. 8-Sistema de control descentralizado



• **Un sistema de control distribuido**, consta básicamente de un conjunto de autómatas, capaces de funcionar y realizar tareas independientes entre ellos, y conectados entre sí a través de un bus de comunicación común, formando una red descentralizada del sistema de control (Figura 1.9). Presenta varias ventajas con respecto a los anteriores como por ejemplo que el coste por E/S es más ventajoso, hay posibilidad de utilizar elementos estándar, es escalable simplemente añadiendo instrumentos al bus o a las tarjetas, en caso de avería de un nodo el sistema no cae completamente.

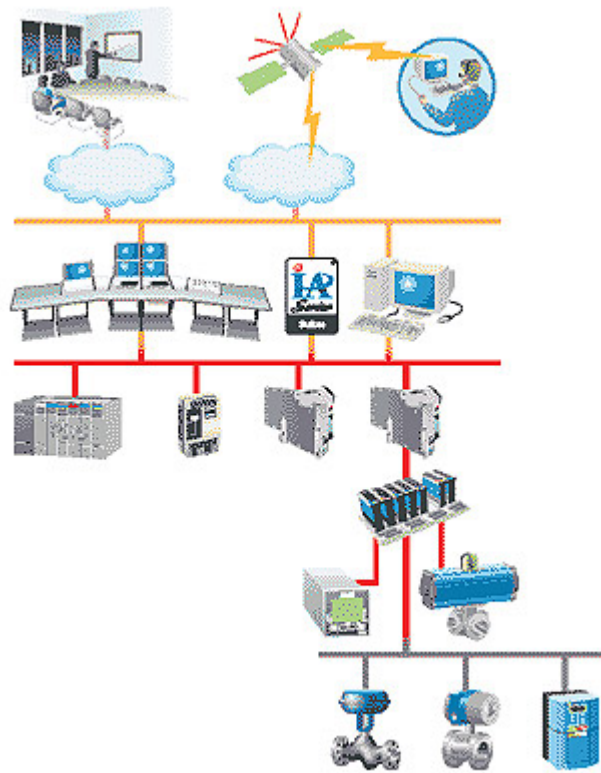


Figura 1. 9-Esquema de un sistema de control distribuido.

Es un tipo de sistema de control originado a partir de los ordenadores centrales de control de proceso utilizados en los años 60. Estos sistemas fueron desarrollados para los procesos de flujo continuo que requerían lazos de regulación analógicos. Se trata de sistemas en tiempo real y tolerantes a fallos para aplicaciones complejas de producción por lotes. A lo largo del tiempo han ido evolucionando, pasando del uso de software y hardware propietarios a sistemas basados en sistemas operativos como UNIX y Windows NT.



1.4.2-Sistemas distribuidos.

En las industrias modernas se tiende hacia una automatización total de los procesos de producción, debido a las exigencias cada vez mayores de calidad en los productos finales, tendencia hacia el residuo-cero (“0-waste”) y a la economía en gasto energético, de materias primas y de mano de obra. Además, la complejidad de los actuales sistemas industriales y la gran cantidad de datos sobre el proceso disponibles, sobre todo desde la popularización de los sistemas de control distribuido (DCS), hacen que sea necesario un sistema supervisor inteligente que analice las regiones alcanzables dentro del espacio creado por los requerimientos generales y específicos, que genere consignas coherentes y factibles a cada uno de los lazos de control, que estudie “on-line” el rendimiento de cada uno de los lazos y permita una resintonización de los menos eficaces. Las exigencias de los clientes provocan además que las plantas tengan que estar preparadas para adaptarse rápidamente a nuevas consignas de producción, y ello exige flexibilidad en los mecanismos de control.

La estructura de un sistema capaz de tratar estas exigencias ha de basarse en un esquema de control jerárquico estructurado en tres niveles:

1) **Bajo nivel:** controladores que regulan los lazos sencillos. Tradicionalmente se han empleado controladores PID.

2) **Nivel medio:** establece las consignas de los controladores de bajo nivel. Tradicionalmente se utiliza un experto humano.

3) **Alto nivel:** decide las estrategias a seguir cuando se producen cambios globales en la producción de la planta. Tradicionalmente se utiliza un experto humano.

Los sistemas inteligentes pueden utilizarse en los tres niveles los lazos sustituyendo a los PID's, etc.; en el nivel intermedio, para generar las consignas de los controladores de bajo nivel; en el nivel de supervisión, para establecer cambios globales en la producción y monitorizar el comportamiento general del proceso.



Fases vitales de la automatización

Las fases vitales de la automatización de un sistema son:

- **Modelado**
- **Visualización**
- **Plan de control**
- **Aplicación.**

Cualquier proceso, mecánico, químico, aeronáutico, etc., debe entenderse antes de que pueda mejorarse. Los recientes adelantos en software del modelado dinámico para los sistemas de eventos continuos y discretos, hacen más fácil desarrollar simulaciones de problemas del mundo real, técnicamente definidos como complejos (procesos multivariables no lineales). Las técnicas de diseño de sistemas de control multivariable y control adaptable, pueden mejorar la actuación de los procesos que cambian con el tiempo. Las técnicas inteligentes usan redes neuronales, algoritmos genéticos y lógica difusa para lograr el control de sistemas con características inciertas.

De la visualización e interacción con el proceso se encarga el sistema SCADA, que proviene de las siglas de "Supervisory Control And Data Acquisition", es decir: adquisición de datos y control de supervisión. Se trata de una aplicación software especialmente diseñada para funcionar sobre ordenadores en el control de producción, proporcionando comunicación con los dispositivos de campo (controladores autónomos, autómatas programables, etc.) y controlando el proceso de forma automática desde la pantalla del ordenador. Además, provee de toda la información que se genera en el proceso productivo a diversos usuarios, tanto del mismo nivel como de otros supervisores dentro de la empresa: control de calidad, supervisión, mantenimiento, etc.

[6]

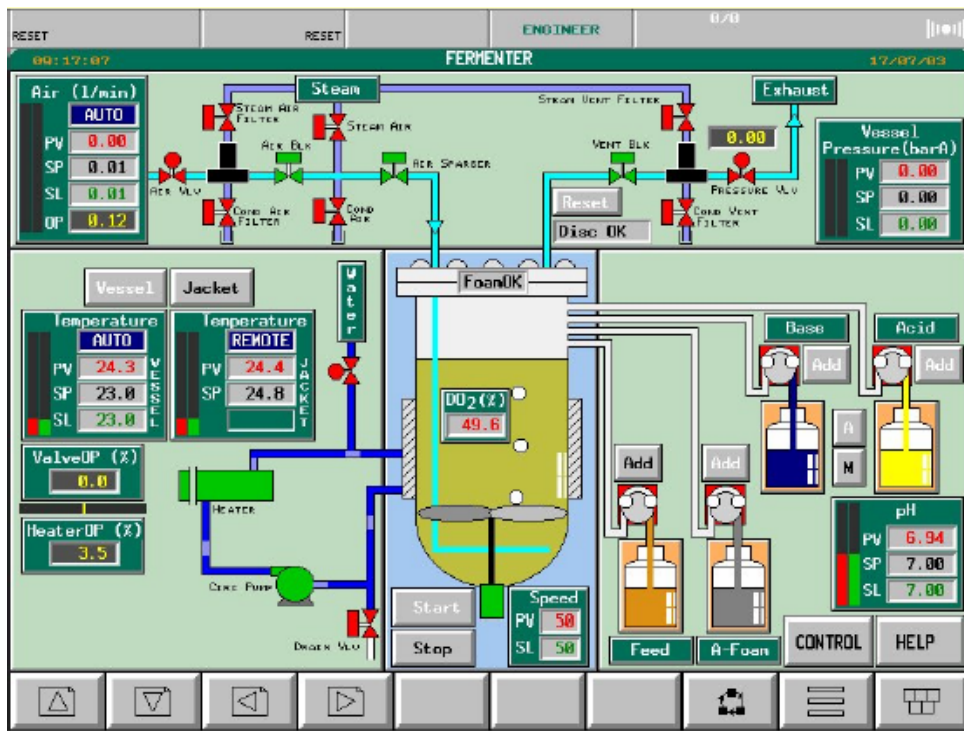


Figura 1. 10-Ejemplo de una pantalla del SCADA Eurotherm de un fermentador.

En este tipo de sistemas usualmente existe un ordenador, que efectúa tareas de supervisión y gestión de alarmas, así como tratamiento de datos y control de procesos. La comunicación se realiza mediante buses especiales o redes LAN. Todo esto se ejecuta normalmente en tiempo real, y están diseñados para dar al operador de planta la posibilidad de supervisar y controlar dichos procesos. Los programas necesarios, y en su caso el hardware adicional que se necesite, se denomina en general sistema SCADA. En la Figura 1.10 se muestra un ejemplo de una pantalla de operador de un SCADA de Eurotherm para un proceso industrial. Como se observa el número de elementos y variables que se pueden incluir en la pantalla puede ser bastante elevado, como es este caso o más limitado como se observa en la Figura 1.11. Las características del proceso determinarán la cantidad de variables, tanto de observación como de actuación, que se deben mostrar en cada caso.

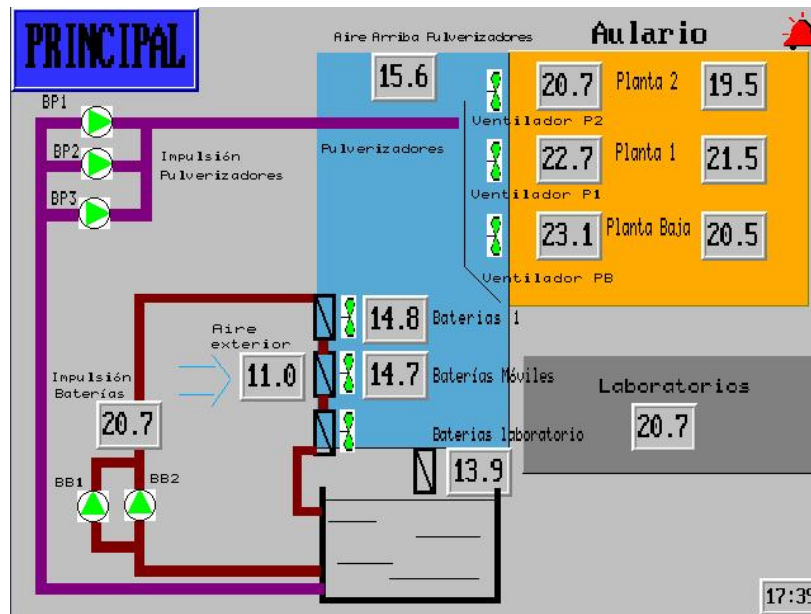


Figura 1. 11-Pantalla del SCADA de parte del sistema de climatización de un edificio inteligente.

Un paquete **SCADA** debe estar en disposición de **ofrecer las siguientes prestaciones:**

- Posibilidad de **crear paneles de alarma**, que exigen la presencia del operador para reconocer una parada o situación de alarma, con registro de incidencias.
- **Generación de históricos** de señal de planta, que pueden ser volcados para su proceso sobre una hoja de cálculo.
- Ejecución de programas, que modifican la ley de control, o incluso anular o **modificar las tareas asociadas al autómata**, bajo ciertas condiciones.
- Posibilidad de **programación numérica**, que permite realizar cálculos aritméticos de elevada resolución sobre la CPU del ordenador.

Con ellas, se pueden desarrollar aplicaciones para ordenadores (tipo PC, por ejemplo), con captura de datos, análisis de señales, presentaciones en pantalla, envío de resultados a disco e impresora, etc.



Además, todas estas acciones se llevan a cabo mediante un paquete de funciones que incluye zonas de programación en un lenguaje de uso general (como C, Pascal, o Basic), lo cual confiere una potencia muy elevada y una gran versatilidad. Algunos SCADA ofrecen librerías de funciones para lenguajes de uso general que permiten personalizar de manera muy amplia la aplicación que desee realizarse con dicho SCADA.

Un **SCADA debe cumplir varios objetivos** para que su instalación sea perfectamente aprovechada:

- Deben ser **sistemas de arquitectura abierta**, capaces de crecer o adaptarse según las necesidades cambiantes de la empresa.
- Deben **comunicarse con total facilidad y de forma transparente al usuario** con el equipo de planta y con el resto de la empresa (redes locales y de gestión).
- Deben ser programas sencillos de instalar, sin excesivas exigencias de hardware, y **fáciles de utilizar**, con interfaces amigables con el usuario.

Los módulos o bloques software que permiten las actividades de adquisición, supervisión y control son los siguientes:

- **Configuración:** permite al usuario definir el entorno de trabajo de su SCADA, adaptándolo a la aplicación particular que se desea desarrollar.
- **Interfaz gráfico del operador:** proporciona al operador las funciones de control y supervisión de la planta. El proceso se representa mediante sinópticos gráficos almacenados en el ordenador de proceso y generados desde el editor incorporado en el SCADA o importados desde otra aplicación durante la configuración del paquete.
- **Módulo de proceso:** ejecuta las acciones de mando preprogramadas a partir de los valores actuales de variables leídas.
- **Gestión y archivo de datos:** se encarga del almacenamiento y procesado



ordenado de los datos, de forma que otra aplicación o dispositivo pueda tener acceso a ellos.

- **Comunicaciones:** se encarga de la transferencia de información entre la planta y la arquitectura hardware que soporta el SCADA, y entre ésta y el resto de elementos informáticos de gestión.

1.5 -Objetivos del proyecto.

Con todo lo expuesto anterior mente se pueden plantear los objetivos principales que se persiguen con la construcción de esta planta:

- **Diseño de una planta piloto** basada en procesos industriales reales que muestren alguna característica de interés para su estudio sobre todo en el ámbito del control de procesos, aunque también se tendrán en cuenta otros factores como los medioambientales o los productivos.
- **Simulación de los procesos principales** de los que se compone la planta piloto mediante el uso de herramientas informáticas para obtener una previsión de funcionamiento de la planta además de posibles mejoras a realizar en el diseño.
- **Supervisión y colaboración en la construcción de la planta piloto y su posterior instalación** en el laboratorio del departamento de la Universidad para poder ser utilizada tanto en investigación por el personal correspondiente como en labores de docentes con el fin de acercar los sistemas de control automático y los procesos industriales, así como los elementos que intervienen en ellos (instrumentación de campo y actuadores), al alumnado.
- **Elección un sistema de control automático** adecuado a las necesidades de la planta así como cuantificar y seleccionar los **sensores y actuadores** que se precisen para crear los lazos de control precisos que permitan el correcto funcionamiento automático del sistema.



2.- Estudio, Modelización y Simulación de los Procesos.

2.1- Visita a empresas colaboradoras. Estudio de problemática y elección de procesos.

Para el desarrollo de los objetivos contemplados en el proyecto fue necesario visitar las empresas colaboradoras, más concretamente de sus plantas industriales y de las plantas piloto que dichas empresas poseen, para ver el funcionamiento las mismas, el modo de construcción y los diferentes problemas de control que se pudieran plantear en las plantas industriales, para de este modo decidir los procesos mas adecuados para el diseño de la nueva planta para la universidad.

La elección de los procesos que se incluirían finalmente en la planta fue tomada teniendo en cuenta dos puntos principales: la gran utilización de los mismos por parte de las empresas y la utilidad no sólo en producción sino también en temas medioambientales, como pueden ser el retirado de disolventes mediante destilación o la recuperación de los refrigerantes de los reactores para su posterior reutilización.

Con estas premisas, tras la visita a las empresas y teniendo en cuenta sus necesidades, se consideró que el proceso más adecuado para la implantación era el de una columna de destilación binaria porque puede ayudar a conseguir una mejora en el proceso productivo de las dos empresas, puesto que ambas utilizan columnas de destilación en sus procesos productivos, y además porque permite el estudio de nuevas técnicas de control avanzado con procesos no lineales.

2.1.1- Funcionamiento básico de una columna de destilación.

Para poder comprender la problemática en este tipo de procesos es necesario tener unos conocimientos básicos sobre el funcionamiento de una columna de destilación, tema que se trata en el presente apartado dando una descripción conceptual del modo de operación de una columna de destilación binaria (dos componentes). [7, 8, 9, 10, 11]

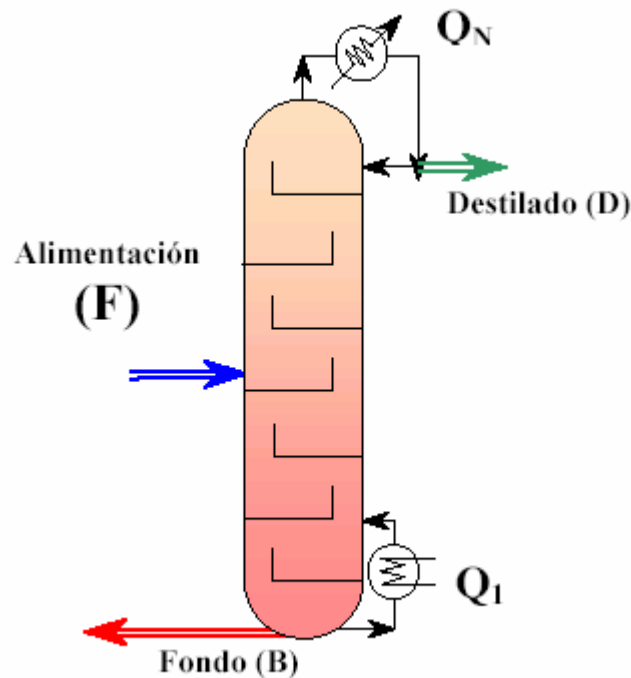


Figura 2. 1-Modelo de una columna de destilación

La alimentación entra normalmente muy cerca de la mitad de la columna (aunque la posición de la misma es variable según las especificaciones de la columna), como se muestra en la Figura 2.1 El vapor fluye de una etapa hacia la etapa inmediatamente superior, mientras que el líquido fluye desde una etapa hacia la etapa inmediatamente inferior de la columna. El vapor de la etapa superior se condensa (retirando un calor Q_N) obteniendo un líquido en el condensador de cabeza y una parte de ese líquido vuelve a la columna como reflujo. El resto es retirado como una corriente de producto en cabeza (o destilado D); esta corriente contiene una cantidad concentrada en el componente ligero. Del mismo modo, una parte del líquido del fondo de la columna es retirada como producto de fondo (B); esta corriente contiene una cantidad concentrada en el componente pesado, siendo el resto vaporizado en el hervidor (con un aporte de calor Q_i) y devuelto a la columna en forma de vapor (VB).

El líquido que atraviesa un plato de la columna cae en cascada hacia el inmediatamente inferior a través de una bajante (*downcomer*). A medida que el líquido circula por la superficie del plato, entra en contacto con el vapor de la etapa inmediatamente inferior.



Generalmente, el hecho de que el vapor de la etapa inferior entre en contacto con el líquido promueve la mezcla turbulenta. Asumiendo que la mezcla es perfecta.

2.1.2 - Problemática de las columnas de destilación.

La gente que no trabaja en el mundo del control de las operaciones de destilación se pregunta con frecuencia si existen todavía problemas sin resolver. La respuesta definitiva es sí. Aunque resulte desconcertante, teniendo en cuenta que contamos con 40 años de trabajo intensivo en esta área. La razón es triple:

1) **El control en las operaciones de destilación es un problema difícil** en sí mismo, o al menos es complejo encontrar un sistema de control apropiado.

2) Mucha de la investigación que se ha desarrollado sobre control estaba enfocada a **probar ciertas teorías de control en particular**, más que intentar controlar en particular ciertas *columnas de destilación*.

3) Se han hecho **muchos estudios de simulación** de los que es difícil deducir resultados generales.

Alguno de los problemas encontrados en el control de la composición para columnas de destilación (en particular para columnas que exigen gran pureza con altos caudales de reflujo) son: comportamiento fuertemente no lineal, lentitud en la respuesta, perturbaciones que afectan en gran medida a las composiciones, medida de las composiciones a menudo difíciles de obtener, uso de medidas de temperatura en sustitución, gran número de opciones a la hora de escoger las variables manipuladas y, en general, un sistema con fuertes interacciones.

La Industria en la actualidad.

Debido a los problemas anteriormente mencionados, muy pocas columnas industriales operan controlando las dos composiciones de producto directamente (destilado y fondo). En muchos casos se tiende a mantener constante una temperatura interior de la columna manipulando el reflujo L , mientras que el caudal de vapor en el fondo V se ajusta manualmente (también se pueden intercambiar los papeles entre L y



V). El hecho de mantener esa temperatura interior en un valor fijo no es un objetivo de control, el objetivo es la composición, y la temperatura se emplea para inferir (con los problemas que eso implica y que llevan a utilizar compensadores). Además, con la intención de hacer las columnas menos sensibles a las perturbaciones, los productos se suelen mantener a niveles de pureza superiores a sus especificaciones (o a sus valores óptimos) mediante un sobrereflejo de la columna. Como ejemplo de lazos de control convencionales podemos observar la Figura 2.2. en la cual se realizan controles independientes para el fondo y cabeza de la columna.

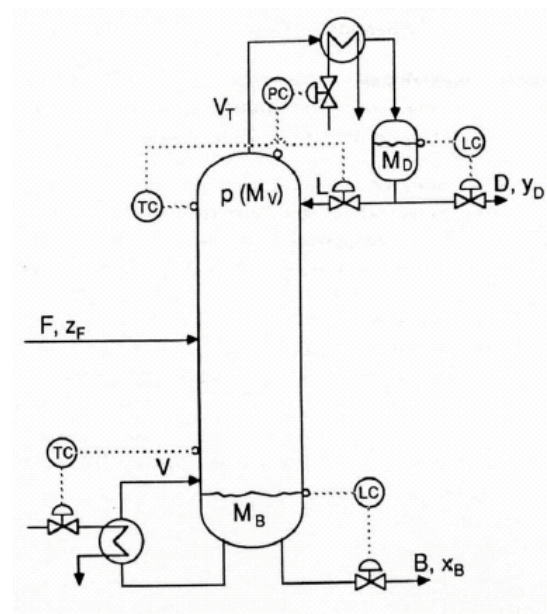


Figura 2. 2- Esquema de un control convencional para una columna

Esto conlleva una serie de desventajas:

- **Excesivo consumo** de energía.
- **Bajo rendimiento.**
- **Baja producción** debido a la sobreespecificación del producto.
- **No permite cambios** (por ejemplo en la alimentación o en una optimización de la planta) sin tener que volver a configurar la columna y como consecuencia, crea tensiones en los operadores.



Esta última desventaja es la más costosa, debido a que los operarios se resisten al cambio de operación en la planta y a que la optimización en línea de la planta puede ser de difícil implantación. [7]

2.2-Introducción a la destilación.

Cuando se ponen en contacto dos fases que tienen diferente composición es posible que ocurra la transferencia de algunos de los componentes presentes de una fase hacia la otra y viceversa. Esto constituye la base física de las operaciones de transferencia de masa. Si se permite que estas dos fases permanezcan en contacto durante un tiempo suficiente, se alcanzará una condición de equilibrio bajo la cual no habrá ya transferencia neta de componentes entre las fases.

En la mayor parte de los casos de interés que se presentan en las operaciones de transferencia de masa, las dos fases tienen una miscibilidad limitada, de tal forma que en el equilibrio existen dos fases que pueden separarse una de la otra. Con frecuencia, estas fases tienen composiciones diferentes entre sí y distintas también de la composición también de la composición que tenía cada fase antes de ponerse en contacto con la otra.

Como resultado de lo anterior, las cantidades relativas de cada uno de los componentes que han sido transferidas entre las fases, son distintas, lográndose de esta forma una separación. Bajo condiciones adecuadas, la acción repetida de poner las fases en contacto y separarlas a continuación, puede conducir a la separación casi completa de los componentes. Las diferencias en composición que presentan las fases en equilibrio, constituyen la base física para los procesos de separación que utilizan equipos con etapas múltiples.

Se puede considerar cada plato o etapa como un bloque con su propia función de transferencia. De tal modo que añadiendo los bloques de la cabeza y fondo, y tomando este bloque como una etapa genérica en igual número de platos que en la columna que se desea modelar, si se relacionan estos bloques es posible obtener un modelo completo de la columna, simplificando bastante el proceso de modelización como muestra el diagrama de la Figura 2.3.

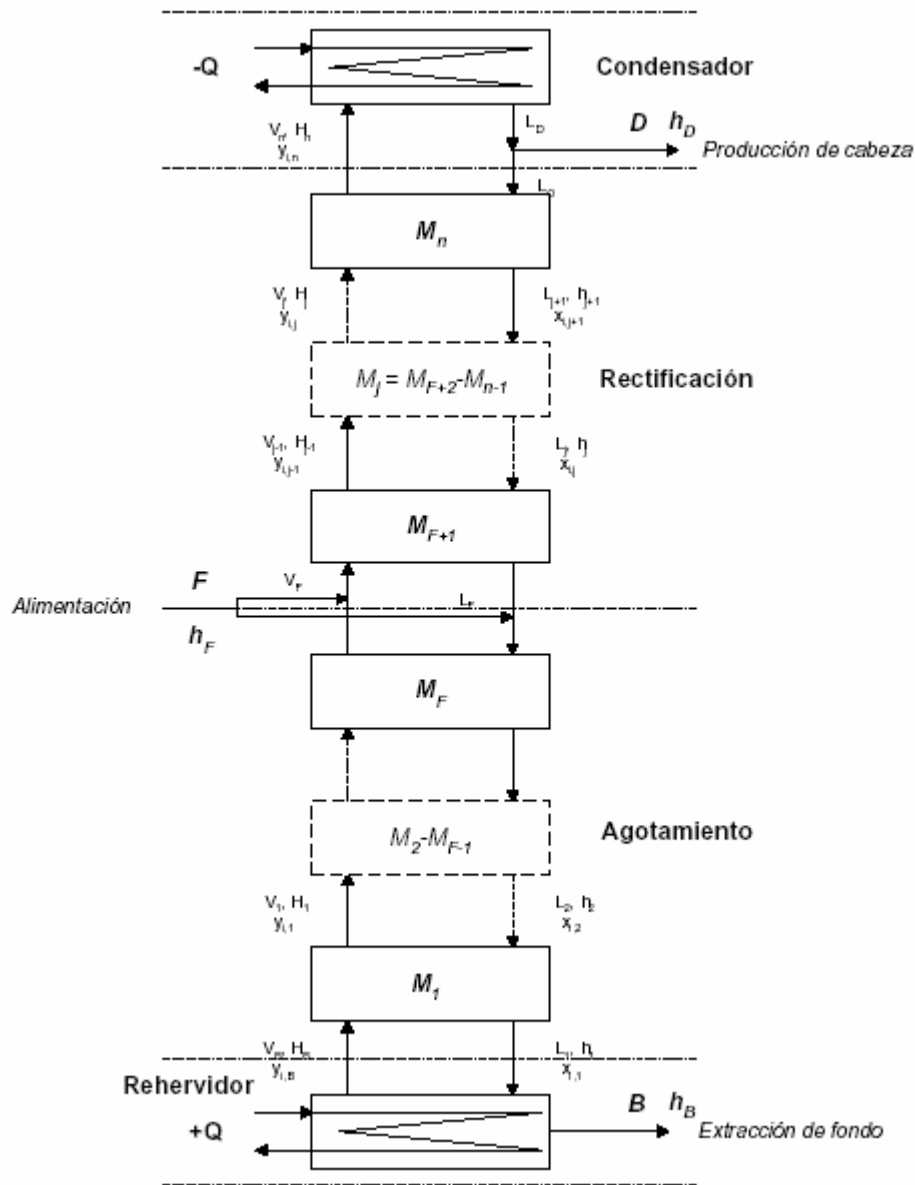


Figura 2. 3- Diagrama de bloques de una columna de destilación.

Cuando se plantea el problema de separar los componentes que forman una mezcla homogénea, se deben aprovechar las diferencias que existen en las propiedades de los constituyentes que forman la mezcla para efectuar su separación. Se analizan las diversas propiedades químicas y físicas de los constituyentes, con el objeto de determinar en cuales de esas propiedades se observa una mayor diferencia entre los componentes ya que por lo general, cuanto mayor sea la diferencia de alguna propiedad,



más fácil y económica será la separación deseada. Resulta evidente que se deben tomar en consideración muchos otros factores al seleccionar una ruta de separación para un proceso. Los requerimientos de energía, el costo y disponibilidad de los materiales de construcción y de proceso, así como la integración con el resto del proceso químico, son factores que contribuyen para determinar cual proceso de separación ofrece un mayor atractivo desde el punto de vista económico.

El proceso de separación más utilizado en la industria química es la destilación. Esta operación unitaria también es conocida como fraccionamiento o destilación fraccionada. La separación de los constituyentes se basa en las diferencias de volatilidad. En la destilación, **una fase de vapor se pone en contacto con una fase líquido, transfiriéndose masa del líquido al vapor y del vapor al líquido**. Por lo general, el líquido y el vapor contienen los mismos componentes aunque en distintas proporciones. El líquido se encuentra a su temperatura de burbuja, mientras que el vapor en equilibrio esta a su temperatura de rocío. En forma simultanea, se transfiere masa desde el líquido por evaporación y desde el vapor por condensación. La evaporación y condensación involucran calores latentes de vaporización de cada componente y por ello, al calcular una destilación deben considerarse los efectos del calor.

La destilación se utiliza mucho para **separar mezclas líquidas** en componentes más o menos puros. Debido a que la destilación implica evaporación y condensación de la mezcla, es una operación que necesita grandes cantidades de energía.

Una gran ventaja de la destilación es que no es necesario añadir un componente a la mezcla para efectuar la separación.

Las **aplicaciones** de la destilación son muy **diversas**. El oxígeno puro que se utiliza en la fabricación de acero, en las naves espaciales y en aplicaciones medicinales, se produce mediante destilación del aire previamente licuado. Las fracciones del petróleo (tales como gases ligeros, nafta, gasolina, queroseno, gasóleo, aceites lubricantes y asfalto) se obtienen en grandes columnas de destilación a las que se alimenta el crudo. Estas fracciones se procesan después para obtener los productos



finales y, con frecuencia, la destilación también interviene en las etapas intermedias de este proceso.

Para la destilación se utilizan **varios tipos de dispositivos**, como, por ejemplo, los rellenos vaciados u ordenados y las bandejas o platos, para que las dos fases (líquido y vapor) entren en contacto íntimo. Los platos se colocan uno sobre otro y se encierran en una cubierta cilíndrica para formar una columna, como muestra la Figura 2.4, tomada en el momento de montaje de los platos en el interior de la cubierta.



Figura 2. 4- Ensamblaje columna Planta Piloto

El **material de alimentación** que se debe separar en fracciones se introduce a la columna. Debido a la diferencia de gravedad entre la fase de vapor y la líquida, el



líquido corre hacia debajo de la columna, cayendo en cascada de plato a plato, mientras que el vapor asciende por la columna, para entrar en contacto con el líquido en cada uno de los platos.

El líquido que llega al fondo de la columna se vaporiza parcialmente en un rehervidor calentado para proporcionar vapor rehervido que asciende por la columna. El resto del líquido se retira como producto del fondo. El vapor que llega a la parte superior de la columna se enfría y condensa como líquido en el condensador superior. Parte de este líquido regresa a la columna como reflujo, para proporcionar un derrame líquido. El resto de la corriente superior se retira como producto de destilado o superior.

Este patrón de flujo en el domo de la columna de destilación proporciona un contacto, a contracorriente de las corrientes de vapor y líquido, en todos los platos de la columna. Las fases de vapor y líquido en un plato dado se acercan a los equilibrios de temperatura, presión y composición, hasta un punto que depende de la eficiencia del plato de contacto.

Los **componentes más ligeros** (de punto de ebullición más bajo) tienden a concentrarse en la **fase de vapor**, mientras que los **más pesados** (de punto de ebullición más alto) tienden a la **fase líquida**. El resultado es una fase de vapor que se hace más rica en componentes ligeros al ir ascendiendo por la columna, y una fase líquida que se va haciendo cada vez más rica en componentes pesados conforme desciende en cascada. La separación general que se logra entre el producto superior y el del fondo depende primordialmente de las volatilidades relativas de los componentes, el número de platos de contacto y de la relación de reflujo de la fase líquida a la de vapor.

Si la diferencia en volatilidad (y por tanto en punto de ebullición) entre los dos componentes es grande, puede realizarse fácilmente la separación completa en una destilación individual. El agua del mar, por ejemplo, que contiene un 4% de sólidos disueltos (principalmente sal común), puede purificarse fácilmente evaporando el agua, y condensando después el vapor para recoger el producto: agua destilada. Para la mayoría de los propósitos, este producto es equivalente al agua pura, aunque en realidad



contiene algunas impurezas en forma de gases disueltos, siendo la más importante el dióxido de carbono.

Si los puntos de ebullición de los componentes de una mezcla sólo difieren ligeramente, no se puede conseguir la separación total en una destilación individual. Un ejemplo importante es el caso que nos ocupa: la separación de agua, que hierve a 100°C , y alcohol, que hierve a $78,5^{\circ}\text{C}$. Si se hierve una mezcla de estos dos líquidos, el vapor que sale es más rico en alcohol y más pobre en agua que el líquido del que procede, pero no es alcohol puro. Con el fin de concentrar una disolución que contenga un 10% de alcohol (como la que puede obtenerse por fermentación) para obtener una disolución que contenga un 50% de alcohol (frecuente en el güisqui), el destilado ha de destilarse una o dos veces más, y si se desea alcohol industrial (95%) son necesarias varias destilaciones. [8]

En el proceso de destilación más simple se parte de una acumulación de componentes en el fondo de un depósito. El proceso de destilación se inicia con la introducción de energía en el fondo del depósito. Antiguamente esto se realizaba mediante el control de la viveza del fuego (Figura 2.5), es decir, la combinación de combustible (madera) y aire. Cuanto más vivo era el fuego, mayor cantidad de líquido se evaporaba. Para conseguir la pureza adecuada del alcohol el proceso de destilación se debe hacer poco a poco para evitar que se arrastre agua desde el fondo del depósito a la cabeza del alambique, ya que esto empobrecería el producto final.

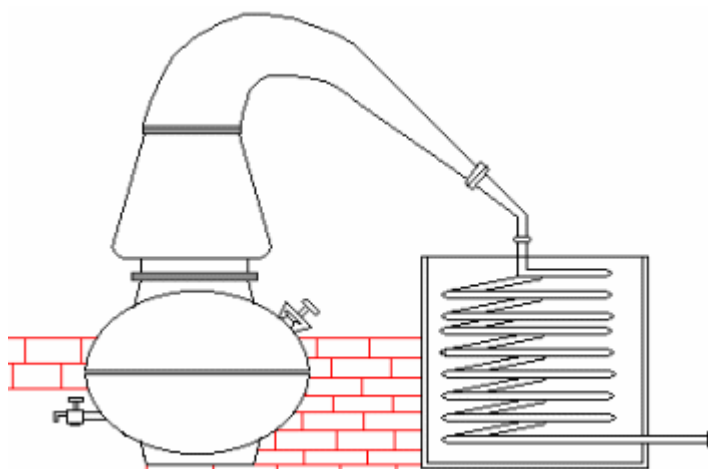


Figura 2. 5- Esquema de un alambique.



Por otro lado la temperatura del fondo no es el único parámetro que hay que tener en cuenta para poder controlar el proceso de destilación. El parámetro físico que afecta directamente a la volatilidad de los componentes es la presión. A diferentes presiones la volatilidad de un componente es diferente o, interpretado de otra manera, un producto presenta diferentes presiones de vapor para diferentes temperaturas. El concepto de presión de vapor indica la relación de presión y temperatura a la cual empezaría a bullir un componente. Cada producto presenta unas características de presión de vapor y, precisamente, es esta diferencia la que se utiliza para poder destilar diferentes componentes.

2.2.1 -Partes principales de una torre de destilación.

Las torres de platos son cilindros verticales en que el líquido y el gas se ponen en contacto en forma de pasos sobre platos. El líquido entra en la parte superior y fluye en forma descendente por gravedad. En el camino fluye a través de cada plato y a través de un conducto, al plato inferior. El gas pasa hacia arriba, a través de orificios de un tipo u otro en el plato; entonces burbujea a través del líquido para formar una espuma, se separa de la espuma y pasa al plato superior. El efecto global es un contacto múltiple a contracorriente entre el gas y el líquido, aunque cada plato se caracteriza por el flujo transversal de los dos. Cada plato en la torre es una etapa, puesto que sobre el plato se ponen los fluidos en contacto íntimo, ocurre la difusión interfacial y los fluidos se separan (Figura 2.6).

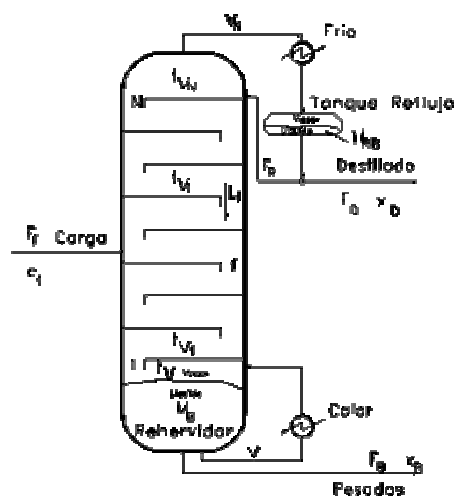


Figura 2. 6- Esquema columna de destilación de platos.



El número de platos teóricos o etapas en el equilibrio en una columna o torre sólo depende de lo complicado de la separación que se va a llevar a cabo y sólo depende de lo complicado de la separación que se va a llevar a cabo y sólo está determinado por el balance de materia y las consideraciones acerca del equilibrio. La eficiencia de la etapa o plato y por lo tanto, el número de platos reales se determina por el diseño mecánico utilizado y las condiciones de operación.

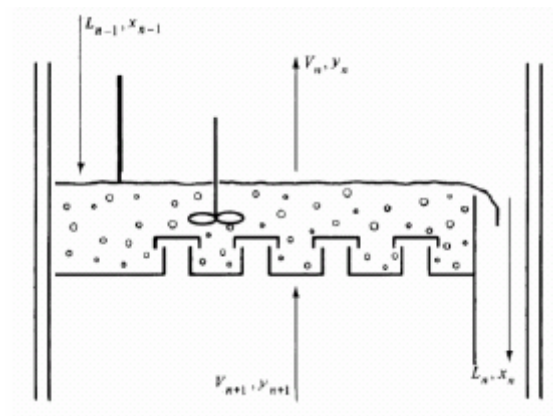


Figura 2. 7- Esquema de un plato.

Los principales **tipos de platos** (Figura 2.7) son los siguientes:

➤ **Vertederos:** El líquido se lleva de un plato al siguiente mediante los vertederos. Estos pueden ser tuberías circulares o, de preferencia, simples partes de la sección transversal de la torre eliminadas para que el líquido fluya por los platos verticales. Puesto que el líquido se agita hasta formar una espuma sobre el plato, debe permitirse que permanezca un tiempo adecuado en el vertedero para permitir que el gas se separe del líquido, de tal forma que sólo entre líquido claro en el plato inferior. El vertedero debe colocarse lo suficientemente cerca del plato inferior como para que se una al líquido en ese plato, así se evita que el gas ascienda por el vertedero para acortar el camino hacia el plato superior.

➤ **Derramaderos:** La profundidad del líquido sobre el plato, requerida para el contacto con el gas, se mantiene mediante un derramadero, que puede ser o no continuación del plato de descenso

➤ **Platos Perforados:** Su bajo costo ha hecho que se conviertan en los platos más importantes. La parte principal del plato es una hoja horizontal de metal perforado,



transversal al cual fluye el líquido; el gas pasa en forma ascendente a través de las perforaciones.

En el esquema aparecen numerados los principales elementos (Figura 2.8) de los que se compone una torre de destilación.

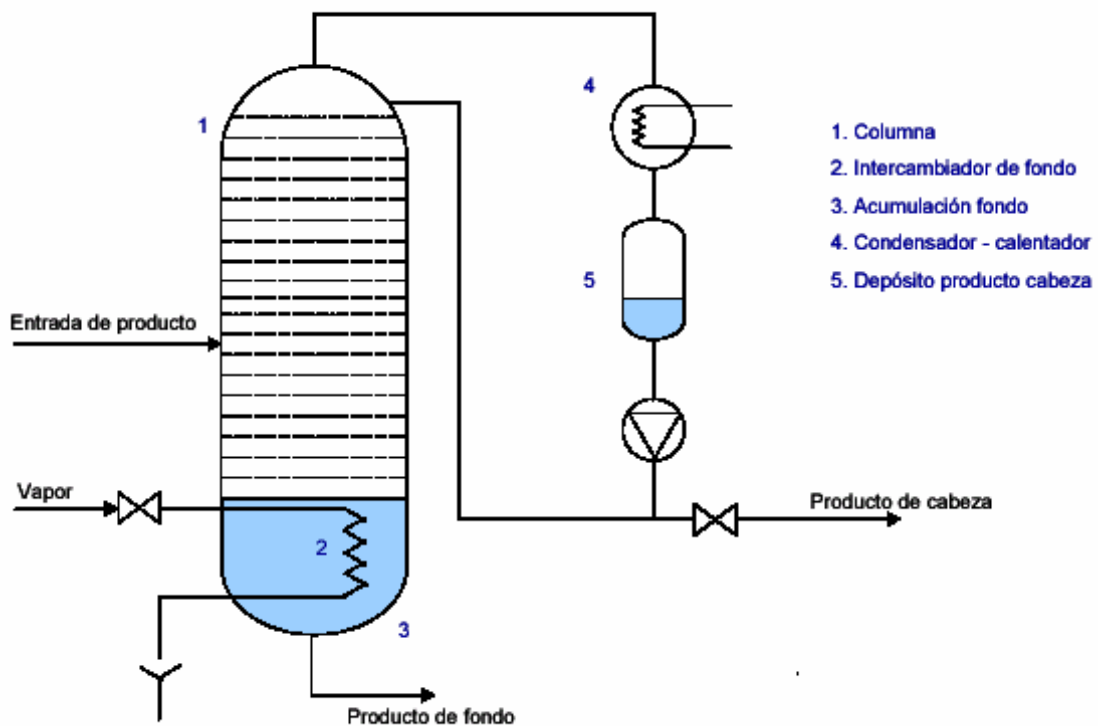


Figura 2. 8-Esquema de una torre de destilación.

➤ **Columna:** Es el elemento principal de la separación. Ya se ha descrito con anterioridad su función. La base de la separación se produce por el paso en contracorriente de producto líquido y vapor con diferentes composiciones y concentraciones. Dispone de dos entradas (producto y reflujo) y dos salidas “cabeza” y “fondo”

➤ **Intercambiador de fondo:** Comúnmente se utiliza la palabra en inglés “reboiler” (hervidor). Es el elemento que añade energía en el fondo de la columna. Mediante esta energía se produce un proceso de ebullición del contenido del fondo generándose de esta manera un flujo hacia arriba de vapor.



➤ **Acumulación del fondo:** La columna de destilación tiene forma de depósito en el fondo para poder así acumular una cantidad de producto. Este producto será el que hervirá y subirá en fase gas por la columna. De esta acumulación de producto es también por donde se saca el producto del fondo.

➤ **Condensador-calentador:** En la parte superior se dispone de un condensador que a su vez hace funciones de calentador. Aquí se condensa el gas que sale por la cabeza para que se pueda introducir como reflujo en la columna. El calor que hay que extraer al producto que sale por la cabeza, se utiliza para calentar otros flujos laterales.

➤ **Depósito producto cabeza:** El producto de cabeza que ha sido condensado en el condensador se acumula en un depósito. Este depósito hace de pulmón para poder absorber las fluctuaciones de caudal y propiedades del flujo. [8]

2.3 -Ecuaciones básicas de modelización.

2.3.1-Ecuaciones de platos (etapa genérica)

El proceso de destilación es un proceso por etapas. Cada plato es una etapa en que se puede modelizar por un grupo de ecuaciones (Figura 2.9). Este grupo de ecuaciones es el mismo para todo el conjunto de etapas o de platos. Las ecuaciones vienen fijadas de propiedades físicas básicas.

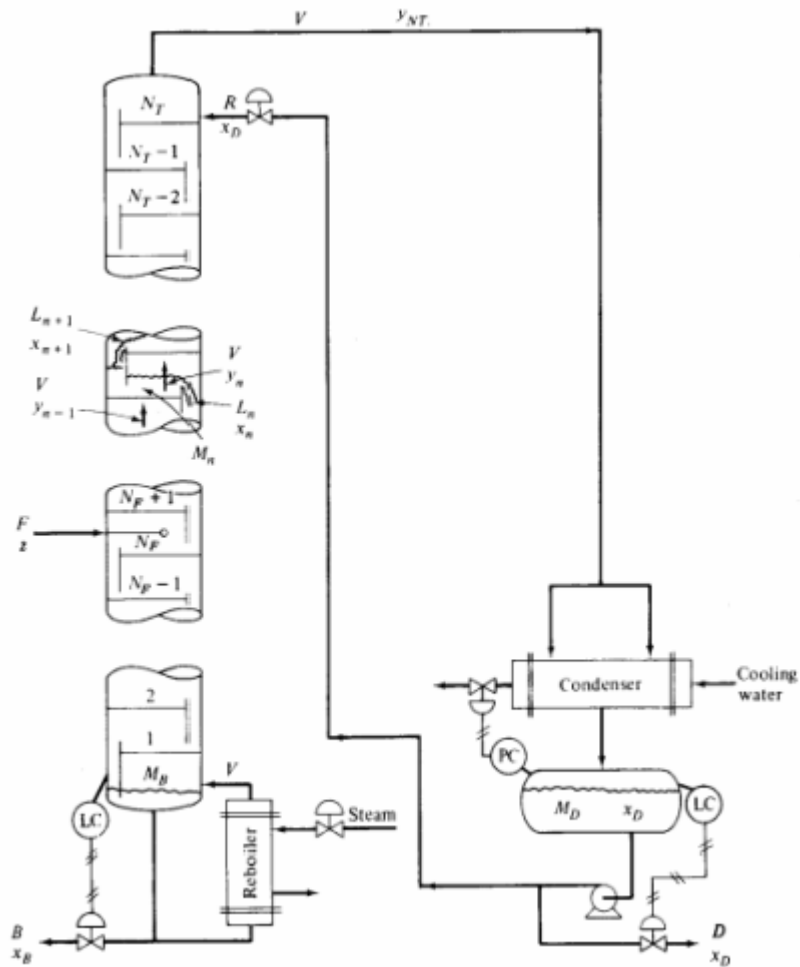


Figura 2. 9- Esquema de una columna de destilación.

Balance de materia

En un plato de una columna de destilación la primera ecuación básica estará fijada por la necesidad de que se cumpla el balance de materia para cada uno de los componentes.

Suponiendo que tenemos componentes que no reaccionan entre ellos la ecuación que se tendrá que cumplir para el plato n y el componente i será la siguiente:

$$\frac{d(M_n \cdot X_n)}{dt} = V_{n-1} \cdot Y_{n-1} + L_{n+1} \cdot X_{n+1} - V_n \cdot Y_n - L_n \cdot X_n \quad (1)$$

Donde:



M_n es la cantidad del líquido acumulado en el plato n .

${}_iX_n$ es la concentración del componente i en fase líquida en el plato n .

L_n caudal de líquido del plato n .

${}_iY_n$ es la concentración del componente i en fase vapor en el plato n .

V_n caudal de vapor del plato n .

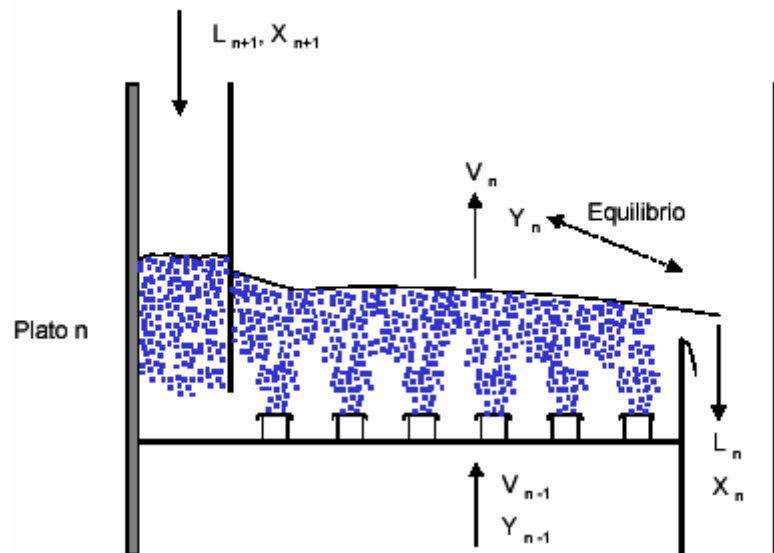


Figura 2. 10- Esquema de un plato.

Mediante la ecuación se puede ver que se cumple que la acumulación líquida de un componente es igual a la diferencia entre la cantidad de materia que entra y sale tanto en estado vapor o líquido (Figura 2.10).

Balace de Energía

La segunda ecuación básica es la que cumple el balance de energía. En cada plato se debe cumplir el balance de energía siguiendo la siguiente ecuación.

$$\frac{d(M_n \cdot h_n)}{dt} = V_{n-1} \cdot H_{n-1} + L_{n+1} \cdot h_{n+1} - V_n \cdot H_n - L_n \cdot h_n \quad (2)$$



Donde:

h_n es la entalpía molar del líquido en el plato n .

H_n es la entalpía molar del vapor que sale de la bandeja n .

h_{n+1} es la entalpía molar de líquido procedente del plato superior.

H_{n-1} es la entalpía molar del vapor procedente del plato inferior.

En la ecuación queda definido que la acumulación de energía en el plato n , como la diferencia entre la energía que entra y sale tanto en estado vapor como en líquido. Muchas veces, debido a que los flujos de energía son mucho mayores que la variación de la energía en el plato, se puede despreciar el elemento de la derivada convirtiéndose entonces en una ecuación algebraica no diferencial.

$$0 \approx Q_{n-1} + q_{n+1} - Q_n - q_n$$

2.3.2 -Etapa de alimentación.

Para el plato de alimentación deberá considerarse que se tiene un término adicional de entrada (entrada de producto a la columna), lo cual significa que en el miembro derecho de las ecuaciones del balance de materia y energía deberán añadirse los términos relacionados con este aporte externo de material a la columna.

Balance de materia

Como se puede apreciar en la ecuación 3 encontramos un nuevo término relacionado con este aporte de materia externa, debido a dicho aporte las ecuaciones de este plato deben ser tratadas aparte, ya que no se producen en él solo los intercambios de material con sus platos inferior y superior como ocurre en el resto de platos.

$$\frac{d(M_n \cdot X_n)}{dt} = V_{n-1} \cdot Y_{n-1} + L_{n+1} \cdot X_{n+1} - V_n \cdot Y_n - L_n \cdot X_n + F \cdot X_F \quad (3)$$

Donde:



iX_F es la concentración del componente i en fase líquida en la alimentación.

F caudal de líquido de alimentación.

Balance de energía

Al igual que ocurría en el balance de materia, al tener un aporte externo de materia, también lo tenemos de energía, y por lo tanto, es necesario añadir un nuevo término en esta ecuación para adaptarla a esta nueva condición energética.

$$\frac{d(M_n \cdot h_n)}{dt} = V_{n-1} \cdot H_{n-1} + L_{n+1} \cdot h_{n+1} - V_n \cdot H_n - L_n \cdot h_n + F \cdot h_F \quad (4)$$

Donde:

h_F es la entalpía molar del líquido de alimentación.

2.3.3 -Fondo de la columna

El fondo de la columna tiene forma de depósito de manera que se acumula producto en el fondo. Este producto es el que recibe la energía del rehervidor y al evaporarse genera un flujo de vapor hacia arriba en la columna. Mantener este flujo es muy importante ya que este flujo, tanto del vapor hacia arriba como los condensados hacia abajo, hacen que sea posible la separación de componentes (Figura 2.11).

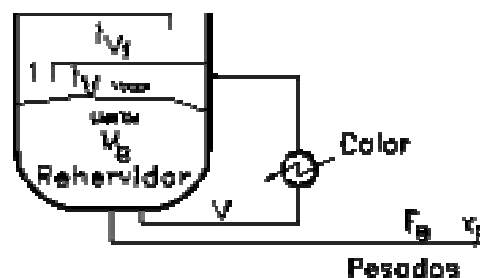


Figura 2. 11- Esquema del fondo de la columna.

En este caso, el objetivo es calcular cuanta cantidad de producto se evapora generándose el flujo vertical. Partiendo de la energía suministrada a la columna y



conociéndose la cantidad de producto acumulado en el fondo, su composición, sus condiciones de presión y temperatura y conociendo los flujos de entrada y de salida del líquido se calcula la cantidad de producto que se evapora y su composición.

Balance de Materia

$$\frac{d(M_B \cdot X_1)}{dt} = L_2 \cdot X_2 - V_B \cdot Y_1 - B \cdot X_1 \quad (5)$$

Donde:

M_B Cantidad de producto en el fondo de la columna.

V_B es el caudal de vapor que abandona el hervidor (volviendo a la columna)

B es el caudal molar de producto

El balance de materia demuestra que se tiene que cumplir que la materia acumulada es igual que la diferencia entre el caudal que entra y el que sale. La diferencial de HL respecto al incremento del tiempo demuestra que es un valor dinámico que cambia con el tiempo.

Balance de energía

$$\frac{d(M_B \cdot X_1 \cdot h_L)}{dt} = Q - V_B \cdot Y_1 \cdot h_V - B \cdot X_1 \cdot h_B \quad (6)$$

Donde:

$M_B \cdot X_1 \cdot h_L$ Es la acumulación de energía del fondo.

Q es la energía entregada por el rehervidor.

h_B Entalpía del líquido.

h_V Entalpía del vapor.



2.3.4 -Condensador

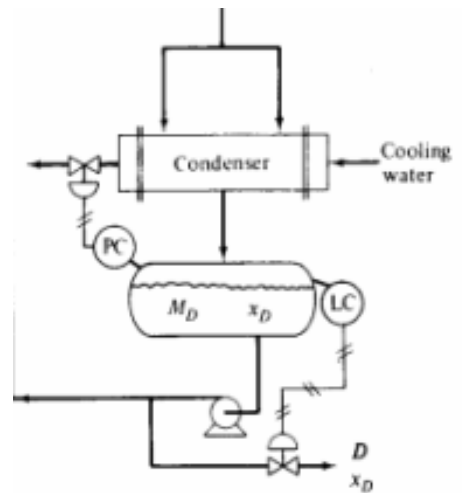


Figura 2. 12- Esquema deposito decantador.

En una **columna con un condensador total** (Figuras 2.12 y 2.13), como es este caso, la presión se determina únicamente mediante el balance de calor; es decir, si el calor suministrado al rehervidor es mayor que el eliminado en el condensador, la presión en la columna aumentará a medida que transcurra el tiempo. Así pues, también aumentará la temperatura en todos los platos además del condensador, con lo cual se incrementará el calor eliminado en el condensador. Dicho incremento continuará hasta que se satisfaga nuevamente el balance de calor con la presión más alta y el sistema alcance el estado estacionario. Este mecanismo de autorregulación se presenta aún cuando se controle la presión; por lo tanto, el control de presión de la columna se realizará mediante la manipulación del calor suministrado en el rehervidor o el eliminado en el condensador. En este caso se supondrá que el condensador trabaja a su máxima capacidad, logrando así mantener la presión de la columna en el punto más bajo que permite la capacidad del condensador, favoreciendo además la separación de los componentes.

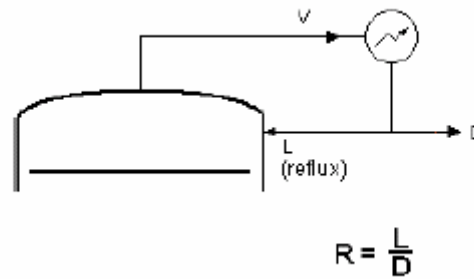


Figura 2. 13- Diagrama condensador total.

Balance de materia

Al elaborar el modelo del condensador se ha considerado que no existe acumulación de masa en la fase vapor, lo cual significa que el líquido que entra en el depósito acumulador tiene el mismo caudal y composición que el flujo de vapor que entra en el condensador y, por tanto, no se requieren balances de materia.

Balance de energía

En este caso el condensador se utiliza para poder condensar el producto que sale en estado gas desde la columna. Un condensador es un intercambiador de calor, el producto pasa por dentro de unos tubos que están en contacto con otro fluido, en este caso un refrigerante. Al estar los productos en contacto térmico a través de las paredes de los tubos se genera una transferencia de energía produciendo la condensación del producto así como el calentamiento del refrigerante.

$$V_n \cdot (H_n - h_c) = U_c \cdot A_c \cdot (T_c - T_B) + C_c \frac{dT_c}{dt} \quad (7)$$

Donde:

h_c es la entalpía molar del líquido que sale del condensador.

U_c es el coeficiente de transferencia de calor del condensador.

A_c es el área de transferencia de calor del condensador.



C_c es la capacidad calorífica de los tubos del condensador

T_c es la temperatura del líquido a la salida del condensador.

T_B es la temperatura en el fondo de la columna.

2.3.5 -Modelo del depósito acumulador

Una vez el producto haya sido condensado se almacena en un depósito. Este depósito está pensado para absorber las diferentes perturbancias del proceso y para hacerlas más lentas. Este depósito hará de pulmón el caso que ocurran cambios bruscos de caudal en la cabeza de la columna, y retardará también los cambios bruscos de composición de la cabeza.

Balance de Materia

La acumulación de producto es igual a la diferencia de caudal que entra y que sale. El cambio en la concentración de X_n depende de la cantidad del producto que entra y sale con respecto al volumen total de acumulación de producto en el tanque.

$$\frac{d(M_c \cdot X_n)}{dt} = V_n Y_n - (L + D) \cdot X_n \quad (8)$$

Donde:

M_c es la masa del líquido que se retiene en el acumulador.

D es el caudal de líquido destilado.

L caudal de realimentación.

Balance de energía

Para el propósito de este proyecto se ha elegido un depósito ideal sin pérdida ni adición de calor, facilitando de este modo los cálculos, al igual que en el resto de componentes que permitían esta simplificación.



$$\frac{d(M_c \cdot X_n)}{dt} = V_n \cdot h_c - (L + D) \cdot h_n \quad (9)$$

2.4 - Simulación.

El funcionamiento de una torre de destilación es uno de los procesos más complicados de simular debido al gran número de variables y ecuaciones que hay que tener en cuenta, lo cual se ha podido comprobar en el apartado anterior. Estas simulaciones son necesarias para el diseño y la optimización en los procesos productivos. En este caso la columna de destilación fue diseñada completamente por la empresa de ingeniería Ingasol S.A. a partir de unas especificaciones de tamaño y caudales aproximados que debía cumplir.

Por ello la simulación del proceso de destilación se ha realizado tras conocer las características físicas de la torre a partir del diseño de la empresa de ingeniería. Para esta simulación se ha utilizado el entorno Chemcad 5.2 que está especialmente dedicado a la simulación de procesos químicos industriales.

La forma de trabajo con este entorno es relativamente sencilla ya que para llevar a cabo una simulación simplemente hay que dibujar el esquema del proceso colocando en la pantalla de trabajo los equipos a utilizar, unirlos mediante sus correspondientes líneas de flujo y configurarlos.

En la Figura 2.14 se muestra la pantalla de operación de Chemcad 5.2 con el diseño de la torre de destilación listo para su simulación. Se compone de cinco elementos principales:

- **flujo de entrada** (flujo 1)
- **intercambiador de calor** (equipo 1)
- **torre de destilación** (equipo 2)
- **flujo de destilado** (flujo 3)
- **flujo de líquido de fondo** (flujo 4)

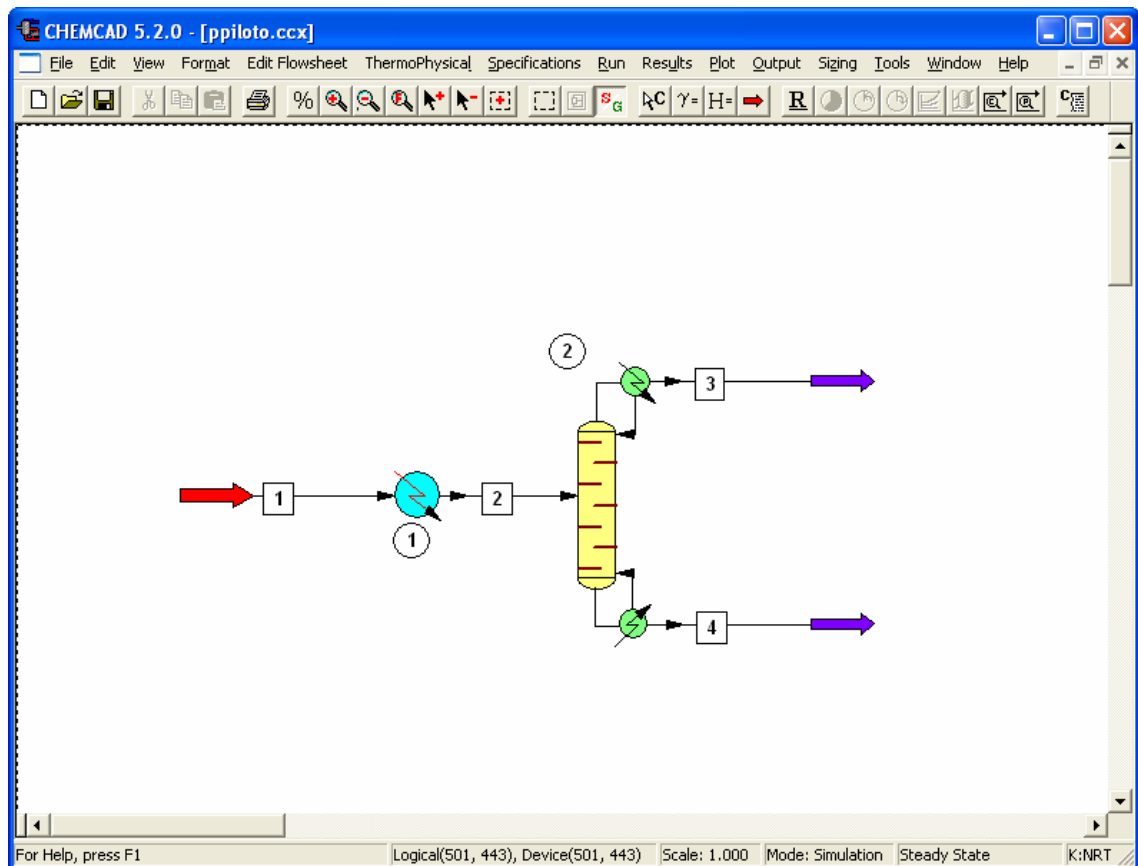


Figura 2. 14- Pantalla de operación de Chemcad 5.2 con la torre de destilación.

Para realizar la simulación primero hay que especificar los parámetros de la torre, del intercambiador y del flujo de entrada. Esto se hace pinchando dos veces con el botón izquierdo del ratón sobre el equipo o flujo que queremos configurar, apareciendo la pantalla para tal fin. Para el intercambiador se ha especificado que simplemente eleve la temperatura del flujo de entrada hasta 45° C.

En el caso del flujo de entrada se ha configurado una mezcla de agua al 85% en peso y etanol al 15%, con un caudal de 6 kg/h, una temperatura de 25° C y 1 bar de presión (Figura 2.15). Estos datos se han aproximado a partir de destilaciones llevadas a cabo en otras columnas piloto. [12]

Si se desea realizar alguna simulación el archivo utilizado se encuentra en el *Anexo 4: Simulación (solo formato electrónico)*.



Stream No.	1
Stream Name	
Temp. C	25
Pres. bar	1
Vapor Fraction	0
Enthalpy MJ/h	-143.8181
Total flow	0.2
Total flow unit	stdL /min
Comp unit	liqvol frac
Water	0.6499999
Ethanol	0.3500001

Figura 2. 15-Pantalla de configuración del flujo 1.

La configuración de la torre de destilación se hizo de acuerdo a las especificaciones realizadas por Ingasol. Se trata de una torre de relleno (*packed column mass transfer*), con siete platos (*segments*) y alimentación en el plato número cuatro (Figura 2.16).



The screenshot shows the 'SCDS Distillation Column' software window with the 'General' tab selected. The 'General Model Parameters' dialog box is open, displaying various configuration options for a distillation column. The 'Condenser type' is set to '0 Total or none'. The 'Simulation model' is 'Packed column mass transfer'. The 'No. of segments' is 7, and the 'Feed locations' are 2 and 4. The 'Optional three phase control' section is currently unchecked.

Parameter	Value	Unit
Condenser type	0 Total or none	-
Subcooled delta T		C
Top pressure		bar
Cond press drop		bar
Colm press drop		bar
Reflux pump pout		bar
Bottom pump pout		bar
No. of segments	7	-
Feed locations	2, 4	-
Simulation model	Packed column mass transfer	-
Upper layer fraction to decant (alpha)		-
Lower layer fraction to decant (beta)		-
Check here for reactive distillation	<input type="checkbox"/>	-
Stage efficiency: Top stage		-
Stage efficiency: Last stage		-
Use local three phase model	<input type="checkbox"/>	-
Three phase stage from		-
Three phase stage to		-

Figura 2. 16-Primera pantalla de configuración de la torre.

Para que se lleva a cabo el balance de materia y energía es necesario especificar dos características más: el modo de condensador y el modo de rehervidor.

En este caso, para el modo de condensador se ha escogido, entre las quince opciones disponibles, el ratio de reflujo, es decir, la cantidad de destilado que es devuelto a la torre para que el proceso sea más efectivo. Se ha elegido un valor de 0.6 (Figura 2.17), lo cual quiere decir que el 60% de la salida de la torre es devuelta a la misma y el resto se envía al depósito de destilado.

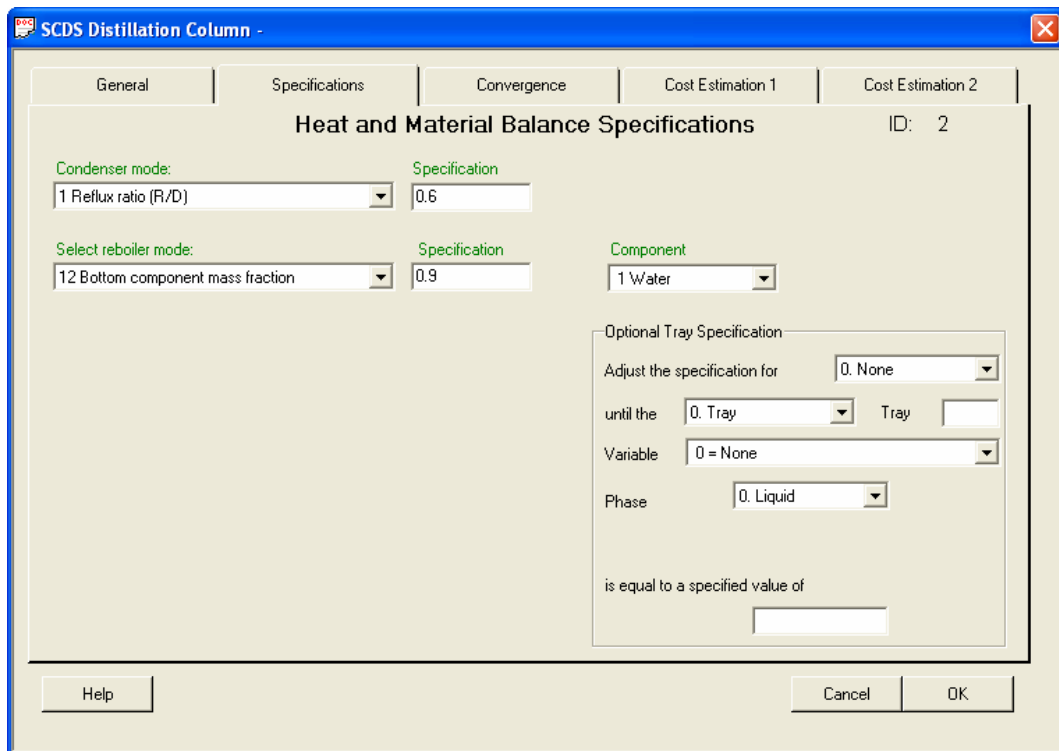


Figura 2. 17-Pantalla de especificación de balance de materia y energía.

Para el modo de rehervidor se ha escogido la fracción de masa de un componente en el fondo. En este caso se quiere que haya aproximadamente un 90% de agua en el fondo, lo cual es un valor bastante bueno, teniendo en cuenta que se trata de una destilación azeotrópica en la cual es imposible conseguir un 100% de separación.

La siguiente pestaña que aparece, *Convergence*, sirve para establecer ciertas estimaciones que puedan ayudar al programa en el cálculo de la simulación. En nuestro caso no se ha utilizado este apartado.

Si se pulsa el botón “OK” aparece la ventana de configuración del relleno, ya que según sea de un tipo u otro influirá en el resultado final.



- Packed Column -

Diameter, section 1: 0.2 m ID: 2
Diameter, section 2: [] m
Section 2 starting stage #: []
Packing height, section 1: 1.5 m
Packing height, section 2: [] m

Liquid flow model: Mixed flow
Calculation Method: 0 Random packing (Bravo and Fair)

Select packing or select "User" to enter packing data below

Packing type	Packing name	Packing material	Packing size,mm
Dumped	Spheres	Glass	User

User specified packing data

Packing surface	150	m2/m3	For random packing (Bravo and Fair) only:		
Void fraction	0.46		Nominal packing size	40	mm
For structured packing (Bravo, Rocha and Fair) only:		For Billet and Schultes correlation:			
Crimp height	12.4	mm	Cs	2.627	
Channel base	25.9	mm	Cfl	2.083	
Channel side	18	mm	Cl	1.335	
Channel flow angle	45	degrees	Cv	0.336	

Some data appears courtesy Dr. Michael Schultes, Rashig GMBH

Cancel OK

Figura 2. 18-Pantalla de configuración del relleno.

En esta pantalla, como se puede observar en la Figura 2.18, se introduce el diámetro de la columna (0.2 m), la altura del relleno (1.5 m aprox.) y el tipo de relleno. El relleno de esta columna son esferas de cristal de aproximadamente 40 mm de diámetro, que ocupan también aproximadamente una superficie de $150 \text{ m}^2/\text{m}^3$. También hay que especificar la fracción de vacío del relleno que se ha estimado en 0.46. El resto de valores que se ven en la figura son para otros tipos de relleno y aquí no se utilizan.

Una vez configurado el relleno se pulsa *OK* y aparece la siguiente ventana:

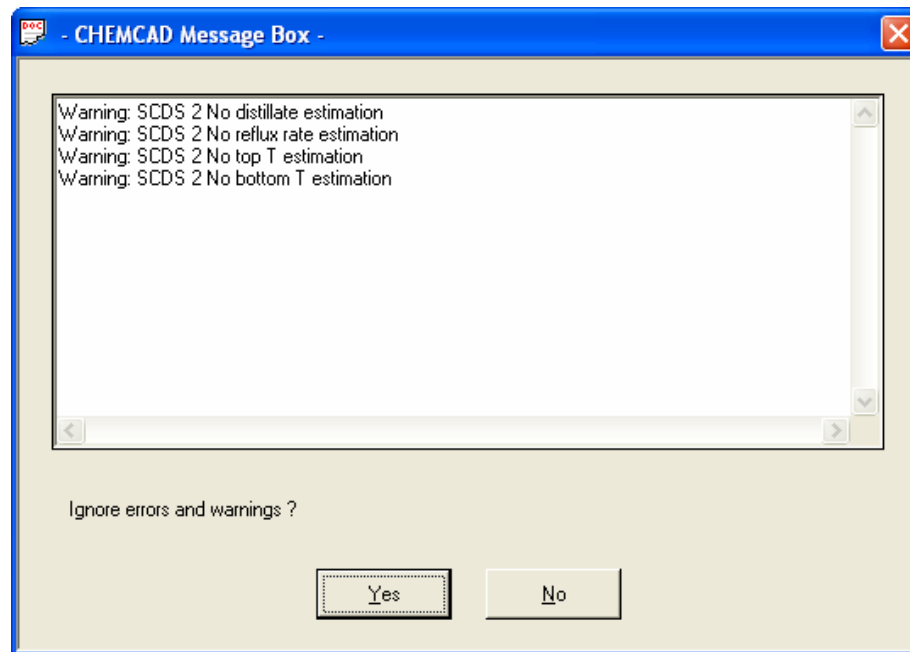


Figura 2. 19-Pantalla de aviso.

Esto nos indica que no se han introducido estimaciones ni de flujos ni de temperaturas, pero no influye en la simulación (Figura 2.19).

A partir de aquí ya se puede correr la simulación mediante el menú “Run” y en el desplegable “Run All”. Al hacerlo vuelve a aparecer la pantalla de aviso que se debe volver a ignorar. Para ver los resultados de la simulación se debe pulsar dos veces sobre el flujo que se desee ver, en este caso interesa el destilado (Figura 2.20) y el fondo (Figura 2.21) por lo que haciendo doble clic sobre cada uno de ellos se obtiene la siguiente información:



Stream No.	3
Stream Name	Top
Temp C	80.77524
Pres bar	1
Vapor Fraction	0
Enthalpy MJ/h	-6.321834
Total flow	0.6312639
Total flow unit	kg/h
Comp unit	weight frac
Water	0.4247628
Ethanol	0.5752372

Figura 2. 20-Resultado de simulación para el destilado.

Stream No.	4
Stream Name	Bottom
Temp C	91.25701
Pres bar	1
Vapor Fraction	0
Enthalpy MJ/h	-78.42207
Total flow	5.368736
Total flow unit	kg/h
Comp unit	weight frac
Water	0.9
Ethanol	0.09999996

Figura 2. 21-Resultado de simulación para el producto de fondo.

Se ha obtenido un destilado con las siguientes características:

- **Temperatura:** 80.7° C
- **Flujo total:** 0.6312 kg/h
- **Fracción en peso de agua:** 0.424



- **Fracción en peso de etanol: 0.575**

Y para el producto de fondo:

- **Temperatura: 91.2° C**
- **Flujo total: 5.36 kg/h**
- **Fracción en peso de agua: 0.9**
- **Fracción en peso de etanol: 0.1**

En el destilado se obtiene un 57.5% de etanol en peso a partir de una entrada con el 15%. No es un valor del todo malo teniendo en cuenta que se trata de una columna pequeña y con un relleno menos eficiente que si fuera de otro tipo como anillos Raschig o anillos Bialecki.

Para intentar aumentar el contenido en etanol del destilado se puede, por ejemplo, aumentar el reflujo. Si se realiza esto y lo situamos en un valor del 90% (Figura 2.22), el resultado que se obtiene es el siguiente:

Stream No.	3
Stream Name	Top
Temp C	80.72169
Pres bar	1
Vapor Fraction	0
Enthalpy MJ/h	-6.203109
Total flow	0.6231517
Total flow unit	kg/h
Comp unit	weight frac
Water	0.4185767
Ethanol	0.5814233

Figura 2. 22-Destilado tras la segunda simulación.

- **Temperatura: 80.7° C**
- **Flujo total: 0.62 kg/h**



- **Fracción en peso de agua:** 0.418
- **Fracción en peso de etanol:** 0.581

Se observa que tanto la temperatura como el flujo se mantienen constantes y que la concentración de etanol aumenta ligeramente. Esto indica que hay que realizar algún otro tipo de operación si se quiere aumentar dicha concentración en mayor medida.

Si se aumenta la concentración de etanol en el flujo de entrada hasta el 40% y realizamos la simulación (Figura 2.23) el resultado que se obtiene es:

Stream No.	3
Stream Name	Top
Temp C	80.16024
Pres bar	1
Vapor Fraction	0
Enthalpy MJ/h	-30.6653
Total flow	3.291159
Total flow unit	kg/h
Comp unit	weight frac
Water	0.35308
Ethanol	0.64692

Figura 2. 23-Simulación con mayor concentración de etanol a la entrada.

- **Temperatura:** 80.1° C
- **Flujo total:** 3.29 kg/h
- **Fracción en peso de agua:** 0.353
- **Fracción en peso de etanol:** 0.646

Como era de esperar aumenta la concentración de etanol y también el flujo total de salida.

Este resultado puede indicar que para conseguir una alta pureza de etanol se debe realizar más de una destilación, para lo cual se podría, una vez terminada sesión de destilación, comenzar otra utilizando como flujo de entrada el destilado conseguido



anteriormente y que se encuentra almacenado en el depósito de entrada. Como se puede suponer la planta necesitaría una cierta flexibilidad que permitiría la conexión de dicho depósito a la entrada de la torre.

2.4.1 -Conclusiones de la simulación.

Según las simulaciones realizadas y teniendo en cuenta que las características físicas reales de la torre no son iguales que las que aparecen en el programa, los resultados obtenidos son buenos ya que se consigue separar el etanol en más de un 64% en peso. Seguramente la planta real será capaz de superar ese valor.

Si se quisiera aumentar la pureza del destilado se debería, por ejemplo, realizar más de una destilación, lo cual se puede llevar a cabo realizando otra sesión de destilación tras terminar la primera, utilizando como flujo de entrada el destilado conseguido anteriormente y que se encuentra almacenado en el depósito de entrada. Debido a esto la flexibilidad de la Planta Piloto, se toma como una de las características principales en el diseño.

Además, lo que se busca con la construcción de esta torre es la investigación en el control del proceso para el desarrollo de técnicas avanzadas que se puedan usar en la industria, para lo cual cumple su función sobradamente.



3.-Diseño y Dimensionamiento de la Planta.

3.1- Características exigibles:

La característica principal en la que se pensó a la hora de diseñar la planta fue la flexibilidad. Las líneas debían poder reconfigurarse sencillamente para tener diferentes problemas de control con dificultades variables para poder someter a los algoritmos inteligentes a diversas situaciones y comprobar su comportamiento. Como ejemplo de configuraciones se precisa poder aislar completamente el reactor, o cualquier otro elemento, del resto de la planta; poder conectar directamente cualquier depósito a la columna de destilación; realizar control de nivel en uno de los depósitos aislándolo del resto de la planta; realizar diferentes lazos de control con diferentes elementos de la planta; utilizar solamente la columna de destilación, etc.

También se deseaba tener capacidad para poder añadir elementos a la planta en un futuro dependiendo de las necesidades que fueran surgiendo, como por ejemplo un retardo en las tuberías para dificultar el control, más instrumentación, etc.

Aparte de esto el funcionamiento de la planta debe poder ser totalmente autónomo sin dependencia humana, para lo cual se necesita un sistema de control adecuado a las necesidades de la misma.

Con estas premisas al final se obtendrá una planta piloto totalmente configurable y con grandes posibilidades de ampliación.

3.2- Estudio de plantas piloto existentes.

Antes de la realización de un proyecto de esta envergadura es necesario estudiar las posibles alternativas que existan en el mercado y que pudieran ofrecernos tanto ideas incluir en el mismo como comprobar la rentabilidad de llevar a cabo el diseño y fabricación del mismo.

Además para este proyecto en concreto se dispone de la colaboración de dos importantes empresas del sector farmacéutico y petroquímico de la región, como ya se ha comentado anteriormente, las cuales se ofrecieron a mostrar sus instalaciones tanto



de investigación como productivas, con el fin de ayudar en lo posible en el diseño de este trabajo facilitando el contacto con plantas piloto para así adquirir ideas que pudieran servir para la construcción de la planta de la Universidad.

3.2.1-Plantas piloto Repsol y Derivados Químicos.

Plantas piloto Derivados Químicos [1]

El departamento de I+D de la empresa Derivados Químicos trabaja en dos líneas fundamentales de investigación, una en la síntesis orgánica y otra en el campo de la electroquímica y medio ambiente. Esta última trabaja actualmente en dos frentes, uno el tratamiento de efluentes industriales no biodegradables y otro en la electrosíntesis de compuestos orgánicos y de química fina, contando para tal con una planta piloto.

Dicha planta piloto está condicionada, para realizar ensayos en tres técnicas distintas: stripping con vapor, electro-oxidación y tratamiento biológico aerobio, que pueden ser utilizadas individualmente o en serie como parte de un solo proceso.

- **“Stripping” con vapor:** se trata de aplicar vapor de agua en contracorriente sobre el efluente a tratar para eliminar los disolventes más volátiles responsables de la DQO (Demanda Química de Oxígeno). La planta está constituida por una columna de destilación de cuatro metros, un acumulador de destilados de $1.9 m^3$, la capacidad de la bomba de destilados es de $0.5 m^3/h$ y la capacidad de tratamiento depende del régimen de operación establecido y se encuentra en torno a $100 l/h$.
- **Reactor de electro-oxidación:** degradación de la materia orgánica contenida en el efluente a CO_2 utilizando el electrón como agente oxidante. La planta está provista de un reactor electroquímico del tipo filtro-prensa que incluye seis celdas colocadas con una superficie de electrodo de $0.33 m^2$ cada una, lo que nos da un total de $2 m^2$ de área, además dispone de un acumulador de alimentación y otro de salida o efluente tratado con un volumen de $3.8 m^3$, un acumulador de recicló, separador de gas/líquido de $0.97 m^3$ y un lavador de gases que tiene como objetivo la eliminación del cloro que se pueda producir.



La capacidad de tratamiento es de entre $0.5-2 \text{ m}^3/\text{día}$ en función del nivel de DQO del efluente.

➤ **Tratamiento biológico:** degradación de la materia orgánica por oxidación mediante bacterias aeróbicas. El proceso consta de un reactor de unos 0.2 m^3 provisto de aireación e intercambiador de calor, y de un separador o decantador de unos *50 litros*. La capacidad de tratamiento depende del tiempo de residencia necesario para la degradación por lo que puede oscilar entre *25-50 litros/día*.

Plantas piloto de Repsol Y.P.F [1]

Las actividades del grupo de plantas piloto de Repsol Y.P.F se iniciaron en 1979 con la construcción de la primera planta piloto de la entonces empresa REPESA y ha ido evolucionando hasta la actualidad en la que disponen de las siguientes plantas piloto, todas ellas operadas desde ordenador por 6 técnicos y 6 ayudantes de planta en turnos de 8 horas:

- **Plantas de Hidrotratamiento y Desulfuración:** 6 plantas operativas.
- **Planta de FCC** tipo DCR (Davison Circulating Riser)
- **Planta Demo de Asfaltos.**
- **Planta CSTR** (Continuous Stirred Tank Reactor) para estudios cinéticos en Hidrodesulfuración e Hidrocracking.
- **Planta de “Visbreaking”.**
- **Planta Demo** para obtención de **Mesofase de Carbono (MMC).**
- **Planta de Percolización de Parafina.**
- **Planta de Coquización retardada (Coker).**

Asimismo disponen a escala de laboratorio de lo siguiente:

- **Equipos para apoyo analítico a las plantas piloto.**
- **Equipos para evaluación de crudos.**
- **Unidades “Microactivity Test (MAT)”** para evaluación de catalizadores de FCC.
- **Columnas para destilación de productos** (entre diferentes escalas desde 1 litro hasta 200 litros).
- **Cromatógrafos** para análisis de gases y líquidos.
- **Destilación simulada.**



- **Viscosímetros, densímetros**, etc. para caracterización de productos líquidos.
- **Equipos para caracterización de catalizadores**: área superficial, análisis elemental, termogravimetría, etc.

3.2.2-Plantas piloto comerciales.

Existen en el mercado diversas empresas que se dedican a la fabricación y venta de plantas piloto para investigación. La mayoría de estas plantas están destinadas casi exclusivamente a la docencia en universidades e institutos técnicos, incluyendo pocos procesos y sistemas de control simples, por lo que casi siempre se orientan a la experimentación con el proceso dejando de lado la experimentación con el control, excepto en el caso de que la planta se dedique a ello en cuyo caso estos sistemas son sobre todo PLC's para implantar control secuencial o PID's en caso de control continuo.

Antes de comenzar con el diseño de la planta en este proyecto se estudiaron los productos de algunas de estas empresas tanto para comprobar la viabilidad del desarrollo del proyecto como para la posible adopción de nuevas ideas e incluso la compra de una de estas plantas para la adaptación de la misma a los requerimientos del proyecto como por ejemplo una columna de destilación a escala laboratorio. Esta última idea fue desechada principalmente debido al elevado coste de estas soluciones.

Las principales empresas que se consultaron fueron Gunt y Armfield. Ambas empresas poseen varios tipos de equipos que pueden ir desde un sistema sencillo como ensayos con tanques hasta sistemas más complejos como reactores, torres de destilación o una refinería de laboratorio. [13, 14]



Figura 3. 1-Equipo CE-620 de Gunt.

Por ejemplo el equipo **CE-620 de Gunt** (Figura 3.1), se trata de una unidad de extracción líquido-líquido, en la que no se está obligado a un determinado policomponente sino que puede operarse con diferentes líquidos. El banco de ensayos incorpora un dispositivo de destilación para el procesamiento del disolvente. La columna de extracción se compone de un tubo de vidrio DURAN relleno con anillos Raschig de vidrio de sosa. En los espacios libres de la parte inferior y superior de la columna puede observarse durante el funcionamiento el límite de fases. La unidad de destilación se compone de un matraz con columna de relleno y un puente de destilación con radiador Liebig. Para el calentamiento se emplea una campana fungiforme con regulador PID. Los registros de la temperatura tienen lugar mediante sondas métricas Pt-100.

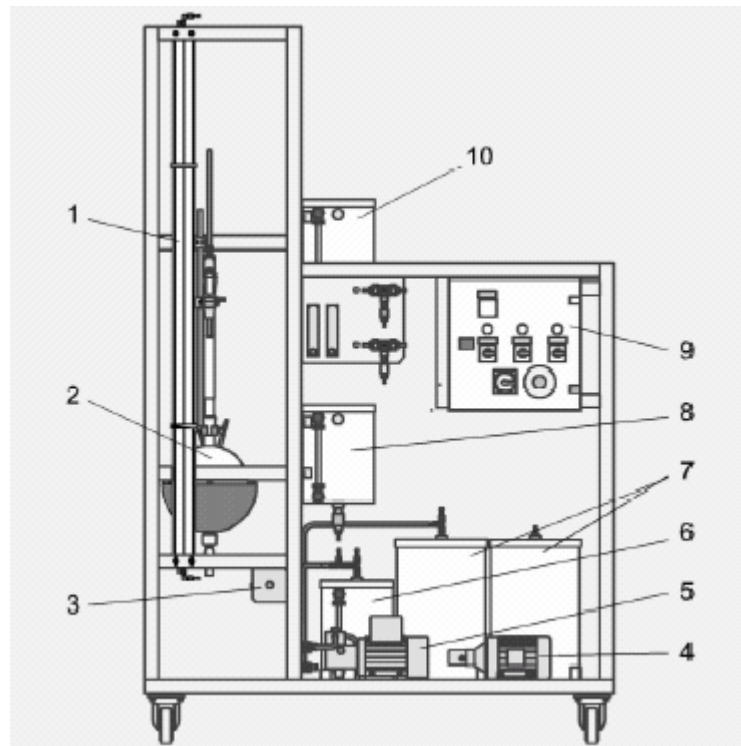


Figura 3. 2-Esquema del equipo CE-620.

Los elementos que aparecen en la Figura 3.2 son los siguientes:

1. Columna de extracción
2. Unidad de destilación
3. Válvula reguladora para límite de fase
4. Bomba de alimentación
5. Bomba de solvente
6. Depósito de solvente
7. Depósito de alimentación y suministro residual
8. Recipiente de destilación
9. Armario de distribución
10. Recipiente de extracto

De la empresa **Armfield** encontramos otro equipo de extracción líquido-líquido bastante interesante: el **UOP 5** (Figura 3.3).



Figura 3. 3-Equipo de extracción líquido-líquido UOP 5 de Armfield.

Este equipo, montado en un bastidor de suelo de acero soldado, consta de una columna de extracción líquido/líquido de vidrio rellena de anillos Rasching junto con una columna de destilación integrada para la recuperación de disolvente. El agua para la columna de extracción es bombeada desde un tanque de suministro vía una válvula de control de flujo y un caudalímetro hasta un inyector situado en la base de la columna, y luego fluye desde un tubo de salida en la parte superior hasta un tanque de recogida. El disolvente es bombeado desde un tanque de alimentación de acero inoxidable vía una bomba de dosificación hasta la cabeza de la columna, y luego fluye en contracorriente al suministro de agua. El disolvente se drena por gravedad a un recipiente de recogida de acero inoxidable, desde donde puede ser enviado al tanque de alimentación o a la caldera de la columna de destilación. La provisión de un control de altura del interfaz permite la selección de la fase más densa o la más ligera como fase continua, siendo discontinuo (gotitas) el flujo en contracorriente. El destilado es condensado y es recogido en un tercer tanque de acero inoxidable. El disolvente condensado también puede ser devuelto al tanque de alimentación para su recirculación.

Unos electrodos-sensores y una válvula de solenoide controlan el nivel del interfaz agua/disolvente en la cabeza o en el fondo de la columna según sea necesario.



El control del equipo es sencillo. Un panel muestra el completo sistema de flujo de disolvente/agua, con controles en los puntos apropiados del diagrama.

También encontramos otros ejemplos **de equipos multifuncionales como el RT-578 de Gunt** (Figura 3.4) también, que es un instructor de regulación multiprocesos dotado con equipamiento industrial. Este equipo ofrece la posibilidad de realizar ensayos en todos los sectores esenciales de la técnica de regulación. A esta finalidad dispone de un depósito transparente para la regulación del nivel, un correspondiente sistema de tuberías para la regulación del caudal, un depósito del proceso para la regulación de la presión y un sistema de dos circuitos con intercambiador térmico de placas para la regulación de la temperatura. Como elemento regulador se emplea una válvula reguladora operada neumáticamente o una potente bomba a régimen de revoluciones regulable. Los parámetros del regulador digital pueden programarse en amplios rangos de forma que puede comprobarse un gran número de diferentes condiciones de proceso. Sensores electrónicos detectan los diferentes valores del proceso; para el registro en tiempo de los procesos de regulación incluye un rotulador lineal de tres canales.

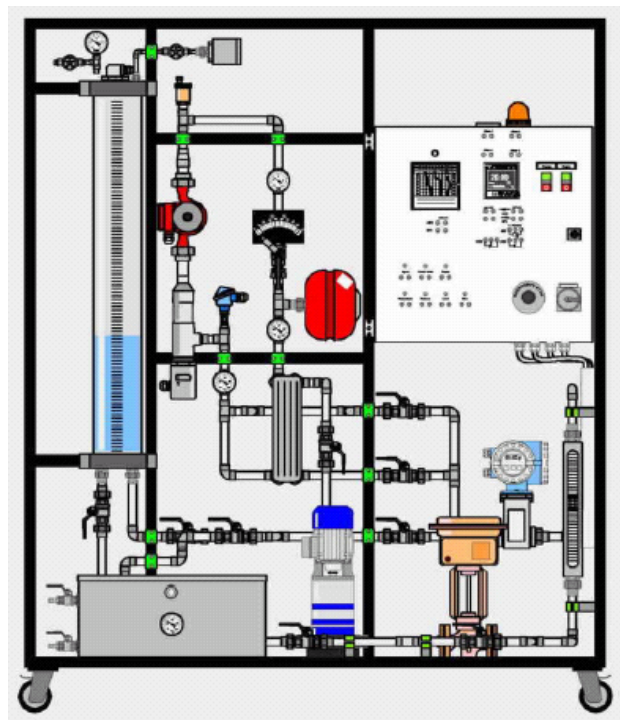


Figura 3. 4-Equipo RT-578 de Gunt.



Aun observando la complejidad que poseen estos equipos no se consideran adecuados para las necesidades del proyecto porque no ofrecen todas las posibilidades que se requieren, aparte de que el coste de uno de ellos puede ser similar e incluso más elevado que el de la planta piloto del proyecto. Por ello se pensó en la posibilidad de incluir elementos separados de estos equipos y se pidieron presupuestos de un reactor de Gunt (Figura 3.5) y una columna de destilación, pero una vez más el elevado coste (Unos 60.000 € para una la columna de destilación de Armfield), eliminó esta posibilidad, por lo que se decidió que fabricar todos los elementos era la opción mas viable para lograr todas las características exigibles para esta Planta Piloto.



Figura 3. 5-Reactor tubular CE 310.02 de Gunt.

3.3- Proceso de diseño inicial.

Una vez que los procesos principales sobre los que se quería trabajar estuvieron definidos (columna de destilación y reactor químico), se procedió a realizar los primeros esquemas que plasmasen los flujos de materia de ambos procesos.

En una primera aproximación se tenía por un lado el esquema de funcionamiento primario del control de la temperatura del reactor por medio de los tres fluidos de diferentes temperaturas y por el otro la columna de destilación con un proceso real muy estandarizado como es la destilación binaria.

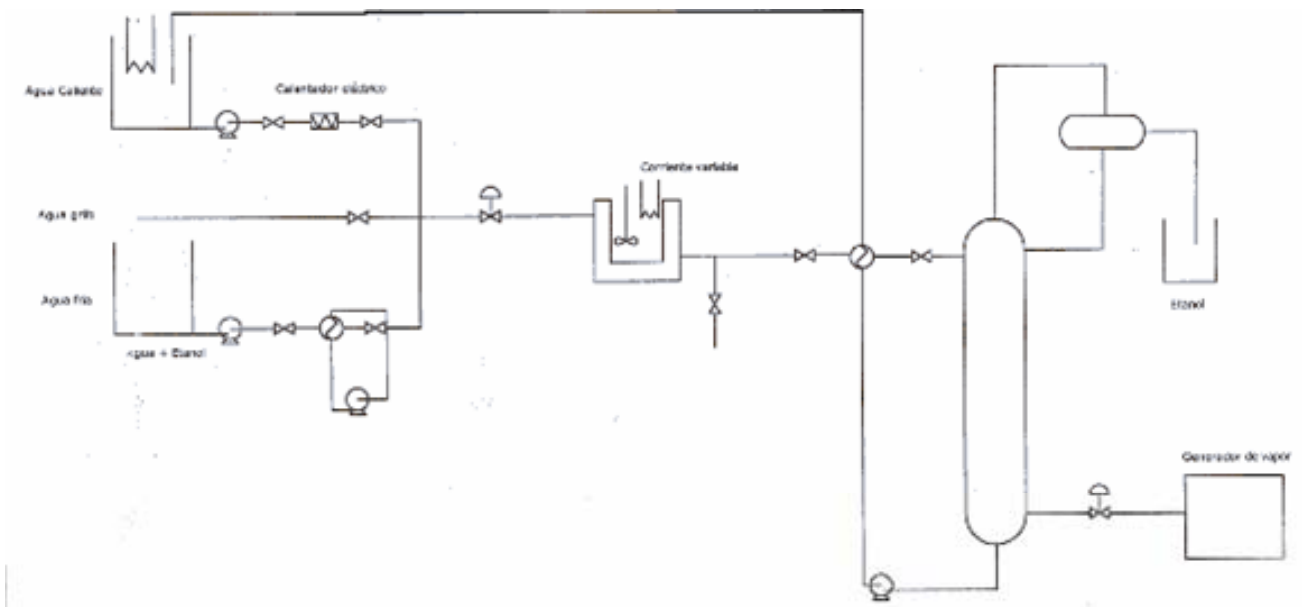


Figura 3. 6-Primer esquema de diseño de la Planta piloto

El funcionamiento final de la planta se encuentra definido de un modo muy aproximado en el esquema de la Figura 3.6, en el cual podemos apreciar los dos elementos principales, como son la columna de destilación y el reactor químico, además también se puede apreciar otra de las ideas con las que fue realizado el diseño, intentar cerrar todas las líneas de materia para de este modo desperdiciar la mínima cantidad de fluido posible.

Partiendo del esquema anterior se fueron añadiendo sobre él nuevos elementos que eran necesarios, como depósitos, válvulas, instrumentos, etc., con lo que aumentaba la complejidad y flexibilidad del mismo acercándose cada vez más al proceso final. En la Figura 3.7 se puede observar esta segunda fase de diseño del esquema P&ID (Pipes and Instruments Diagram) para la parte de la columna de destilación. [15]

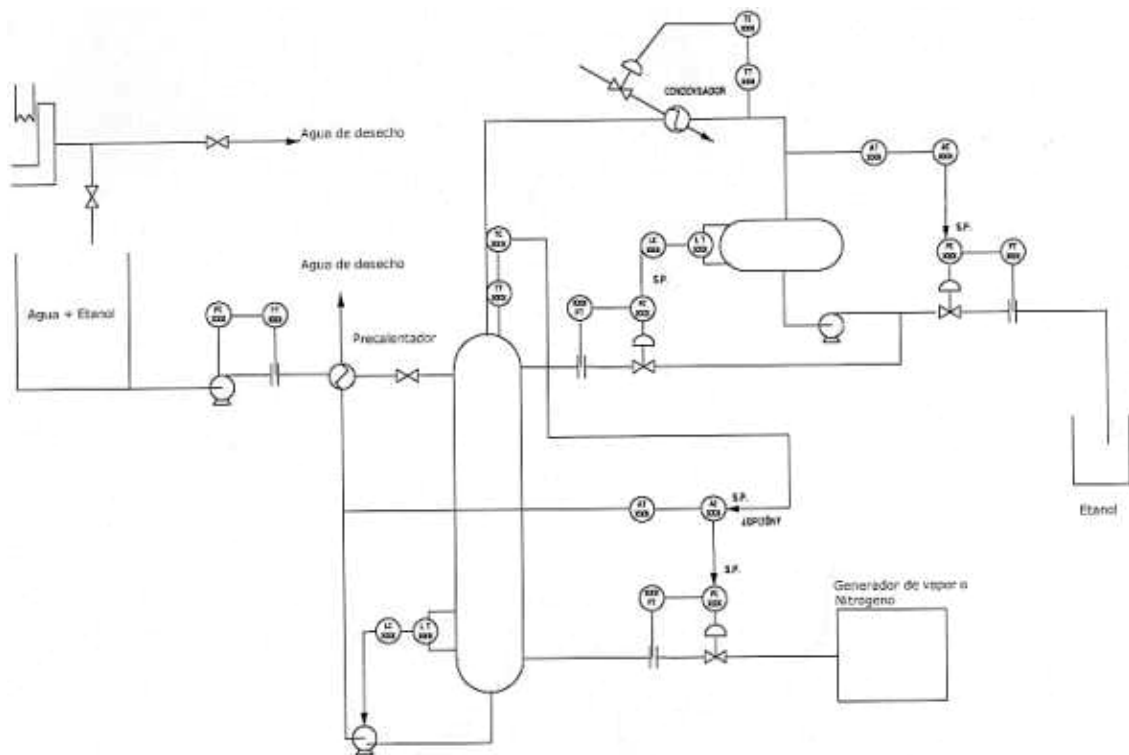


Figura 3. 7- Esquema de la columna con lazos de control iniciales

Tras las primeras aproximaciones se observó en el diseño del reactor químico que sería necesario la inclusión de un elemento anticongelante para uno de los fluidos, el cual debía refrigerar la camisa del reactor, debido a que la baja temperatura que debía conseguirse podría significar el congelamiento del fluido, en caso de que éste fuera agua. Este anticongelante debía ser lo más inocuo posible para las personas y a la vez cumplir con su cometido en la refrigeración.

Después de realizar un estudio comparando los diferentes anticongelantes o productos que pudieran ser utilizados con el mismo fin se llegó a la conclusión de utilizar etanol, ya que posee muy pocos riesgos para la salud y baja el punto de congelación de la mezcla con agua a unos niveles suficientemente operativos para lo requerido en esta parte del proceso.

En la tabla descrita a continuación Figura 3.8 se muestra la comparativa de riesgo de los diferentes productos estudiados [16]



	Inflamable	Pto. Ebullición	Pto. Fusión	Límite explosividad (% vol. en aire)	Densidad relativa (agua=1)	Límites de exposición
Etanol ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ / $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$)	Si	79 °C	-117 °C	3.3 - 19	0.8	TLV: 1880 mg/m^3 MAK: 1900 mg/m^3
Glicol de etileno	Si	198 °C	-13 °C	3.2 - 15.3	1.1	TLV: 127 mg/m^3
Acetona	si	56 °C	-95 °C	2.2 - 13	0.8	TLV: 1780 mg/m^3
Metanol	Si	65 °C	-94 °C	6 - 35.6	0.79	TLV: 262 mg/m^3 (piel)
Ciclohexano	si	81 °C	7 °C	1.3 - 8.4	0.8	TLV: 1030 mg/m^3 MAK: 1050 mg/m^3
Benceno	si	80 °C	6 °C	1.2 - 8	0.9	TLV: 32 mg/m^3

Figura 3. 8-Tabla de peligrosidad

Otra característica por la que se eligió el etanol fue porque se observó que era posible interconectar los procesos de la planta haciendo que la entrada a la columna de destilación fuese el fluido refrigerante, ya que la mezcla de agua y etanol es adecuada para su destilación o separación porque el punto de ebullición del etanol es menor que el del agua con lo que se necesita menos energía, y por tanto menos calor, para la separación de los componentes en comparación con otros tipos de mezclas estudiadas. Esta operación puede asemejarse a la de recuperación de disolventes que se realiza en las empresas colaboradoras en el proyecto.

Para realizar la unión de la parte del reactor con la parte de la columna se decidió la inclusión de un depósito auxiliar (Figura 3.9) que recogiera el fluido refrigerante que salía de la camisa del reactor y de ahí enviarlo a la entrada de la columna de destilación. De esta manera el cometido de este nuevo depósito es de ser un depósito de almacenamiento intermedio entre ambas partes de la planta, dado que el flujo de entrada



a la misma es considerablemente más pequeño que el flujo que sale de la camisa del reactor.

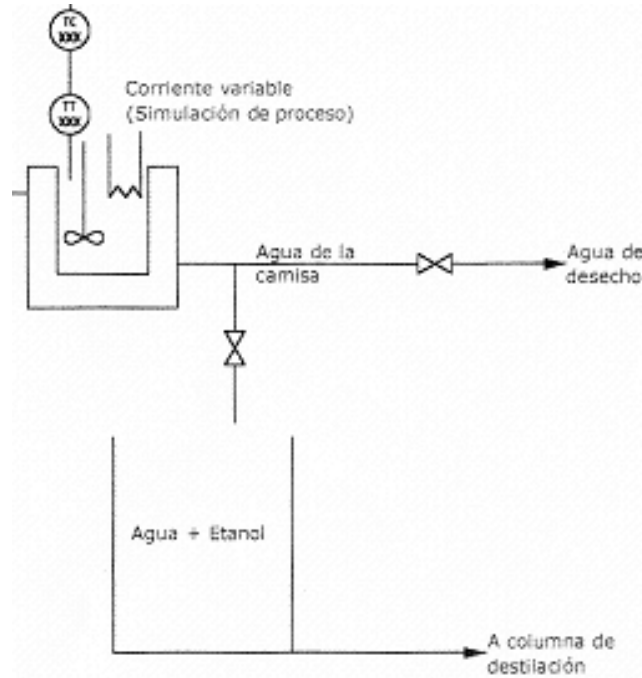


Figura 3. 9- Depósito de alimentación de la columna de destilación.

Con este esquema de funcionamiento se consigue por una parte reutilizar el etanol y el agua de la camisa, y por otra ampliar la complejidad de funcionamiento de la planta, con el consiguiente aumento de las posibilidades de plantear diferentes problemas en el control. El depósito intermedio permite la utilización por separado de cada uno de los procesos principales, con lo que, si se desea, se puede utilizar la columna de destilación mientras se realiza otro tipo de experimento con el reactor.

En estos diseños iniciales también se contempló la posibilidad de utilizar la columna de destilación con otras mezclas binarias aparte de agua-etanol, para lo cual se utilizaría este depósito de alimentación que contendría la mezcla a destilar.



3.4-Descripción funcional de los procesos adoptados. Partes fundamentales.

En este apartado se realiza una descripción en profundidad del funcionamiento de las columnas de destilación las empresas colaboradoras, para continuar con la descripción de la adaptación de este proceso para su inclusión en la planta piloto del modo más fiel posible.

3.4.1-Proceso original.

En el caso de este proyecto fin de carrera la elección de un proceso de destilación, se debe principalmente al proceso de retirado de disolventes llevado a cabo en ambas empresas colaboradoras tanto en Derivados Químicos S.A. como en Repsol S.A., pero siendo además en esta última su principal proceso productivo como es la destilación del petróleo.

Debido a estas dos causas la razón para la elección de este proceso es doble:

- **Temas medioambientales**, los cuales preocupan a las dos empresas y a la sociedad en general, debido a que en ocasiones, el retirado de estos disolventes no proporciona ningún beneficio económico, sino todo lo contrario un gasto adicional, pero contrariamente en el sector ambiental causa un beneficio enorme, ya que generalmente, suelen ser altamente contaminantes.
- **Sistema productivo** en Repsol S.A., como ya se ha comentado la producción en esta empresa se basa en la destilación, por lo que el estudio de este proceso también es beneficioso desde este punto de vista.

A continuación describimos estos dos procesos de un modo general:

➤ **Destilación del Benceno**

Aunque insoluble en agua, es miscible en cualquier proporción con disolventes orgánicos, esta incluido en los llamados compuestos aromáticos. El benceno es un disolvente eficaz para ciertos elementos como el azufre, el fósforo y el yodo, también



para gomas, ceras, grasas y resinas, y para los productos orgánicos más simples. Es uno de los disolventes más empleados en los laboratorios de química orgánica.

Son conocidos sus efectos cancerígenos, y puede resultar venenoso si se inhala en grandes cantidades. Sus vapores son explosivos, y el líquido es violentamente inflamable. A partir del benceno se obtienen numerosos compuestos, como el nitrobenceno. También es empleado en la producción de medicinas y de otros derivados importantes como la anilina y el fenol. El benceno (Figura 3.10) y sus derivados se encuentran incluidos en el grupo químico conocido como compuestos aromáticos.

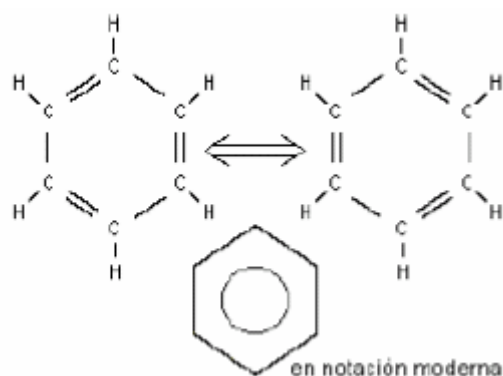


Figura 3. 10- Molécula de Benceno

El benceno puro arde con una llama humeante debido a su alto contenido de carbono. Mezclado con grandes proporciones de gasolina constituye un combustible aceptable. En Europa era frecuente añadir al benceno mezclado con tolueno y otros compuestos asociados al combustible de los motores, y sólo recientemente se ha tenido en cuenta su condición de agente cancerígeno.

El benceno es sin duda alguna un compuesto muy versátil y de mucha importancia en la química ya que de él surgen algunos compuestos derivados del mismo y además es uno de los mejores disolventes para el yodo azufre fósforo, gomas, ceras.

Posee muchos usos por la industria química tanto para la fabricación de fármacos como también en la anilina y el fenol.

Debido a este uso en la fabricación de fármacos es un compuesto muy utilizado en la empresa Derivados Químicos S.A. Por razones de higiene ambiental es necesario



retirar este disolvente de una mezcla con agua, y así, no enviar este peligroso componente junto con las aguas residuales al Río Segura, próximo a las instalaciones de la empresa.

El benceno tiene un punto de **fusión de 5,5 °C**, un punto de **ebullición de 80,1 °C**, y una densidad relativa de 0,88 a 20 °C. Gracias a estas características es posible su destilación cuando se encuentra mezclado con agua, obteniéndose éste como elemento más volátil de la mezcla.

➤ **Destilación del petróleo.**

El petróleo se forma bajo la superficie terrestre por la descomposición de organismos marinos. Los sedimentos se van haciendo más espesos y se hunden en el suelo marino bajo su propio peso. A medida que van acumulándose depósitos adicionales, la presión sobre los situados más abajo se multiplica por varios miles, y la temperatura aumenta en varios cientos de grados. El cieno y la arena se endurecen y se convierten en esquistos y arenisca; los carbonatos precipitados y los restos de caparzones se convierten en caliza, y los tejidos blandos de los organismos muertos se transforman en petróleo y gas natural. Figura 3.11.

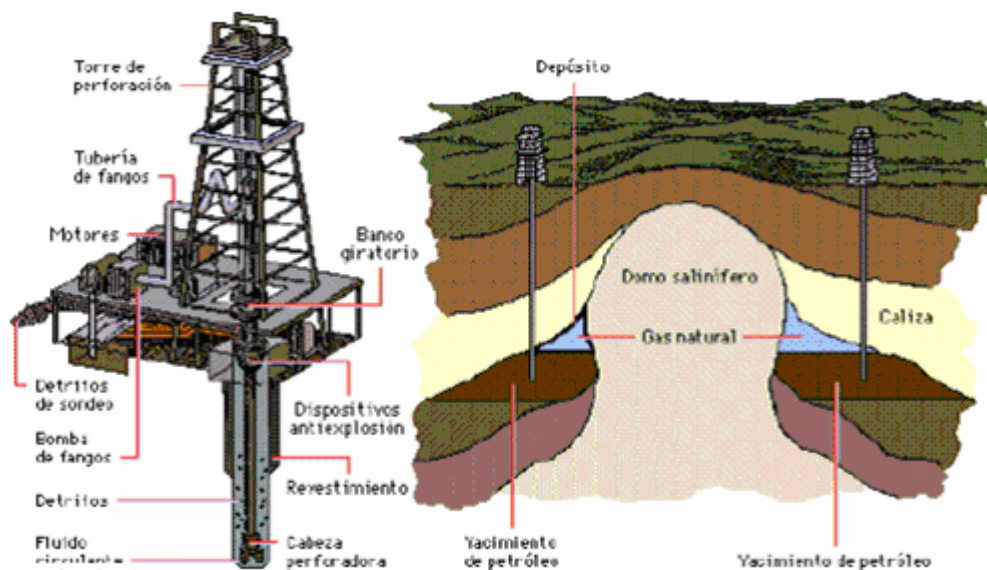


Figura 3. 11- Torre petrolífera y formación de petróleo.



Una vez extraído de la tierra mediante torres perforadoras, el petróleo llega a las refinerías en su estado natural para su procesamiento.

Una **refinería** es un enorme complejo donde ese petróleo crudo se somete en primer lugar a un proceso de destilación o separación física y luego a procesos químicos que permiten extraerle buena parte de la gran variedad de componentes que contiene. El petróleo tiene una gran variedad de compuestos, al punto que de él se pueden obtener por encima de los 2.000 productos.

El primer paso de la refinación del petróleo crudo se cumple en las torres de **destilación primaria o atmosférica** (Figura 3.12). En su interior, estas torres operan a una presión cercana a la atmosférica y están divididas en numerosos compartimientos a los que se denominan "**bandejas**" o "**platos**". Cada bandeja tiene una temperatura diferente y cumple la función de fraccionar los componentes del petróleo. El crudo llega a estas torres después de pasar por un horno a temperaturas de hasta 400 grados centígrados que lo convierten en vapor. Esos vapores entran por la parte inferior de la torre de destilación y ascienden entre las bandejas y a medida que suben pierden calor y se enfrían.

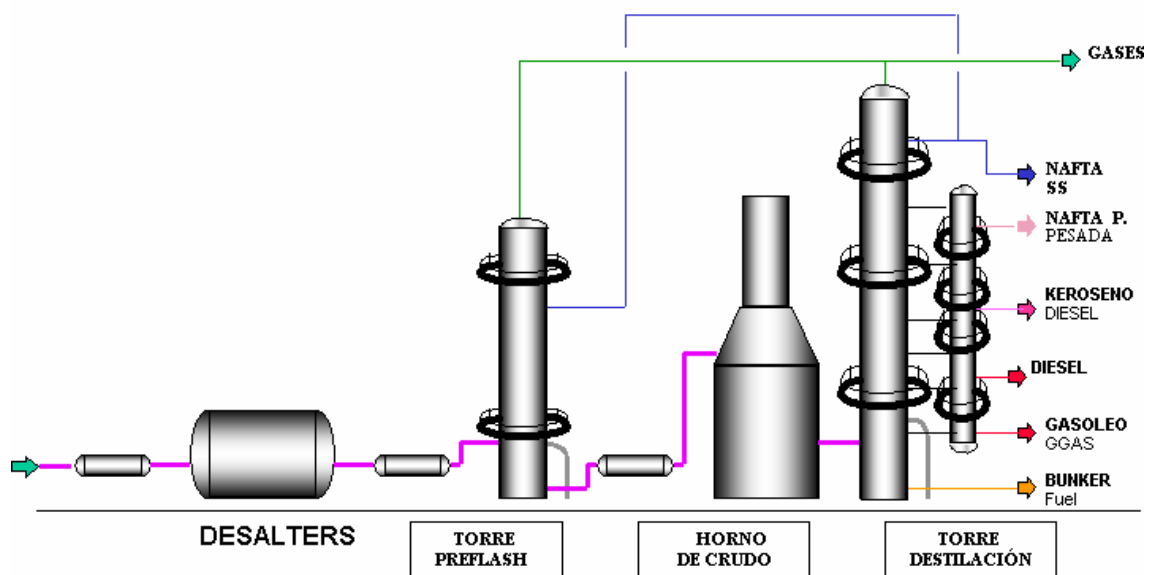


Figura 3. 12- Esquema del proceso de una Unidad de Destilación Atmosférica.

Cuando cada componente vaporizado encuentra su propia temperatura, se condensa y se deposita en su respectiva bandeja, a la cual están conectados conductos por los que se recogen las distintas corrientes que se separaron en esta etapa. Al fondo de la torre cae el "crudo reducido", es decir, aquel que no alcanzó a evaporarse en esta primera etapa. Se cumple así el primer paso de la refinación.

Posteriormente estos productos se envían a otras torres o plantas la cuales obtienen los productos finales. Como muestra el esquema de la Figura 3.13, en el cual se puede apreciar como al salir de la primera etapa, y según la bandeja se obtienen productos o derivados diferentes. [17]

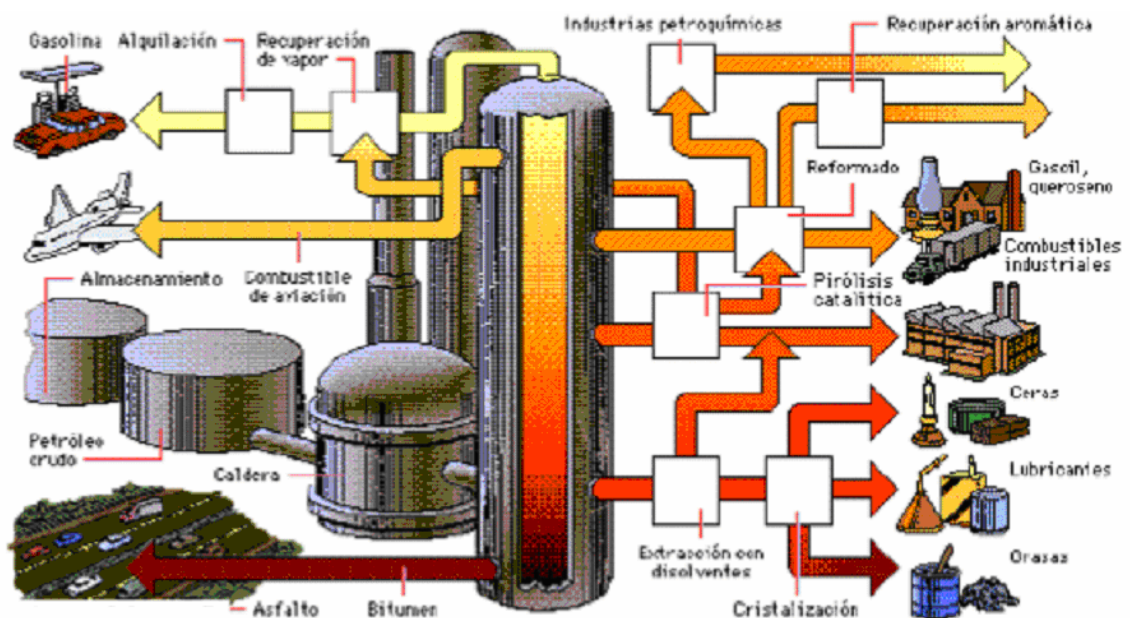


Figura 3. 13- Esquema de la destilación del petróleo.



3.4.2-Proceso adaptado.

Para la adaptación del proceso anterior a tamaño de planta piloto (Figura 3.14) utilizable para investigación se han debido realizar una serie de modificaciones que determinan el funcionamiento final de la planta piloto, siendo además todo este diseño es totalmente variable pudiendo independizarse unos elementos de otros gracias a las conexiones flexibles utilizadas para enlazar cada parte con las siguientes.

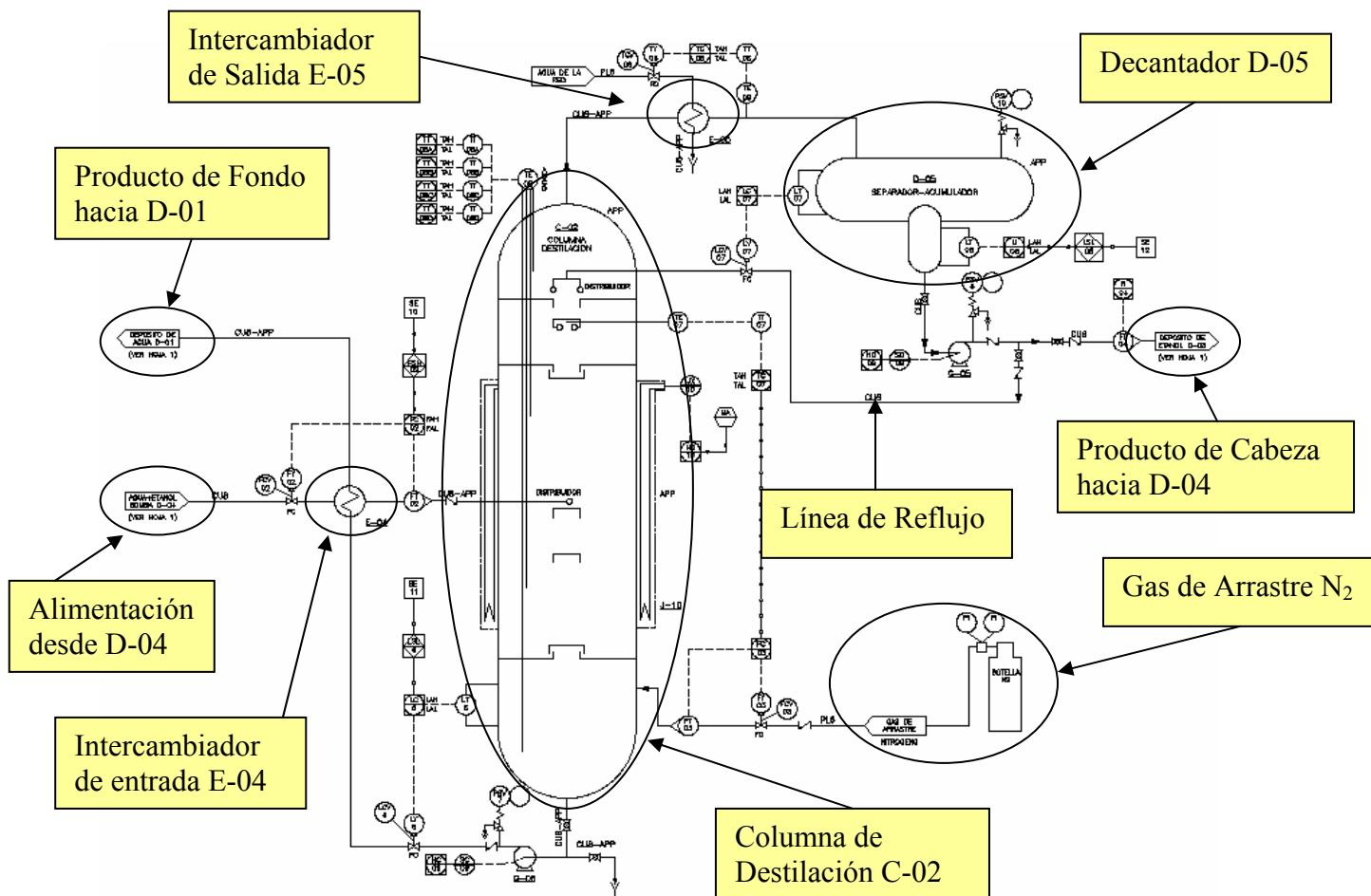


Figura 3. 14-Esquema P&ID del proceso.

Para mas detalles consultar *Anexo 2: Planos*.

➤ Columna de Destilación C-02:

Conforme al reactor ha sido necesario realizar cambios, además de en su tamaño que disminuye al nivel de una planta piloto, otros constructivos necesarios precisamente por el pequeño tamaño del equipo.



El cambio principal, ha sido el sustituir el caudal de vapor, encargado tanto de suministrar la energía de calentamiento, como de colaborar la función de arrastre del elemento ligero de la parte inferior a la parte superior de la columna. Para realizar estas funciones, se utilizan unas resistencias calefactoras en forma toroidal situadas a lo largo de toda la columna abrazando a ésta; la función de arrastre es realizada por N_2 , elegido para esta función por tratarse de un gas totalmente inocuo. Además este diseño tiene la ventaja de que no elimina la posibilidad de utilizar vapor de agua para realizar la destilación (stripping), si en un futuro decidiera operar mediante este método.

A nivel constructivo no cabe señalar ningún cambio en especial, ya que su fabricación fue realizada en acero, material muy común para una columna de destilación industrial, con la salvedad de las dificultades que pueda acarrear el trabajar a esta escala.

➤ **Depósito D-04**

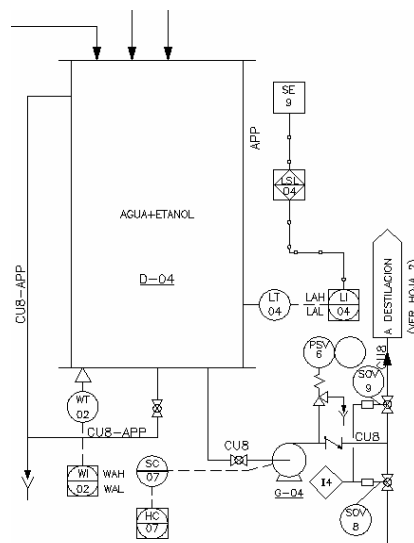


Figura 3. 15- Depósito D-04.

Este depósito (Figura 3.15) almacena el fluido refrigerante que estará compuesto por una mezcla de agua y etanol proveniente de la parte de la planta del reactor químico, como ya se ha mencionado anteriormente. Este fluido es ahora utilizado como entrada de la columna de destilación enviando mediante la bomba G-04 dicho material hacia el interior de la columna (Figura 3.16). Dicha bomba mediante dos válvulas de solenoide,



permite en caso de que sea necesario, enviar el refrigerante de nuevo a la parte de la planta correspondiente al reactor químico (depósito D-02), para poder ser reutilizado.

Como se puede apreciar por su funcionamiento, este depósito no es otra cosa que un “depósito pulmón”, que nos permite realizar interacciones entre las dos partes principales de planta de una forma cómoda.

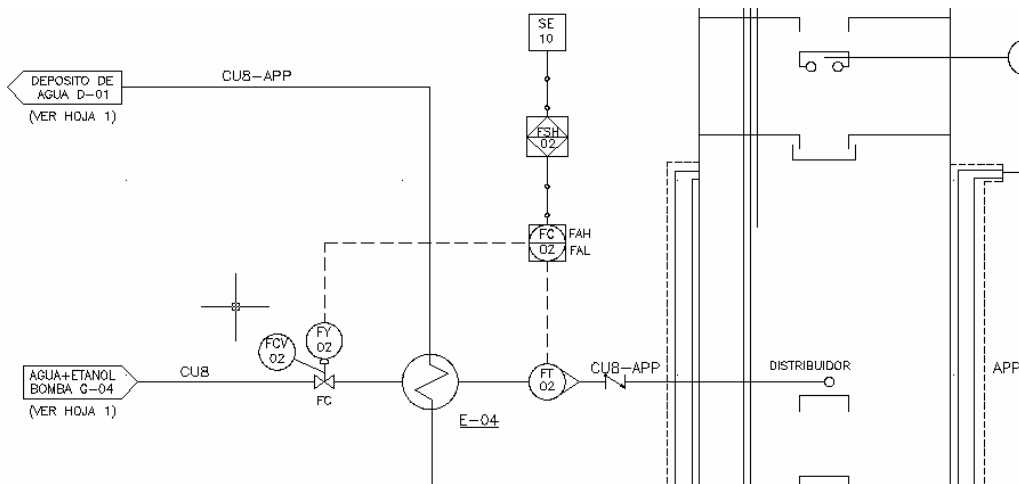


Figura 3. 16- Entrada de materia a la columna

➤ Fondo de la columna

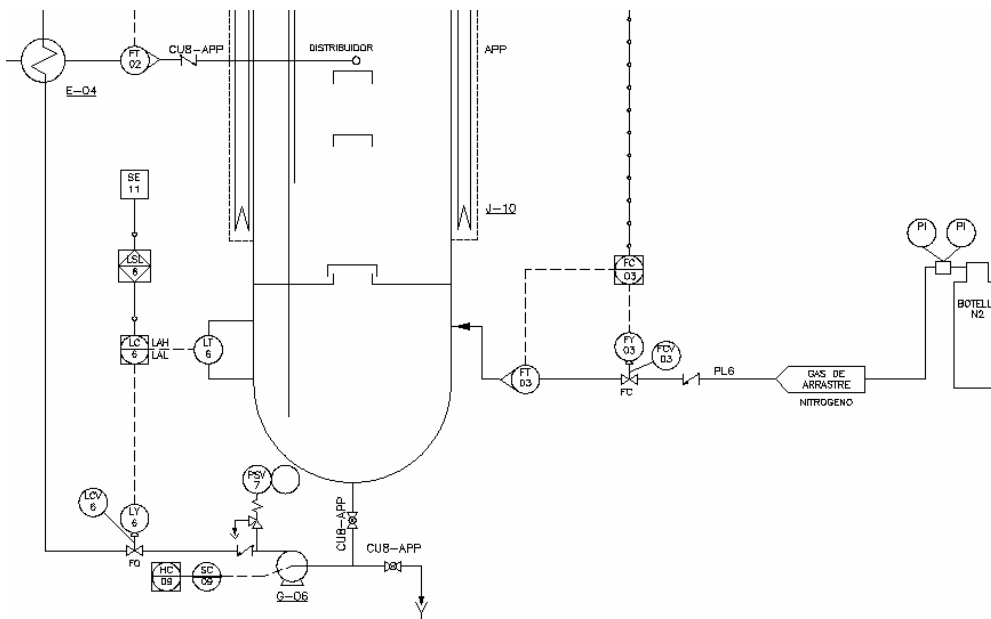


Figura 3. 17- Fondo de columna de destilación.

En esta parte de la torre (Figura 3.17) cabe destacar dos partes principales:

- **Salida de líquido de fondo:** El fluido pesado obtenido en el fondo de la columna (agua), es enviado mediante la bomba G-06 al depósito D-01 (perteneciente a la parte del rector químico), y de este modo reutilizar esta agua, pero además de reutilizar el agua también se aprovecha la energía térmica que esta posee, haciéndola pasar a través del intercambiador de calor E-04 encargado de precalentar la entrada de alimentación de la columna de destilación.
- **Entrada de gas de arrastre (N₂):** Esta entrada posee la opción, de inyectar gas (o vapor si se desease) para servir como gas de arrastre y favorecer de este modo la destilación, o incluso de no ser utilizada si no se desea, ya que este gas no es fundamental para la destilación.

➤ **Salida de la torre**

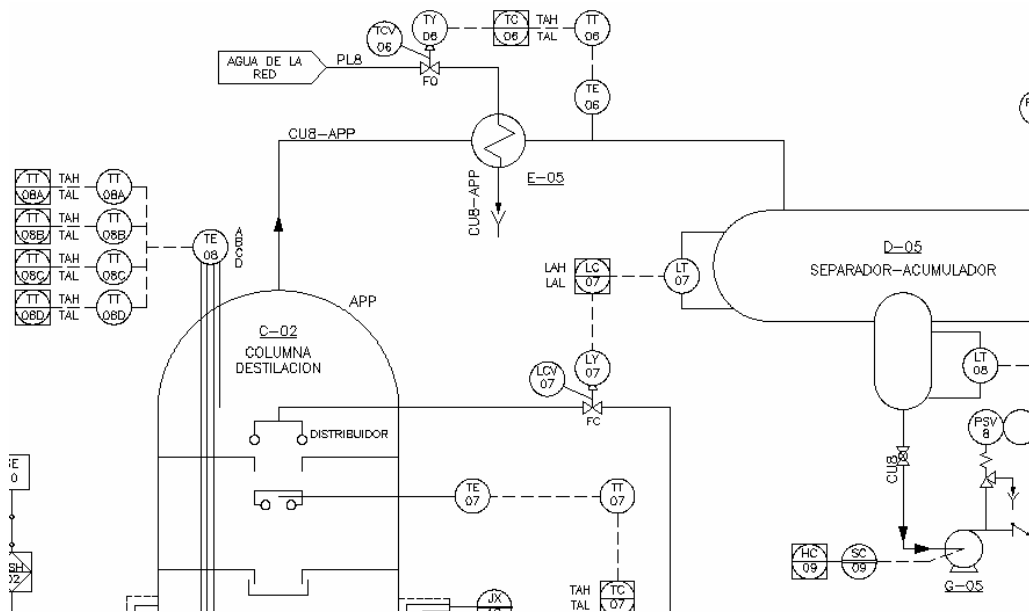


Figura 3. 18- Parte superior de la columna de destilación.

El producto de salida (en fase vapor), sale por la cabeza (Figura 3.18) de la torre de destilación y es enfriado mediante el intercambiador E-05, por el que también circula agua de red. Una vez enfriado este vapor pasa al depósito separador.



➤ **Depósito separador-decantador**

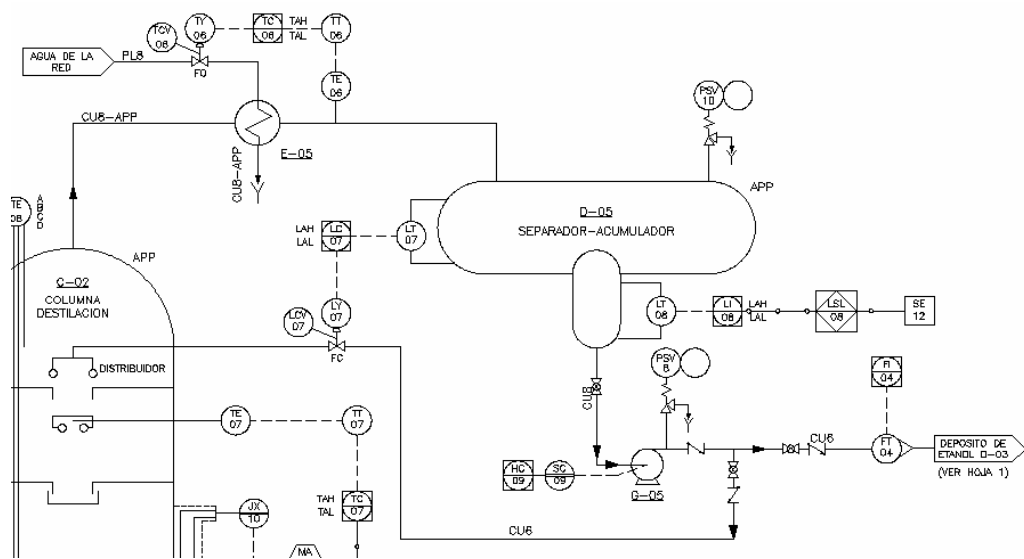


Figura 3. 19- Depósito separador-acumulador.

En este depósito (Figura 3.19) el vapor subenfriado pasa a fase líquida, para así obtener el producto (etanol) a través de la bomba G-05, además esta bomba también es la encargada de enviar el material de realimentación a la cabeza de la columna.

➤ **Depósito D-03**

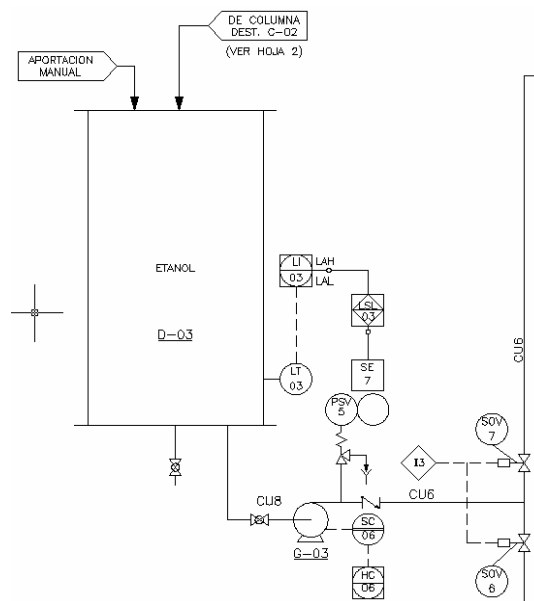


Figura 3. 20- Depósito D-03.



Este depósito (Figura 3.20) almacenará el etanol que proviene del depósito decantador, o mediante aportación manual, si no es suficiente con el etanol obtenido de la destilación. El contenido de este depósito es enviado a través de la bomba G-03 a los depósitos D-02 o D-04, seleccionando mediante dos electroválvulas para realizar la mezcla de agua y etanol con el porcentaje que se desee.

3.5-Cálculos estimativos.

El desarrollo y cálculo de una columna de destilación es una tarea que presenta una alta complejidad debido a que son necesarios altos conocimientos de química y una cierta experiencia en este tipo de tareas. Debido a las dificultades encontradas para realizar dichas tareas se decidió contratar a la empresa de ingeniería **Ingasol S.L.** que cuenta con una amplia experiencia en este tipo de trabajos ya que ha realizado trabajos similares con las plantas piloto de Repsol.

A partir de unas especificaciones generales aproximadas que se suministraron (ver *Anexo I: Especificaciones Básicas*), esta empresa se encargó además de los diseños y cálculos de detalle, de la supervisión constructiva y de la contratación de la empresa de calderería que llevó a cabo el trabajo. Las especificaciones dadas a la ingeniería, estimando estos datos a partir de columnas de destilación piloto ya existentes [12] como las de Gunt o Armfield, anteriormente comentadas y además, teniendo en cuenta el tamaño de algunos depósitos compartidos con la parte del reactor químico, se llegó a las siguientes conclusiones:

- **Altura** máxima de la columna: 2 m.

Debido a circunstancias de espacio, tanto del laboratorio donde se ubicaría la planta, como por no hacer excesivamente grandes sus dimensiones, y de este modo poder otorgarle cierta movilidad. Por estos motivos se estima adecuada una altura de unos dos metros aproximadamente.

- **Caudal** de entrada a la columna: 3 l/h.

Una vez estimado el tamaño de esta columna, y comparando diferentes columnas de destilación de tamaños similares ya construidas, puede valorarse que el caudal de



entrada de producto a la columna, será de unos 3 l/m, debiendo ser aun ratificado por el diseño de la empresa de ingeniería.

- **Tiempo** de destilado: 8 horas aproximadamente.

Al igual que en el caso anterior este valor fue aproximado a partir de valores en columnas de similares características.

- Resultados obtenidos en la **Simulación**:

Otro factor importante a tener en cuenta son las conclusiones obtenidas en la simulación, de las cuales cabe destacar sobre todo la flexibilidad de las líneas de fluido, para así poder intercambiar los depósitos, o cualquier otro elemento, ampliando de este modo el abanico de posibles experimentos a realizar con la planta. Debido a estas circunstancias se decidió construir la planta de un modo modular que permitiera unir o separar sus partes según las necesidades de cada experimento. (Figura 3.21)

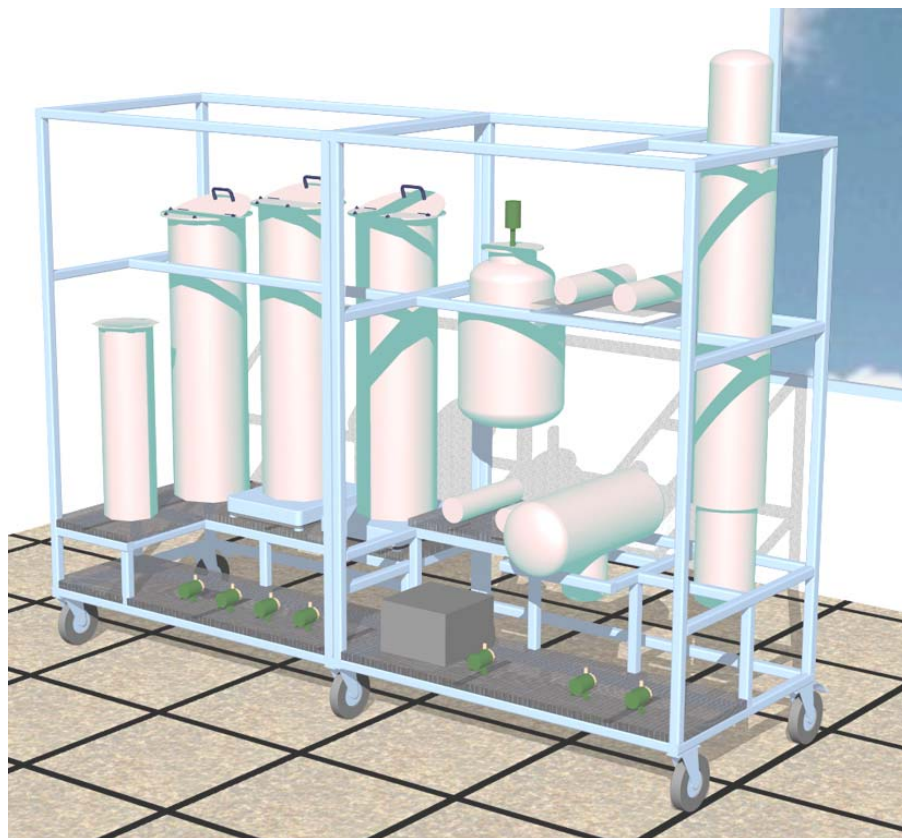


Figura 3. 21-Simulación 3D constructiva Planta Piloto.



4.- Sistema de Control y Actuadores.

Para el correcto funcionamiento de la planta piloto de un modo automático, es necesario dotar a ésta de una serie de sensores y actuadores, así como de un sistema de control que gobierne la planta y permita dicho funcionamiento de un modo autónomo. Debido a estas circunstancias para la elección de esta serie de elementos, la mejor opción parece ser el ver la planta piloto de un modo general, y no como dos subsistemas, ya que el sistema de control englobará todos los elementos, tanto de la parte perteneciente al Reactor Químico, como de la correspondiente a la Columna de Destilación.

Por las razones anteriores es necesario aclarar antes de continuar este capítulo, que para facilitar esta elección de elementos se decidió dividir esta labor entre los dos proyectos que se encargan de desarrollar esta planta, haciéndose cargo de la elección de toda la instrumentación de procesos el proyecto correspondiente al Reactor Químico, por tanto, la parte correspondiente a los actuadores y sistema de control se encuentra desarrollada por el actual proyecto perteneciente a la parte de la Columna de Destilación. [15]

Para mas detalles consultar *Anexo 3: Hojas de datos* (formato electrónico).

4.1- Elección del sistema de control.

Teniendo en cuenta la envergadura del proyecto y las futuras aplicaciones del mismo se decidió utilizar un sistema de control distribuido, ya que este tipo de sistemas permite una manipulación mayor sobre el proceso que un control mediante autómatas programables. Por ello se optó en un principio en utilizar el sistema DeltaV de Fischer Rosemount que se encuentra disponible en el departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad Politécnica de Cartagena. Este sistema es precisamente el utilizado por la empresa Derivados Químicos S.A. en su planta de producción, por lo que la adaptación de los experimentos llevados a cabo en la planta piloto sería casi inmediata en la planta de producción. Con este sistema se estuvo trabajando durante un tiempo pero al final tuvo que ser desechado debido a las siguientes circunstancias:



- Se trata de un **sistema cerrado** y con gran dificultad para acceder al software y poder implantar algoritmos propios, siendo este uno de los fundamentos principales del proyecto.

-Las posibles **ampliaciones y actualizaciones**, que en algún caso eran necesarias, poseían un alto coste y no **se facilitaban ni como versión educativa**. Tras todo esto se procedió a realizar una búsqueda y comparativa de otros sistemas alternativos que pudieran servir para el propósito necesitado. Se envió la misma información sobre los requerimientos del sistema a los siguientes fabricantes: ABB, DeltaV (Fischer Rosemount), Eurotherm, ICP-DAS, Idec, Omrom, Opto 22. También se pidió información a otros fabricantes pero no se recibió ninguna oferta de su parte por lo que no se tuvieron en cuenta para la decisión final, aparte de que sus sistemas no eran del todo adecuados. Una vez que se tuvieron todas las ofertas se confeccionó una pequeña tabla comparativa en la que se pusieran de manifiesto ciertas características importantes para la elección del más adecuado.

A continuación se muestra la tabla comparativa (Tabla 3.1):



Marca	Ventajas Hardware	Ventajas Software	Inconvenientes Hardware	Inconvenientes Software	Servicio posventa e información	Precio sistema (Euros)	Precio SCADA	Total
ICP-DAS I-8838	- DCS - Precio muy asequible.	- Posibilidad programación en MATLAB.	- Marca muy poco conocida. - Sin HART.	- Sistema poco probado.	Información disponible en red	2.762,66	1.800	4.562,66
IDEC	- Precio asequible.	- Muy buen SCADA	- PLC no DCS. - No Ethernet - Sin HART.	- Modo de programación poco eficiente.	Información disponible en red.	5.460,48	3.006	8.466,48
OMRON	- Muy extendido en la región.		- PLC no DCS. - Sin HART.	- Modo de programación poco eficiente.	Ampliaciones del sistema caras.	7.501,24	1.500	10.001,24
EUROTHERM	- DCS - Utilizado por REPSOL.	- Sistema muy avanzado y moderno.	- Demasiado caro.		Parece adecuado.			42.091,25
OPTO22	- Sistema similar a un DCS.	- Fácil de utilizar.	- Sin HART.	- No es un DCS puro.	Muy bueno actualizaciones e información "gratuitas"	15.459,90	0	15.459,90
DELTA-V	- Parte del sistema comprado. - Marca muy importante	- Sistema muy avanzado.		- Alto precio por actualizaciones y ampliaciones y poca flexibilidad	Muy mal servicio posventa.			Disponible en Universidad (Pero debe Ampliarse)



ABB (ac800m)	-Señales Hart y bus Foundation Fieldbus			-Requiere VB 6 y Windows2000 prof. Ver. Inglesa		8.396,31	1.395,82	9.792,13
ABB (ac800c)			-Sin Hart y sólo admite Profibus DP	-Igual que la anterior.		5.924,35	1.395,82	7.320,17

Tabla 3. 1- Comparativa de Sistemas de Control.



Tras estudiar los pros y los contras de cada una de las opciones disponibles se decidió implantar el sistema de la empresa **ICP-DAS I-8838**.

4.2-Descripción del sistema de control.

El I-8838 es un sistema basado en una red modular con la capacidad de conectar E/S a través de su bus local y de tarjetas de expansión E/S o con una extensión de la red. El sistema se compone de una unidad de control principal con interfaz de comunicación estándar en la propia unidad y un bus de E/S que permite expandir las E/S. El bus puede tener conectados tanto tarjetas de E/S serie como paralelas. El bus paralelo se utiliza para transferencia de datos de alta velocidad. La unidad puede comunicarse tanto por el bus serie RS-232 como a través de ethernet o CANbus. La versión que se posee es la que incluye un interfaz ethernet el cual contiene un servidor web integrado lo que posibilita la creación de aplicaciones para internet e intranet. [18]

El sistema puede ser usado como un sistema distribuido inteligente de adquisición de datos conectado a un PC cliente en el que corra un SCADA estándar o puede ser usado también como un controlador autónomo corriendo una aplicación software embebida.

Este tipo de configuración es muy similar a un DCS (Distributed Control System) que es el tipo de sistema que cumple mejor las especificaciones para controlar la planta piloto, porque son estos los sistemas de control utilizados en las empresas colaboradoras.

Una de las razones por las que se escogió el sistema fue por su flexibilidad ya que la programación del mismo se lleva a cabo en el entorno Simulink de Matlab. Esto simplifica enormemente la creación de programas y la implantación de nuevos algoritmos de control porque este entorno de programación es muy utilizado por el Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad Politécnica de Cartagena por lo que se posee un dominio previo del modo de programación del sistema de control. Aparte este entorno permite realizar simulaciones con las que comprobar el adecuado funcionamiento de los algoritmos desarrollados.



Simulink está provisto de un interfaz gráfico de usuario (GUI) para construir modelos mediante diagramas de bloques. Además la herramienta Real Time Workshop basada en Matlab/Simulink suministra un ambiente de desarrollo en tiempo real aproximando el diseño del sistema a la implantación hardware.

El controlador de Matlab integrado de la unidad presenta una solución de control en tiempo real para el I-8838 equipado con varios módulos de E/S. Hay más de 20 modelos diferentes de E/S y bloques de función a nivel de sistema para Simulink disponibles para realizar aplicaciones personalizadas. Usando el entorno de desarrollo Simulink y los bloques de Matlab para el controlador I-8838 se pueden desarrollar y verificar fácilmente diferentes algoritmos de control. En cuanto el algoritmo sea validado, simplemente pulsando un botón “construir”, el usuario convierte el modelo de control en un ejecutable que se envía inmediatamente al controlador I-8838 a través de ethernet o de RS-232 (Figura 4.1) para ser testado sin pasar previamente por ningún proceso de traducción manual a otro lenguaje.

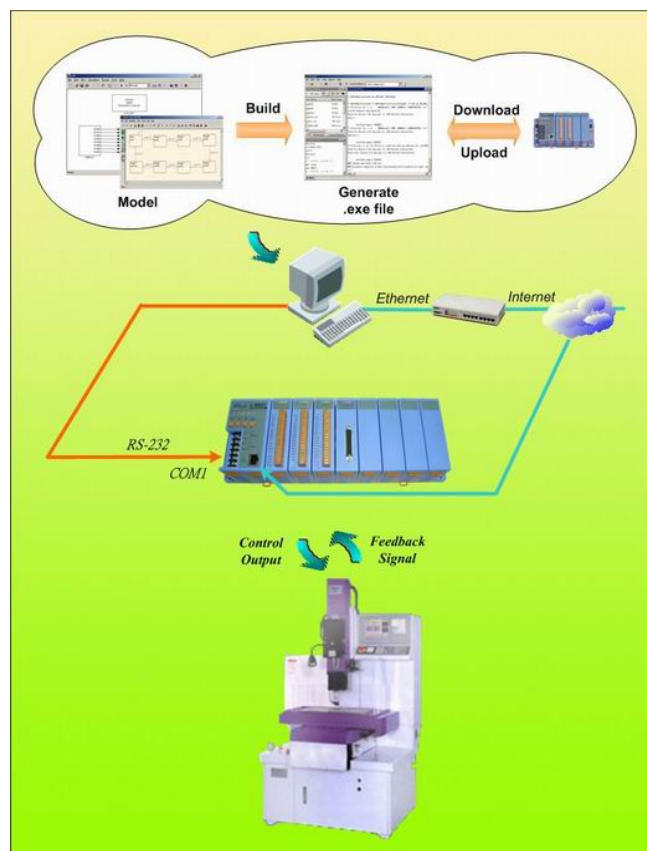


Figura 4. 1- Esquema de proceso del I-8000.



El software requerido para la programación del sistema es el siguiente:

- MATLAB 6.1 o 6.5
- Simulink 4.1 o 5.0
- Real-Time Workshop 4.1 o 5.0
- Real-Time Workshop Embedded Coder 2.0 o 3.0
- Stateflow and Stateflow Coder 4.1 o 5.0(opt.)

El sistema se compone de cuatro componentes básicos (Figura 4.2):

1. Unidad de control principal.
2. Unidad de expansión de E/S.
3. Tarjetas de E/S.
4. Sistema operativo integrado.

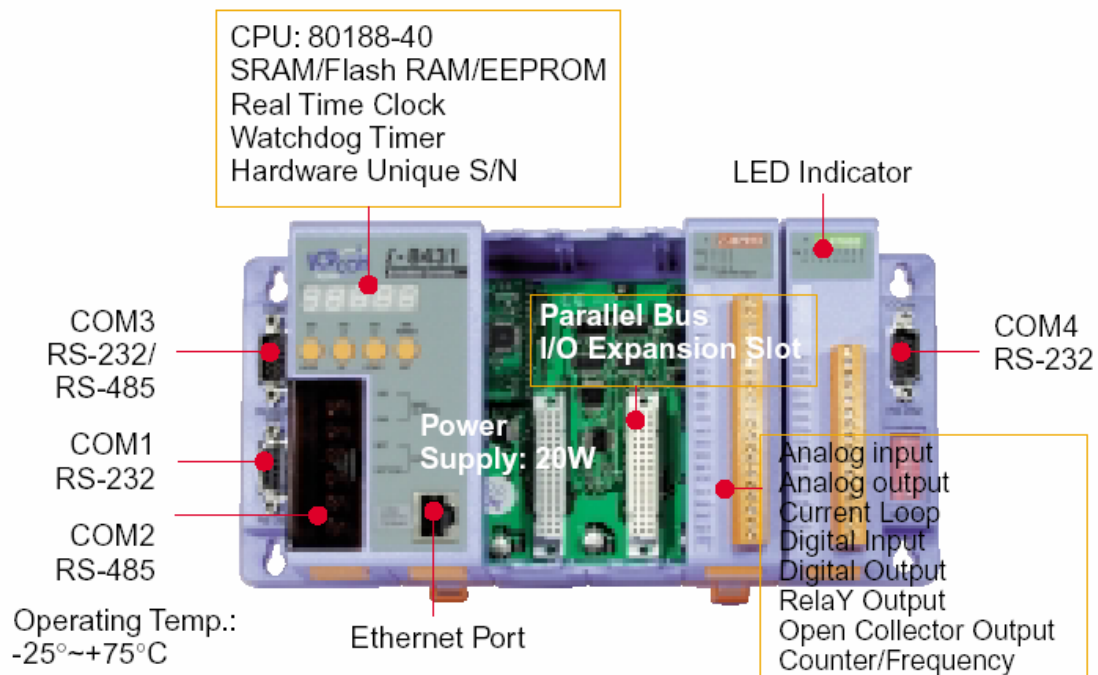


Figura 4. 2-Partes principales del sistema I-8000



4.2.1-Unidad de control principal I-8438:

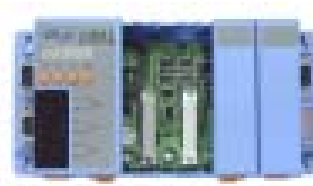


Figura 4. 3- Unidad de control.

La unidad principal de control (Figura 4.3) es el cerebro del sistema. Comprende un módulo de proceso central (CPM), una fuente de alimentación y 4 slots para 4 tarjetas paralelo de E/S. El CPM está altamente integrado incluyendo la CPU, RAM y ROM y los interfaces de comunicación RS-485, RS-232 y Ethernet. Las especificaciones son las siguientes:

- **CPU:** 80186, 80 MHz
- **SRAM:** 512 Kbytes
- **Flash ROM:** 512 Kbytes
- **EEPROM:** 2 Kbytes 64-bit con número de serie de hardware único. Watchdog Timer integrado.
- **Real Time Clock**
- **COM0:** para uso interno
- **COM1:** RS-232/puerto de descarga de programa
- **COM2:** 10 BaseT NE2000 compatible
- **COM3:** RS-232/485
- **COM4:** RS-232
- **S-MMI:** Small Man Machine Interface
- **E/S Slot de Expansion:**

4-slots

- **Fuente de alimentación:** 20W

No regulada, desde +10Vdc a +30Vdc

- **Ambiente:**



Temperatura de funcionamiento: -25°C a $+75^{\circ}\text{C}$.

Temperatura de almacenamiento: -30°C a $+85^{\circ}\text{C}$

Humedad: 0 ~ 95%, sin condensación.

▪ **Dimensiones:**

354 x 110 x 75.5 mm (8 slots)

4.2.2-Unidad de expansión E/S I-87K8:



Figura 4. 4- Unidad de expansión E/S I-87K8.

Las unidades de expansión de E/S (Figura 4.4) se usan para aumentar el número de tarjetas de E/S. Cada unidad de expansión se compone de una fuente de alimentación y un número de slots de expansión de E/S serie, en nuestro caso 8. Está equipada con un bus RS-485 a 115.2 Kbps para enlazarla con la unidad de control principal.

Las especificaciones son las siguientes:

Características principales:

-Puerto COM2:

Puerto RS-485, 115.2K BPS máx.

Data+, Data-

16550 compatible, 16 bytes FIFO

256 de 7000 módulos directamente direccionables

-máxima distancia a unidad de control principal: 1.2 Km.

-Voltaje de aislamiento: 2500Vdc



Slots de expansión E/S

Soporte para 8 módulos E/S serie

Fuente de alimentación: 20W

No regulada, desde +10Vdc a +30Vdc

Ambiente:

Temperatura de funcionamiento: -25° C a +75° C.

Temperatura de almacenamiento: -30° C a +85° C

Humedad: 0 ~ 95%, sin condensación.

4.2.3-Tarjetas de E/S.



Figura 4. 5- Tarjetas de E/S.

Existen dos tipos de tarjetas (Figura 4.5) de E/S: paralelo o serie. Las tarjetas paralelo están indicadas para aplicaciones de alta velocidad, y deben ser instaladas en la Unidad Principal de Control. Las tarjetas serie pueden ser instaladas en cualquier unidad de expansión (tanto serie como paralelo).

Características principales de las tarjetas paralelo (tarjetas de la serie 8K):

-Alta velocidad conversión A/D: 100 Ksamples/segundo

-Alta velocidad conversión D/A: 30 K de -10V a +10V



-Alta velocidad E/S digitales: todas las tarjetas digitales poseen un indicador de estado visual mediante leds.

-Alta velocidad para tarjetas de control por pasos y servos.

-Alta velocidad para encoder.

-Alto rendimiento en contadores y frecuencímetros.

-Alta velocidad para tarjetas multicanal RS-232/RS-422/RS-485

-Interfaz para impresora y X-Socket

Características principales de las tarjetas serie (tarjetas de la serie 87K):

-Tarjetas de entrada para RTD.

-Tarjetas de entrada para termopares.

-Tarjetas de entrada para galgas extensiométricas.

-Tarjetas de entrada analógicas multicanal de alta resolución.

-Tarjetas aisladas de conversión D/A multicanal.

-Tarjetas de E/S digitales con latch y contador.

-Tarjetas contadoras y frecuencímetros.

Para nuestro sistema se poseen las siguientes tarjetas de E/S:

- En la Unidad de Control Principal: dos tarjetas E/S digital i-8042 y una tarjeta de entrada analógica de 8 canales i-87017.
- En la unidad de expansión: cinco tarjetas de salida analógica de 4 canales i-8024 y tres tarjetas de entrada analógica de 8 canales i-87017.



A continuación se muestra una descripción detallada de cada una de las tarjetas E/S de las que se dispone:

I-87017

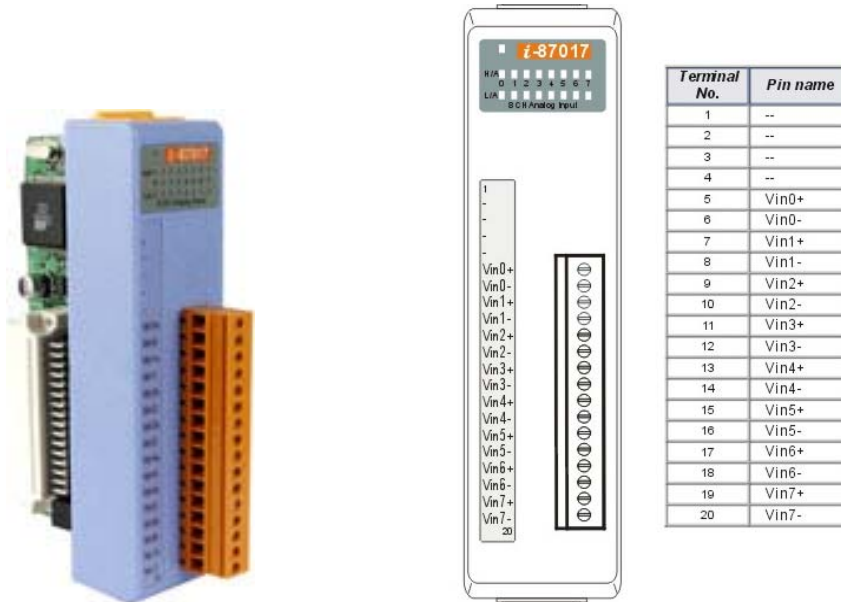


Figura 4. 6- I-87017.

Se trata de una tarjeta de 8 canales de entrada analógica con las siguientes características (Figura 4.6 y 4.7):

- Entradas diferenciales
- Tipos de entrada: mV, V o mA (con resistencia externa)
- Impedancia de entrada 20 MΩ
- Ratio de muestreo: 10 Hz total
- Resolución 16 o 12 bits
- CMR: 86 dB
- Protección de sobretensión: ±35 V



-Aislamiento: 3000 Vrms

-Consumo: 1.2 W máximo.

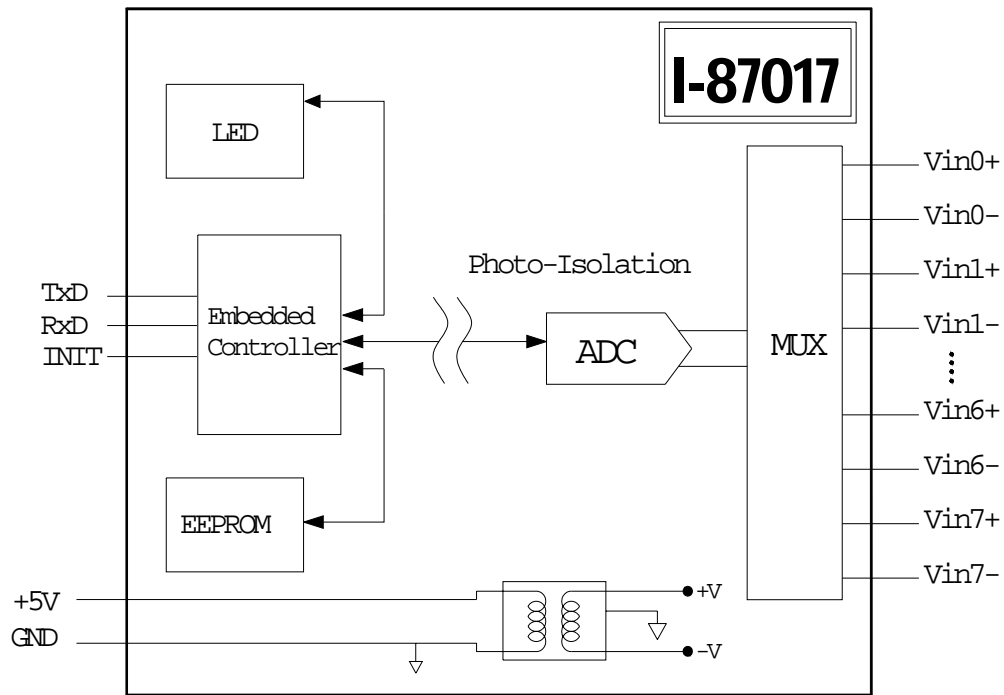


Figura 4. 7-Estructura interna de la tarjeta i-87017

I-87024



Figura 4. 8- I-87024.



Es una tarjeta de salidas analógicas de cuatro canales (Figura 4.8 y 4.9).

- Tipo de salida: V o mA
- Voltaje de salida ± 10 V.
- Corriente de salida 0-20 mA/4-20 mA, exactitud $\pm 0.1\%$ del fondo de escala.
- Resolución $\pm 0.02\%$ del fondo de escala a 14bits.
- Coeficiente de variación del span con la temperatura: ± 20 ppm/ $^{\circ}$ C
- Aislamiento 3000 V.
- Consumo 2 W.

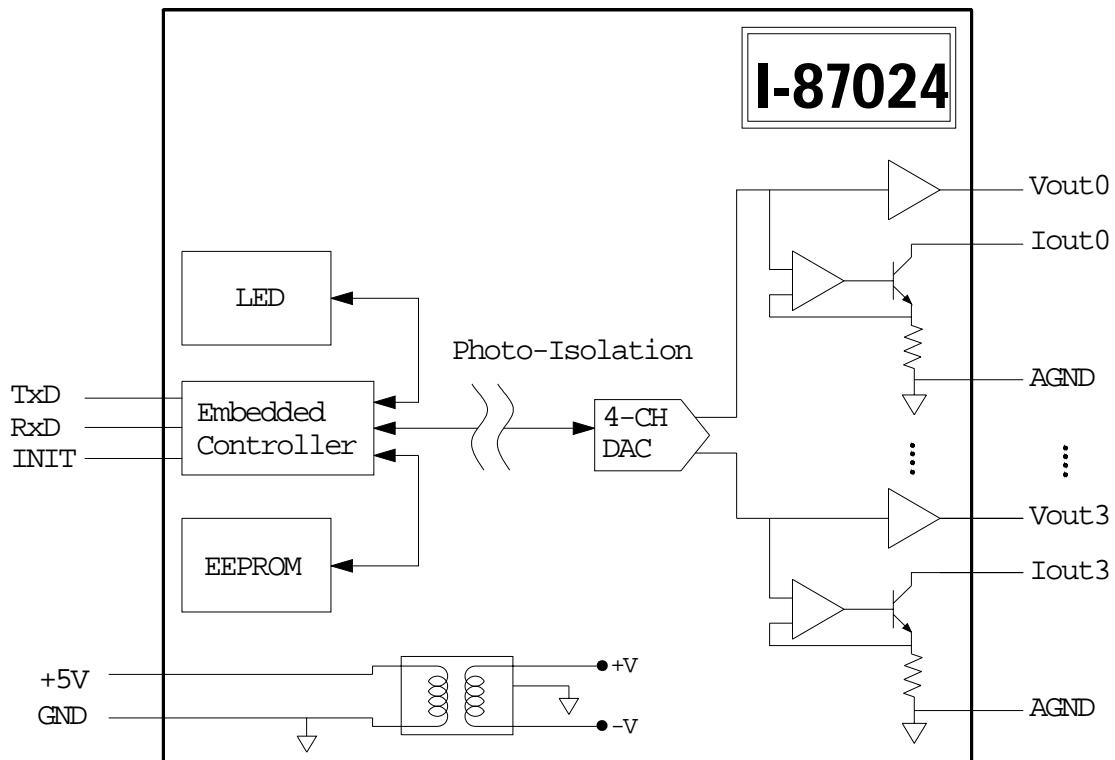


Figura 4. 9-Estructura interna de la tarjeta de salida analógica i-87024



I-8042

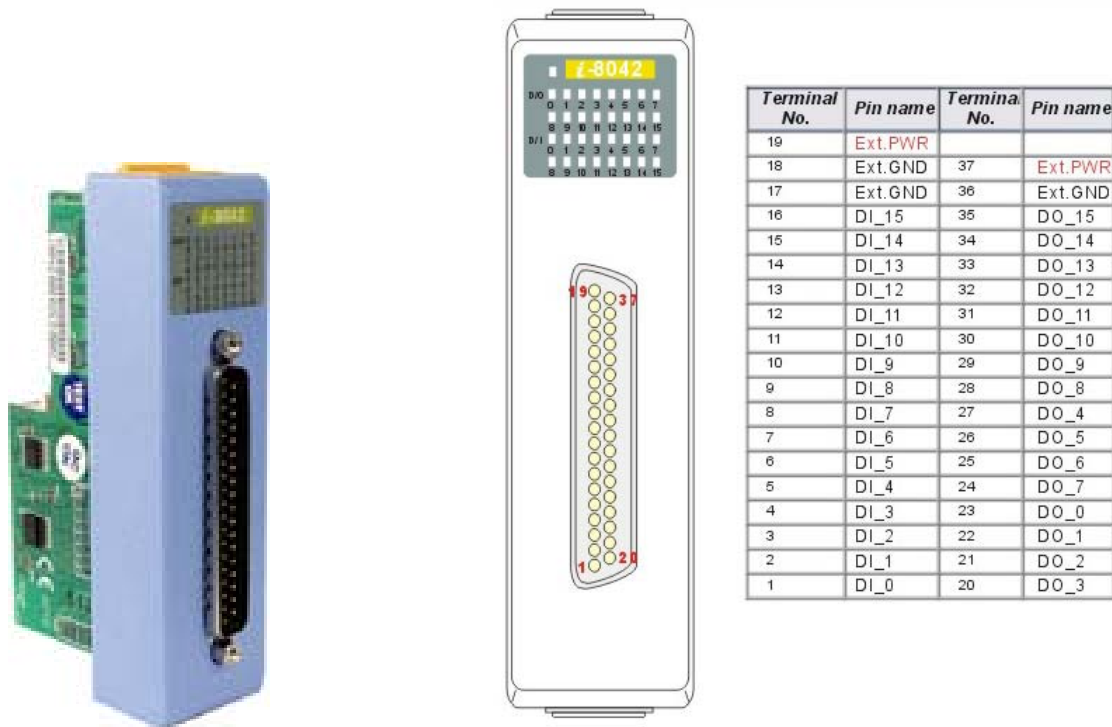


Figura 4.10- I-8042.

Es una tarjeta de 16 canales de entrada digital y 16 canales de salida digital (Figuras 4.10 y 4.11).

- Tensión de conexión: de 5 a 30 Vdc
- Corriente de conexión: 100 mA máximo.
- Tensión de aislamiento: 3750 Vrms
- Tiempo respuesta entradas: 1 KHz máximo.
- Tiempo respuesta salidas: 10 KHz máximo.
- Consumo: 1.5 W.

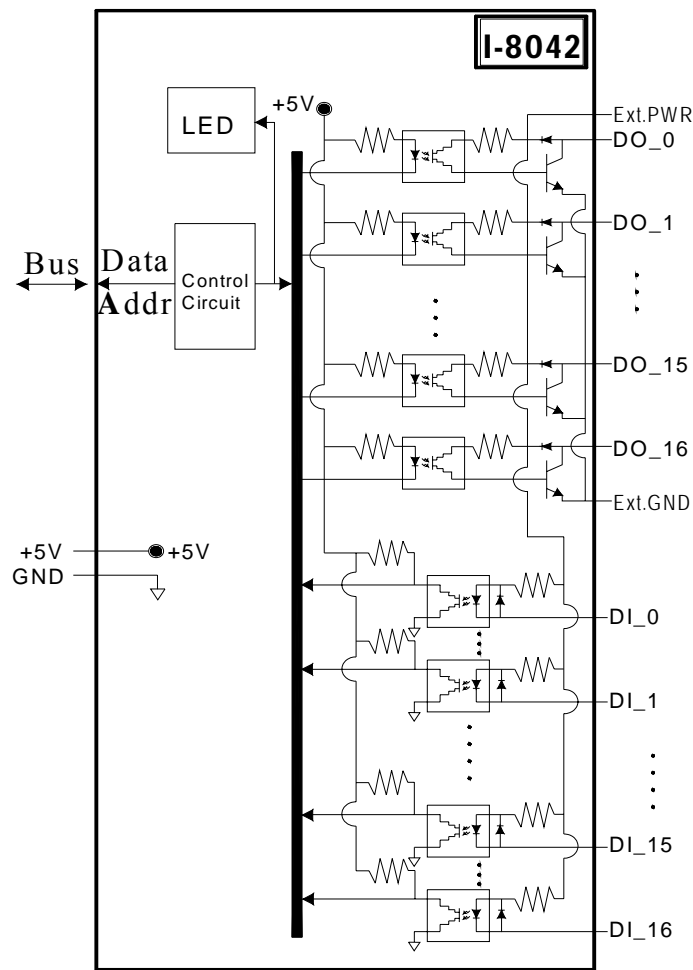


Figura 4. 11-Estructura interna de tarjeta E/S digital i-8042

4.3-Actuadores

Para monitorizar el funcionamiento de la planta hemos utilizado los medidores y sensores anteriormente descritos; pero para poder modificar el funcionamiento del sistema e influir en el mismo necesitamos los actuadores, que no son otra cosa que los elementos sobre los que actúa el sistema de control. Estos comprenden las bombas centrífugas, variadores de frecuencia, válvulas solenoides, válvulas de control, agitador del reactor y resistencias calefactoras.



4.3.1-Grupo bombas.

Las bombas son las encargadas de impulsar el fluido por los diferentes conductos de la planta. Modificando la velocidad de impulsión de las mismas se consigue también variar el caudal circulante. Esto es importante por ejemplo en la entrada a la camisa del reactor donde un caudal insuficiente puede provocar una mala refrigeración del interior.

El tipo de bombas que se utilizarán son de arrastre magnético y centrífuga con motor trifásico.

➤ **Bomba centrífuga de arrastre magnético:**

El principio de funcionamiento de las bombas de arrastre magnético es el sistema de tracción por imanes concéntricos que le permite cerrar el cuerpo de bomba de forma estanca sin cierre al eje que pueda estropearse o desgastarse ni contacto con el aire. Esta ventaja es muy apreciada en la industria química cuando el producto a trasegar es corrosivo o peligroso y en la que muchas veces es difícil encontrar un tipo de junta que resista el ataque químico.

La bomba que se instalará es una **NIKKISO CP08** (Figura 4.12), cuyas características principales se muestran a continuación.



Figura 4. 12-Bomba de arrastre magnético Nikkiso CP08

- Asp/Imp: 14 mm
- Caudal máx.: 11 l/min
- Altura máx.: 1.5 m
- Motor: Polo protegido monofásico
- Watios: 6
- Tensión: 220/240 V monofásico
- Peso: 1 Kg.



➤ **Bomba centrífuga con motor trifásico.**

Este tipo de bomba es la que se utilizará en mayor medida porque puede ser controlada su velocidad por medio de los variadores de frecuencia. Sus características son las siguientes:

- Caudal máx.: 15 l/min
- Altura máx.: 2.5 m
- Motor: Trifásico
- Watios: 0.25 KW
- Tensión: Δ/Y 230/400 V, 50Hz.
- Peso: 8 Kg.
- Protección IP: 55

4.3.2-Variadores de frecuencia

El motor de corriente alterna, a pesar de ser un motor robusto, de poco mantenimiento, liviano e ideal para la mayoría de las aplicaciones industriales, tiene el inconveniente de ser un motor rígido en cuanto a su velocidad. La velocidad del motor asincrónico depende de la forma constructiva del motor y de la frecuencia de alimentación.

Como la frecuencia de alimentación que entregan las Compañías de electricidad es constante, la velocidad de los motores asincrónicos es constante, salvo que se varíe el número de polos, el resbalamiento o la frecuencia.

El método más eficiente de controlar la velocidad de un motor eléctrico es por medio de un variador electrónico de frecuencia. No se requieren motores especiales, son mucho más eficientes y tienen precios cada vez más competitivos.

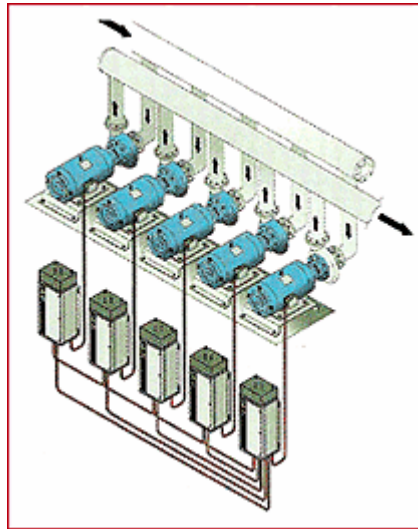


Figura 4. 13-Conexión de variadores de frecuencia a bombas

El variador de frecuencia regula la frecuencia del voltaje aplicado al motor (Figura 4.13), logrando modificar su velocidad. Sin embargo, simultáneamente con el cambio de frecuencia, debe variarse el voltaje aplicado al motor para evitar la saturación del flujo magnético con una elevación de la corriente que dañaría el motor.

Los variadores de frecuencia están compuestos por:

- **Etapa Rectificadora.** Convierte la tensión alterna en continua mediante rectificadores de diodos, tiristores, etc.

- **Etapa intermedia.** Filtro para suavizar la tensión rectificada y reducir la emisión de armónicos.

- **Inversor o "Inverter".** Convierte la tensión continua en otra de tensión y frecuencia variable mediante la generación de pulsos. Actualmente se emplean IGBT's (Isolated Gate Bipolar Transistors) para generar los pulsos controlados de tensión. Los equipos más modernos utilizan IGBT's inteligentes que incorporan un microprocesador con todas las protecciones por sobrecorriente, sobretensión, baja tensión, cortocircuitos, puesta a masa del motor, sobretemperaturas, etc.

- **Etapa de control.** Esta etapa controla los IGBT para generar los pulsos variables de tensión y frecuencia. Y además controla los parámetros externos en general, etc.



Los variadores mas utilizados utilizan modulación PWM (Modulación de Ancho de Pulsos) y usan en la etapa rectificadora puente de diodos rectificadores. En la etapa intermedia se usan condensadores y bobinas para disminuir las armónicas y mejorar el factor de potencia. Los fabricantes que utilizan bobinas en la línea en lugar del circuito intermedio, pero tienen la desventaja de ocupar más espacio y disminuir la eficiencia del variador.

El Inversor o Inverter convierte la tensión continua de la etapa intermedia en una tensión de frecuencia y tensión variables. Los IGBT envían pulsos de duración variable y se obtiene una corriente casi senoidal en el motor.

La frecuencia portadora de los IGBT se encuentra entre 2 a 16kHz. Una portadora con alta frecuencia reduce el ruido acústico del motor pero disminuye el rendimiento del motor y la longitud permisible del cable hacia el motor. Por otra parte, los IGBT's generan mayor calor.

Las señales de control para arranque, parada y variación de velocidad (potenciómetro o señales externas de referencia) están aisladas galvánicamente para evitar daños en sensores o controles y evitar ruidos en la etapa de control.

Para la planta piloto se ha encargado el diseño y construcción de un armario de control que incluya los variadores de velocidad de las bombas trifásicas y monofásicas a través del cual, mediante una señal de control 4-20 mA, controlarlas.

Las especificaciones de este armario de control son las siguientes:

Armario metálico modelo **CRN-106/250KT** (Figura 4.14) fabricado por HIMEL de construcción monobloc con laterales formados de una sola pieza perfilada y doblada. Puerta transparente a base de cristal templado con fijación totalmente estanca, manteniendo el grado de protección IP-55. Parte posterior unida a los laterales a través de perfil especial formando una zona estanca protegida. Pintado exterior e interiormente con resina de poliéster-epoxi color gris claro RAL 7032 texturizado. En fondo de armario 4 espárragos soldados de M8x15 para fijación de placa de montaje y taladros



fijación mural obturados por tapones de plástico. Tapa de entrada cables embutida. El armario incluye:

- 7 Variadores de frecuencia Altivar ATV 11HUI2M2E de Telemecanique de 0.55 kW
- 1 Regulador de velocidad de c.a. modelo R-10 de Cebek para motores monofásicos de hasta 1500 W. de tipo universal y cargas resistivas.
- Alimentación eléctrica del armario de 380 V 3F+N 50Hz
- Interruptor-seccionador MG INS40, ref.28917, con mando lateral, ref.28944.
- 1 Interruptor automático magnetotérmico MG 4P/16A, ref.24363, para protección de acometida.
- 1 Interruptor diferencial superinmunizado MG 4P/25A 30 mA. ref.23526
- 1 Distribuidor MG-125A- ref.13512
- 1 Interruptor automático magnetotérmico de 1P+N/10A, ref.21556 para protección del circuito de ventilación.
- 7 Interruptores magnetotérmicos de 2P/10A, ref.24323 para protección de los variadores.
- 1 Conjunto de filtro. termostato y ventilador.
- 1 Contactor TEE ref. LC1-D09P7 de 9A con mando de 220Vc.a. para la puesta en marcha del regulador de velocidad monofásico.
- Los cables de salida a motores y control 4-20mA son apantallados, disponiendo de las bornas correspondientes.
- El armario se ha cableado con cables de cobre, no propagadores de incendio y llama, libres de halógenos. Las canaletas son de PVC libres de halógenos.
- Las bornas están colocadas en la parte inferior del armario, separadas las bornas de fuerza de las de señal de entrada de 4-20mA. y para mando exterior para marcha y parada.
- 1 Embarrado de pletina de cobre de 20x5mm para tierras.

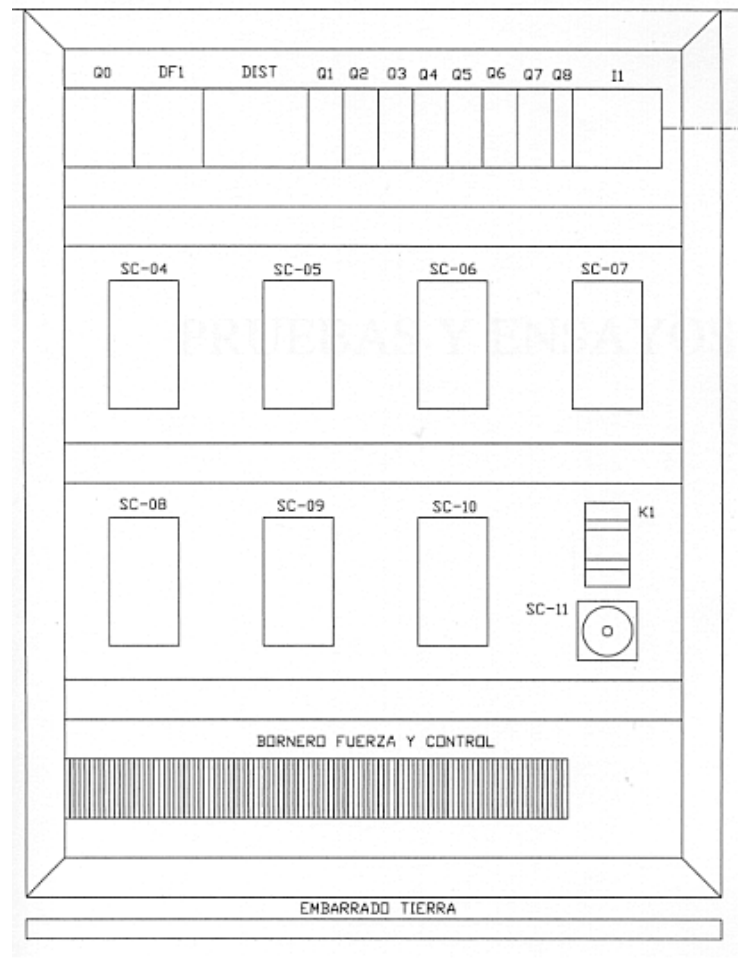


Figura 4. 14-Eschema de distribución del armario de control de variadores.

Especificaciones de los variadores trifásicos:

- Modelo: **ATV 11HU12M2E Altivar 11** (Figura 4.15)
- Fabricante: Telemecanique
- Motor: asíncrono
- Filtro de salida : filtro CEM integrado
- Disipador: radiador incorporado
- Rango de frecuencias: 0-200 Hz
- Tensión de alimentación: 200-240 v 50/60 Hz
- Potencia: 0.55 KW
- Corriente de linea max. Para Icc presumible 1 KA: 6.3 A
- Corriente de salida permanente: 3 A



- Corriente transitoria máx: 4.5 A
- Potencia disipada con carga nominal: 29 W
- Peso: 1.1 Kg
- Identificación de los variadores: SC-04, SC-05, SC-06, SC-07, SC-08, SC-09, SC-10, SC-11.



Figura 4. 15-Variador de frecuencia Altivar 11.

Especificaciones del regulador de velocidad **R-10 de Cebek** (Figura 4.16):

- Tensión de alimentación: 230 V. C.A.
- Tipo de salida: Triac.
- Potencia máxima de salida: 1500 W. (2 Caballos).
- Margen regulación: del 33 al 98%.
- Tensión mínima de trabajo: 90 V.
- Nivel de histéresis: < 3%.
- Protección contra interferencias: Si.
- Medidas:60 x 55 x 25 mm.



Figura 4. 16-Regulador de velocidad R-10 de Cebek.



4.3.3-Válvulas solenoides

La válvula solenoide es una combinación de dos unidades básicas funcionales.

1. El solenoide (elemento electromagnético) el cual contiene el núcleo fijo.
2. La válvula, la cual tiene el orificio de paso que un pistón, diafragma o aguja (plug) obtura o no y por donde fluye el líquido.

La válvula se abre o cierra por el movimiento de un núcleo magnético que es atraído por el solenoide cuando la bobina es energizada. El núcleo móvil que tiene libre movimiento se halla encerrado dentro de un tubo perfectamente estanco y que es montado sobre el cuerpo de la válvula, el solenoide es fijado al tubo o cuerpo de la válvula.

Las válvulas que se instalarán son unas **GSR Tipo 40** (Figura 4.17).



Figura 4. 17-Válvula solenoide GSR Type 40

Se trata de una válvula pilotada y normalmente cerrada (NC), lo cual quiere decir que mientras no se le aplique tensión la válvula permanece cerrada. Sus características son las siguientes:

- Tipo de control: pilotada
- Construcción: diseño con diafragma
- Presión: de 0.3 a 20 bares
- Medio: neutro, gaseoso y líquido



- Viscosidad: 22 mm²/s
- Temperatura del medio: de -10° C hasta +80° C
- Temperatura ambiente: +35° C
- Alimentación: AC: 24, 42, 110, 230V a 50 Hz
DC: 24, 110, 196V
- Tolerancia de voltaje: +5% / -10%
- Protección: IP65

4.3.4-Válvulas de control

Por lo general, cuando se habla de “Válvula de Control”, nos estamos refiriendo a un conjunto formado principalmente por el cuerpo de la válvula, que es por donde pasa el fluido, y por el actuador, mecanismo que mueve el elemento obturador ubicado en el interior del cuerpo. Hay diferentes tipos de cuerpos y de actuadores, sin embargo, la combinación más usada es la válvula de globo con actuador de resorte y diafragma, accionado neumáticamente.

La Figura 4.20 muestra en corte el cuerpo de una válvula de globo típica. Cuando la válvula está cerrada, el elemento obturador o tapón (*valve plug*) se apoya sobre el asiento (*seat ring*). A medida que el vástago mueve el tapón hacia arriba, comienza a circular el fluido a través de los orificios de la jaula (*cage*) y en seguida sale. El bonete contiene la prensa (*packing*), que impide que el fluido escape al exterior, y una entrada para lubricar el vástago. En este modelo, la jaula cumple dos funciones: la primera y más evidente es la de servir de guía al tapón; la segunda es la de ajustar la relación entre el recorrido del vástago (carrera) y el aumento de caudal.

Sobre el bonete se monta el actuador. En el caso de un actuador de acción directa, la presión que se ejerce sobre el diafragma extiende el vástago (Figura 4.20 y Figura 4.18a.); en uno de acción inversa (Fig. 4.18b.) lo retrae. En el conjunto de la Fig. 4.18a., cuando no hay presión, la válvula estará abierta; en este caso se dice que la válvula con aire cierra (*Air-to-close*) o, lo que es igual, con falla de aire abre (*Fail Open, FO*). Si el



mismo cuerpo es accionado con el actuador de la Fig. 4.18b, entonces se dice que la válvula con aire abre (*Air-to-open*) o que con falla de aire cierra (*Fail Close, FC*). Puesto que una falla de aire es potencialmente catastrófica, la posición cuando falla (FO o FC) se escoge basándose en aspectos de seguridad.

Continuando con la Figura 4.20, cuando la válvula está totalmente cerrada, la presión que ejerce el aire sobre el diafragma debe vencer no solamente a la fuerza del resorte sino a la que ejerce el fluido sobre el tapón. Esta fuerza, llamada fuerza de desbalance, se origina por la diferencia entre la presión de entrada y la presión de salida; como la válvula está cerrada, la presión de salida puede ser muy baja (por ejemplo, atmosférica) y por lo tanto, la presión diferencial puede aumentar en exceso. Estas consideraciones son tomadas en cuenta en la etapa de ingeniería, pero si las condiciones de operación se apartan de las establecidas originalmente, podríamos tener como resultado que la válvula no cierre adecuadamente. (Existen modelos que compensan o anulan la fuerza de desbalance, como la válvula de doble asiento y la de diseño balanceado, Fig. 4.19)

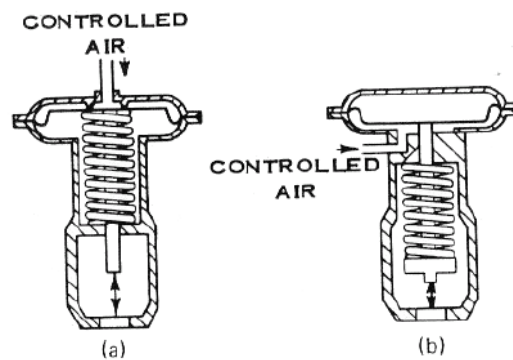


Figura 4.18-a) Actuador de acción directa, b) Actuador de acción inversa.

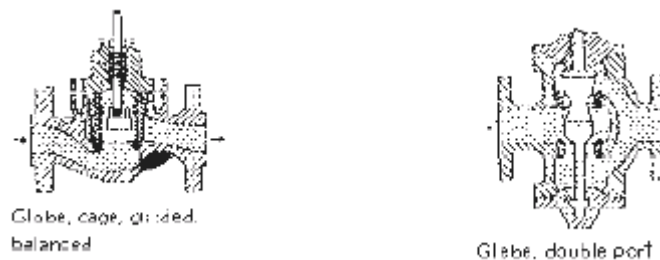


Figura 4.19-a) Válvula balanceada, b) Válvula de doble asiento.



Por lo general, las válvulas de control no son totalmente herméticas. Cuando se especifica una válvula se indica el grado (o *Clase*) de hermeticidad que debería tener, de acuerdo al standard ANSI B16.104. Una válvula Clase I no requiere prueba alguna, por lo que nadie puede asegurar cuánto fuga; la Clase III, que es la intermedia, debe fugar menos que el 0.5% de su capacidad nominal, en tanto que las de Clase VI las fugas deben ser inferiores a 0.01%.

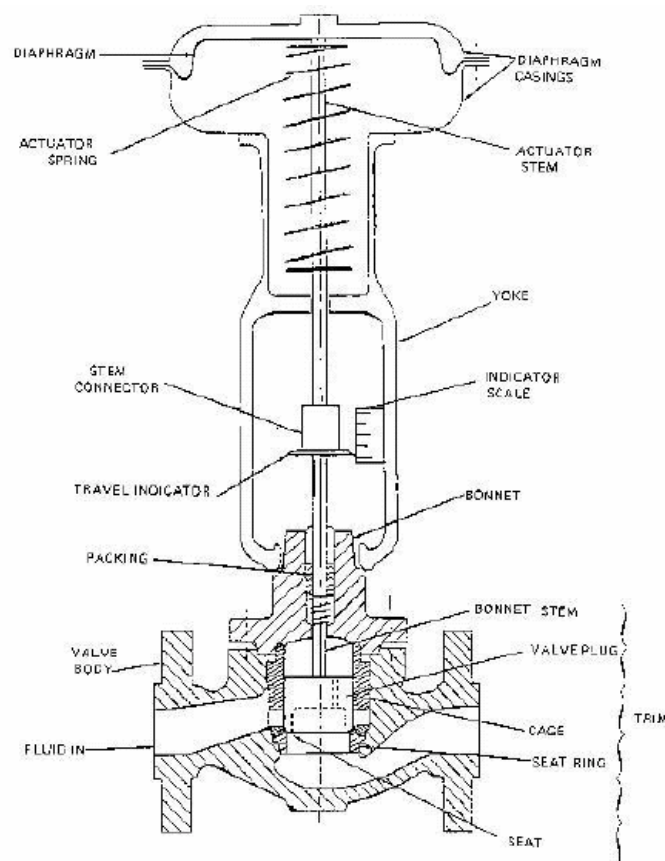


Figura 4. 20-Válvula de globo y actuador de acción directa.

Los rangos de presión de entrada más comunes para un actuador de resorte y diafragma son 3-15 psig y 6-30 psig, dependiendo de la fuerza que deba desarrollar. Hay que recordar que fuerza es igual a presión por área, de modo que si la presión es pequeña, deberá aumentar el área del diafragma para obtener fuerzas mayores; si aumentando el tamaño del diafragma aún no se consigue los resultados esperados, se aumenta el rango de presión. Esta selección forma parte de los procedimientos de dimensionamiento del actuador, el que por lo general lo efectúa el fabricante.



Cuando se requiere 3-15 psig, se puede emplear la señal proveniente del controlador. Esta señal es directa si el controlador es neumático. Si el controlador es electrónico (control distribuido o “stand-alone”), se intercala un convertidor I/p (Corriente a Presión).

Para satisfacer algunos requerimientos específicos, se suele agregar algunos accesorios. El más común es el posicionador, que no es otra cosa que un controlador para regular la posición del vástago. Se ha dicho que la presión sobre el diafragma debe contrarrestar, además del resorte, otras fuerzas como las de fricción y la de desbalance; si alguna de éstas varía, la posición del vástago perderá repetibilidad. El posicionador asegura que para cada valor de señal proveniente del controlador habrá sólo una posición del vástago y, en definitiva, una sola abertura de válvula. Además se usan en aplicaciones de rango dividido (*split range*), es decir, cuando la salida de un controlador actúa sobre 2 o más válvulas, y también cuando el actuador requiere un rango de presión de 6-30 psig. La mayoría de los posicionadores usados en Procesos son neumáticos, de modo que aceptan señal de entrada de 3 a 15 psig; sin embargo, se están difundiendo aquellos que incorporan un convertidor I/p, de modo que la señal proveniente de un controlador electrónico, llega directamente al posicionador. Otro accesorio, menos empleado, es el *booster*, que permite aumentar la cantidad de aire que pasa al diafragma, incrementando así la velocidad de la carrera.

Otros tipos de válvulas mayormente usadas son las de mariposa (*butterfly*) y de esfera (*ball*). Tienen la ventaja de que, a máxima abertura, su caída de presión es baja, especialmente las de esfera; por este motivo, son la mejor opción para aplicaciones On-Off. A diferencia de las válvulas de globo, su movimiento no es lineal sino rotatorio, lo que disminuye los requerimientos del actuador. Por lo general, tienen mejor grado de hermeticidad y ocupan menos espacio que las de globo. Su principal desventaja es el mayor riesgo de cavitación en aplicaciones con líquidos; además, hasta hace pocos años su precio, para tamaños usuales era poco competitivo, pero esta situación ha venido cambiando, por lo que se supone que se irán agregando paulatinamente a la industria de procesos.



➤ **Cálculo del flujo a través de la válvula.**

Cuando un fluido pasa de un tramo de conducto de área A_1 a un tramo de área A_2 , la ecuación es:

$$Q = A_1 \cdot A_2 \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho \cdot (A_1^2 - A_2^2)}}$$

Si expresamos la densidad en términos de gravedad específica G , que es lo usual, la ecuación se nos transforma en:

$$Q = A_1 \cdot A_2 \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{G \cdot \rho_w \cdot (A_1^2 - A_2^2)}}$$

en donde ρ_w es la densidad del agua a 60 °F y es una constante. Los términos con A_1 y A_2 representan la geometría, cualquiera que ella sea. Por lo tanto, podríamos reescribir la ecuación como:

$$Q = k \sqrt{\frac{P_1 - P_2}{G}} = k \sqrt{\frac{\Delta P}{G}}$$

en donde k es una constante que dependerá fundamentalmente de la geometría de la estrangulación o restricción. Los fabricantes de válvulas de control, con el impulso de la ISA, han convenido designar a esta constante como CV , llamada Coeficiente de Flujo de una Válvula, de modo que, para una válvula de control, la ecuación característica es:

$$Q = C_v \sqrt{\frac{\Delta P}{G}}$$

Puesto que en unidades inglesas el flujo de líquidos generalmente se expresa en gpm y la presión en psi, el coeficiente de flujo se define como *la cantidad de galones por minuto de agua a 60 °F que deben circular por una válvula para producir una caída de presión de una libra por pulgada cuadrada*. Nótese que mientras mayor es la



válvula, mayor es CV; por esta razón, a menudo se relaciona a este coeficiente con la capacidad de la válvula.

Nota: CV es independiente de las unidades de medición que se empleen. Si queremos trabajar en m³/d y kg/cm², que son las unidades más empleadas en refinería, tendremos que introducir un factor N en la ecuación, o bien, convertir a gpm y psi respectivamente. La relación entre las unidades es:

$$1 \text{ m}^3/\text{d} = 0.1835 \text{ gpm}$$

$$1 \text{ kg}/\text{cm}^2 = 14.2230 \text{ psi}$$

y el factor N sería igual a 20.552258.

Para una misma válvula de control, a mayor abertura, mayor es la cantidad de flujo que puede pasar a través de ella, es decir, mayor es CV. Para evitar confusiones, cuando se hable de CV sin mayores aclaraciones, se entenderá que se trata del coeficiente a máxima abertura (100%). Por lo general, los fabricantes entregan solamente el valor de la CV a 100%, pero es posible obtener catálogos que muestran valores intermedios.

➤ **Características inherentes.**

Se denomina característica inherente de una válvula a la curva que se obtiene, a *caída de presión constante*, al variar la carrera de la misma. Las más usuales son tres:

- Abertura rápida (*Quick opening*)
- Lineal
- Isoporcentual o de igual porcentaje (*Equal percentage*)

y se muestran en la Figura 4.21.

En una válvula de abertura rápida, la sensibilidad es mayor al inicio de la carrera. En una válvula lineal, iguales variaciones en la carrera crean un cambio igual del flujo; la sensibilidad, en este caso, es constante.

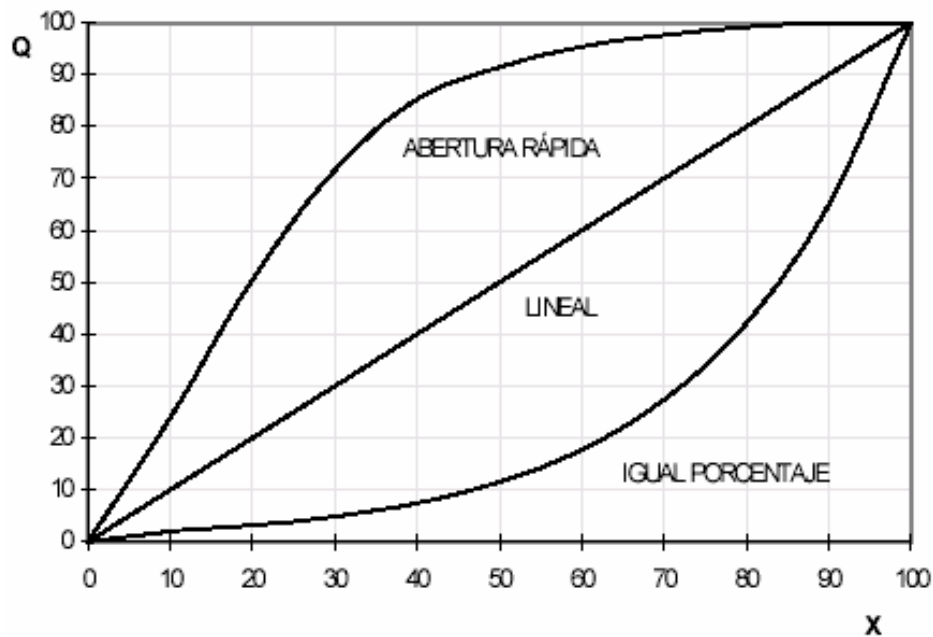


Figura 4. 21- Características inherentes.

Por su parte, en una válvula de igual porcentaje, iguales variaciones en la carrera de la válvula crean un cambio en el flujo que es un porcentaje constante del flujo existente al momento del cambio. Para aclarar el concepto, supongamos que para un 10% de aumento en la carrera, el flujo deberá aumentar en un 50% del valor que tenga en ese momento. Entonces, si a 60% de carrera el flujo es 200, a 70% será 300 (200 más el 50% de 200); a 70% será 450 (300 más el 50% de 300); a 80% será 675 (450 más el 50% de 450) y así sucesivamente. Puede verse que la sensibilidad de la válvula aumenta a medida que aumenta el flujo.

En una válvula tipo jaula, como la mostrada en la Figura 4.20, la característica inherente está determinada por la forma de los orificios de la jaula. En otras válvulas de globo, la característica depende de la forma del obturador (tapón). Desafortunadamente, la característica inherente no siempre figura en la placa del actuador; por lo tanto no es fácil saber cuál corresponde a una válvula instalada en terreno.

➤ Otras características.

Alrededor de una válvula de control son instaladas válvulas de corte y válvulas de bypass para permitir que la planta siga funcionando si el ciclo de control o la válvula



fallan. El conjunto de válvulas de corte, de by-pass y de control se denomina el cuadro de control (Figura 4.22). Las válvulas de corte son las que permiten aislar la válvula de control del proceso y por lo tanto sacarla de servicio mientras la planta sigue funcionando. Es importante hacer notar que en un cuadro de control se debe instalar una válvula de “purga”, la que permite aliviar la presión y retirar el fluido que quedó atrapado entre las válvulas de corte, de manera que al retirar la válvula de control no se produzca desprendimiento de fluido de proceso, el cual puede ser peligroso para el operador. La válvula de by-pass es una válvula normalmente de globo y del tamaño de la válvula de control, y permite mantener un “control manual” del proceso mientras se restablece el sistema.

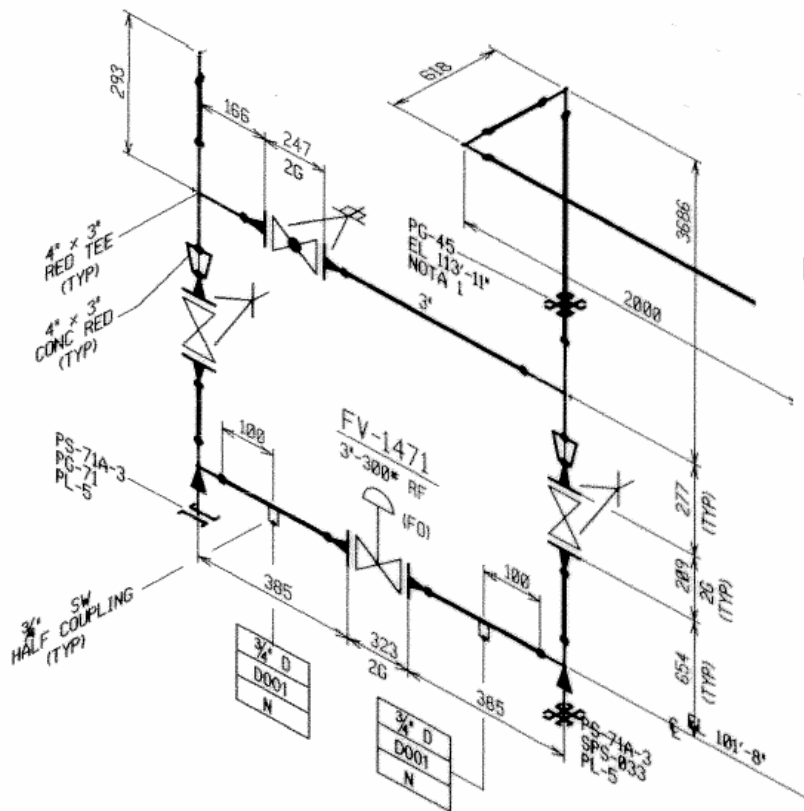


Figura 4. 22-Ejemplo de cuadro de control.



Debido a los pequeños caudales que se manejan en la planta se utilizarán válvulas de control para microcaudales de **Samson, modelo 3510** (Figura 4.23).

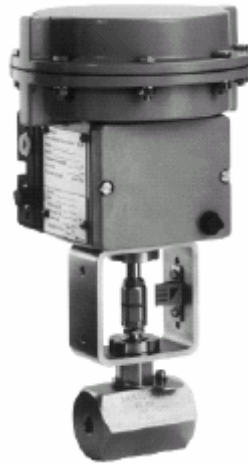


Figura 4. 23-Válvula de control para microcaudales Samson.

Sus características son las siguientes:

- Marca: SAMSON
- Modelo: 3510 Tamaño: 1/4"
- Presión nominal: PN40
- Material del cuerpo: Acero inoxidable 1.4571
- Empaquetadura: PTFE
- Material asiento obturador: Acero inoxidable 1.4571
- Cierre: Metal-metal
- Estanqueidad a su través: Clase VI
- Característica: Logarítmica Carrera: 7.5 mm

Tipo de accionamiento

- Marca: SAMSON Modelo: 3277
- Tamaño: 120 cm²
- Presión aire alimentación: 3 Bar

Posicionador



- Marca: SAMSON Modelo: 3780
- Señal de entrada: 4-20 mA
- Protocolo comunicación: Hart
- Manómetros: Incluidos

Filtro-manorreductor

- Marca: MKS
- Manómetros: incluidos

Tubeado

- Efectuado: si
- Tubing y racores: Acero inoxidable

Para cada una de las válvulas de la planta habrá unas características particulares aparte:

Válvula tag FY/FCV-01

- Valor de Kvs calculado a caudal máximo: 0.22
- Valor de Kv: 0.4
- Rango muelles del posicionador: 0.2-1 Bar
- Posición a fallo de aire del posicionador: Abierta

Válvula tag FY/FCV-02

- Valor de Kvs calculado a caudal máximo: 0.212
- Valor de Kv: 0.4
- Rango muelles del posicionador: 0.4-0.8 Bar
- Posición a fallo de aire del posicionador: Cerrada

Válvula tag FY/FCV-03

- Valor de Kvs calculado a caudal máximo: 0.026
- Valor de Kv: 0.063



- Rango muelles del posicionador: 0.4-0.8 Bar
- Posición a fallo de aire del posicionador: Cerrada

Válvula tag HY/HCV-01

- Valor de Kvs calculado a caudal máximo: 0.104
- Valor de Kv: 0.4
- Rango muelles del posicionador: 0.4-0.8 Bar
- Posición a fallo de aire del posicionador: Cerrada

Válvula tag HY/HCV-02

- Valor de Kvs calculado a caudal máximo: 0.078
- Valor de Kv: 0.16
- Rango muelles del posicionador: 0.4-0.8 Bar
- Posición a fallo de aire del posicionador: Cerrada

Válvula tag LY/LCV-01

- Valor de Kvs calculado a caudal máximo: 0.192
- Valor de Kv: 0.4
- Rango muelles del posicionador: 0.4-0.8 Bar
- Posición a fallo de aire del posicionador: Cerrada

Válvula tag LY/LCV-06

- Valor de Kvs calculado a caudal máximo: 0.09
- Valor de Kv: 0.4
- Rango muelles del posicionador: 0.2-1 Bar
- Posición a fallo de aire del posicionador: Abierta

Válvula tag LY/LCV-07

- Valor de Kvs calculado a caudal máximo: 0.031
- Valor de Kv: 0.1



- Rango muelles del posicionador: 0.4-0.8 Bar
- Posición a fallo de aire del posicionador: Cerrada

Válvula tag TY/TCV-06

- Valor de Kvs calculado a caudal máximo: 0.192
- Valor de Kv: 0.4
- Rango muelles del posicionador: 0.4-0.8 Bar
- Posición a fallo de aire del posicionador: Abierta

4.3.5- Agitador del reactor:

Se trata de un agitador de palas de la empresa Turbagit S.L. conectado a un motor de 0.12 KW de potencia que gira a 850 rpm.

Con este agitador se consigue distribuir uniformemente el calor en el interior del reactor, así como mejorar la capacidad de enfriamiento del mismo.

4.3.6-Resistencias calefactoras

Se puede describir el movimiento de los electrones en un conductor como una serie de movimientos acelerados, cada uno de los cuales termina con un choque contra alguna de las partículas fijas del conductor.

Los electrones ganan energía cinética durante las trayectorias libres entre choques, y ceden a las partículas fijas, en cada choque, la misma cantidad de energía que habían ganado. La energía adquirida por las partículas fijas (que son fijas solo en el sentido de que su posición media no cambia) aumenta la amplitud de su vibración o sea, se convierte en calor. Para deducir la cantidad de calor desarrollada en un conductor por unidad de tiempo, hallaremos primero la expresión general de la potencia suministrada a una parte cualquiera de un circuito eléctrico. Cuando una corriente eléctrica atraviesa un conductor, éste experimenta un aumento de temperatura. Este efecto se denomina “efecto Joule”.

Es posible calcular la cantidad de calor que puede producir una corriente eléctrica en cierto tiempo, por medio de la ley de Joule.



Se supone, como en un calentador eléctrico, que todo el trabajo realizado por la energía eléctrica es transformado en calor. Si el calentador funciona con un voltaje V y una intensidad I durante un tiempo t , el trabajo realizado es:

$$W=V \cdot I \cdot t$$

y como cada J equivale a 0,24 cal, la cantidad de calor obtenido será :

$$Q=0.24 \cdot V \cdot I \cdot t$$

V debe medirse en volts, I en amperes y t en segundos, para que el resultado esté expresado en calorías.

Al igual que la potencia mecánica, la potencia eléctrica se expresa en watts (W).

La ley de Joule establece que la cantidad de calor producida es directamente proporcional a la resistencia R del conductor, al cuadrado de la intensidad de corriente I que lo atraviesa y al tiempo t . Es decir:

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t$$

El efecto calorífico, también llamado efecto Joule, puede ser explicado a partir del mecanismo de conducción de los electrones en un metal. La energía disipada en los choques internos aumenta la agitación térmica del material, lo que da lugar a un aumento de la temperatura y a la consiguiente producción del calor. La ley de Joule, por su parte, puede ser enfocada como una consecuencia de la interpretación energética de la ley de Ohm. Si $I \cdot R$ representa la energía disipada por cada unidad de carga, la energía total que se disipa en el conductor en forma de calor, cuando haya sido atravesado por una carga q , será:

$$Q = q \cdot I \cdot R$$

Pero dado que $q = I \cdot t$, se tiene finalmente:

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t$$



que es precisamente la ley de Joule.

Las resistencias de inmersión son utilizadas para calentar líquidos en una gran variedad de procesos. El método de inmersión directa por el que el elemento cede el calor directamente al medio en el que se halla sumergido, es eficiente y muy adecuado para las aplicaciones industriales. Lo único que hay que tener en cuenta es que la resistencia se encuentre siempre sumergida porque si se ponen en funcionamiento al aire se estropean.

Para la planta se ha encargado a la empresa IES el conjunto de resistencias de inmersión y en línea necesarias. En total son dos resistencias de inmersión de 4.5 KW para tanques, un calentador en línea de 10 KW y tres resistencias abrazaderas de 0.5 KW cada una (que se utilizarán en la torre de destilación). Las características de cada equipo son las siguientes:

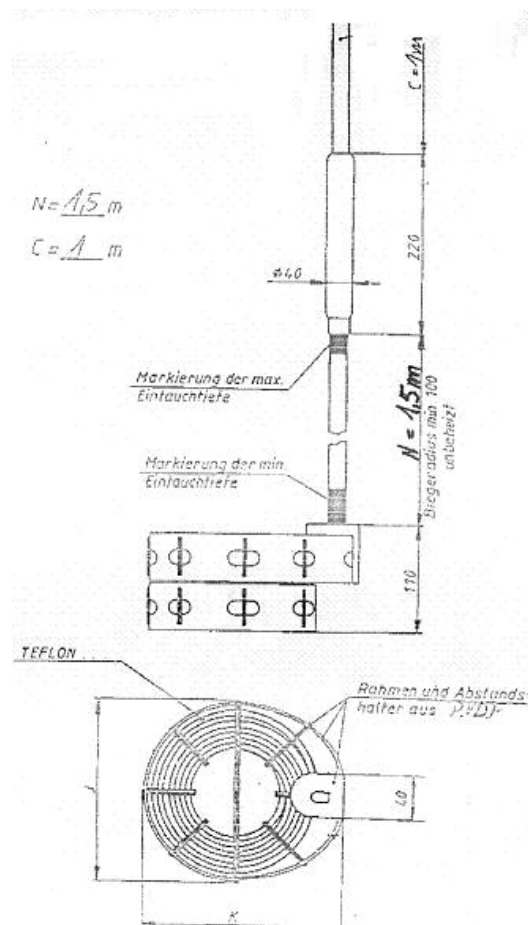


Figura 4. 24- Resistencia de Inmersión para tanques.



➤ **Calefactor J-01**

Calentador de inmersión tipo **P90 094550D10d1 4500W 3-400V** (Figura 4.24). Formado por un cable calefactor de teflón (FEP), longitud del cable calefactor N = 1,5 metros, longitud del cable de conexión C = 1 metro.

- Capacidad: 60 litros
- Dimensiones depósito: Ø324 x 1200 mm alto
- Material depósito: AIS1316.
- Presión: atmosférica.
- Incremento de temperatura: 50°C
- Potencia: 4,5 kW.
- Actividad: Calentar Depósito agua caliente D-01.

➤ **Calefactor J-03**

Calentador de inmersión tipo **P90 094550D10d1 4500W 3-400V** (Figura 4.24). Formado por un cable calefactor de teflón (FEP), longitud del cable calefactor N = 1,5 metros, longitud del cable de conexión C = 1 metro.

- Capacidad: 50 litros
- Dimensiones depósito: Ø324 x 450 mm alto
- Material depósito: AIS1316.
- Presión: atmosférica.
- Incremento de temperatura: 50°C
- Potencia: 4,5 kW.
- Actividad: Calentar interior Reactor Químico C-01.

➤ **Calefactor J-10**

Resistencia tipo abrazadera modelo **m-85-a 500W 230V** (Figura 4.24), medidas Ø200x107mm.

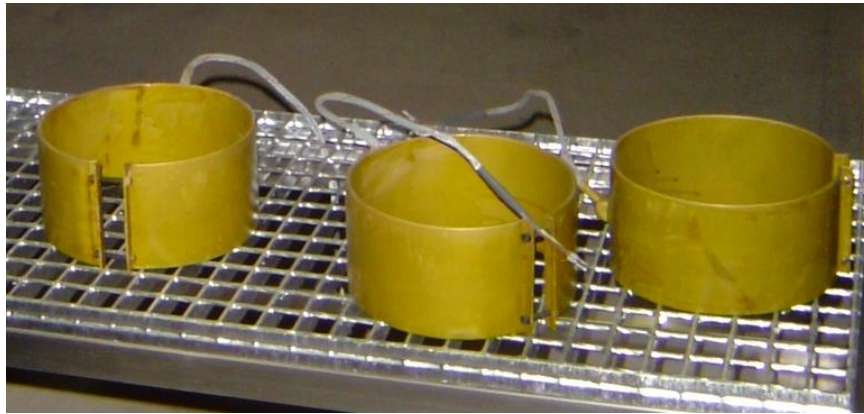


Figura 4. 25-Resistencias tipo abrazadera.

- Dimensiones columna: $\text{Ø}200 \times 1800$ m m alto.
- Dimensiones de la parte de la columna a calentar: Zona cilíndrica inferior de $\text{Ø}200 \times 800$ mm altura.
- Material columna: AIS1316.
- Presión de la columna: 1,5 bar.
- Incremento de temperatura: 80°C .
- Potencia: 3 kW total (las seis abrazaderas que se utilizan)

➤ **Armario de control a tiristores CD-01**



Figura 4. 26-Armario de tiristores



Armario de control a tiristores especial modelo **ACT4Z-EE000** (Figuras 4.26 y 4.27) con las siguientes características:

- Tensión: 3-400V
- Capacidad: 4x20A
- Potencia: 4x13kW
- Dimensiones; 1200x800x300mm
- Filtro ventilación: Si
- 4 tiristores modelo PAC35Z-002035-N00 (CS11967) con señal de entrada 4-20mA.
- Toma de señal externa para opción regulador temperatura.
- Toma de señal externa para opción termostato que actúe como limitador.
- No contempla señal salida tensión alterna a 2 hilos ni sondas y sus correspondientes elementos de protección.

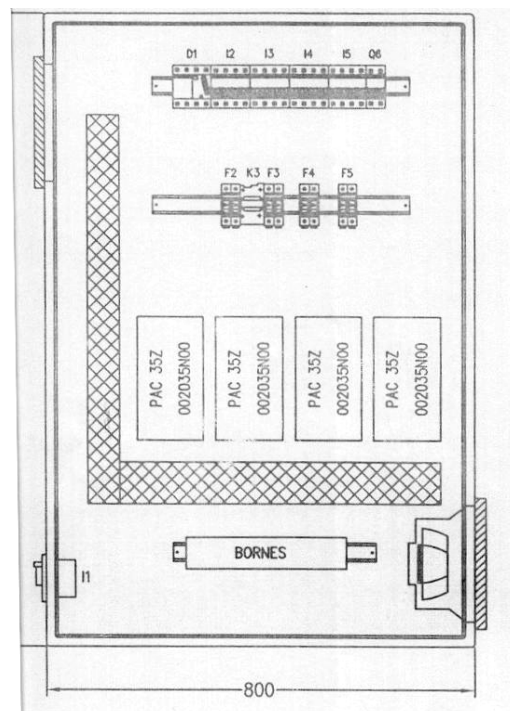


Figura 4. 27-Esquema del armario de control a tiristores.



Para la variación del calor que debe proporcionar cada resistencia se hace imprescindible el uso de un armario de control por tiristores que también proporciona la empresa IES.

Un tiristor es uno de los tipos más importantes de los dispositivos semiconductores de potencia. Los tiristores se utilizan en forma extensa en los circuitos electrónicos de potencia. Se operan como conmutadores biestables, pasando de un estado no conductor a un estado conductor. Para muchas aplicaciones se puede suponer que los tiristores son interruptores o conmutadores ideales, aunque los tiristores prácticos exhiben ciertas características y limitaciones.



5.-Diseño de Ingeniería y fabricación.

El diseño constructivo de los elementos constitutivos de la planta, llevado a cabo en colaboración con la empresa de ingeniería **Ingasol S.L.**, es una de las partes más complicadas en la realización de este proyecto debido a la necesidad de combinar el tamaño y características constructivas de los elementos de la planta con el tamaño físico disponible en los laboratorios del departamento. Además, estos elementos presentan unas características únicas que dificultan aún más su proceso de diseño debiendo especificarse en su fase de fabricación hasta el último detalle.

Hay incluso ciertos trabajos que se deben realizar con algunos elementos que se pueden considerar prácticamente de artesanía (Figura 5.1) debido a la pericia que se necesita para su realización. Un ejemplo de esto se observa en la fotografía siguiente que muestra una campana perteneciente a un plato de la torre de destilación de la planta.



Figura 5. 1-Campana de un plato de la torre de destilación.

A continuación se explican con detalle las características más importantes de cada uno de estos elementos, diseñados y contruidos exclusivamente para esta planta piloto. Se detallan sólo los elementos que corresponden con el proceso de la columna de destilación (Figura 5.2), los de la parte del reactor químico se explican en su correspondiente proyecto.

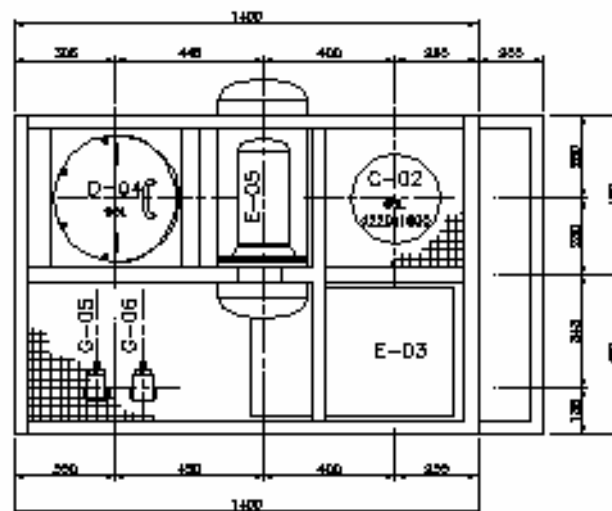
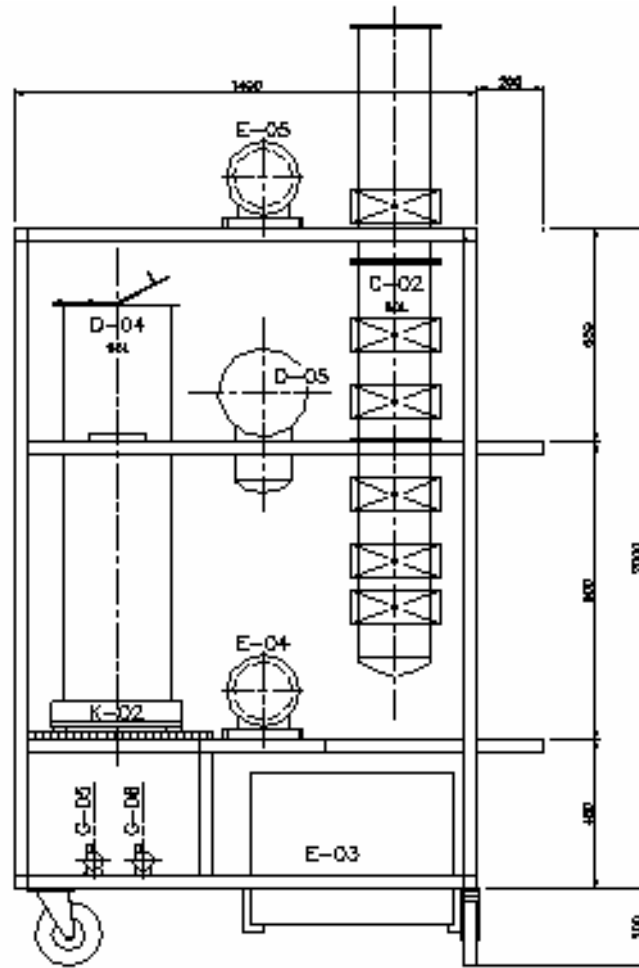


Figura 5. 2-Plano de situación de los elementos en el bastidor de la Columna.



5.1-Depósito D-03

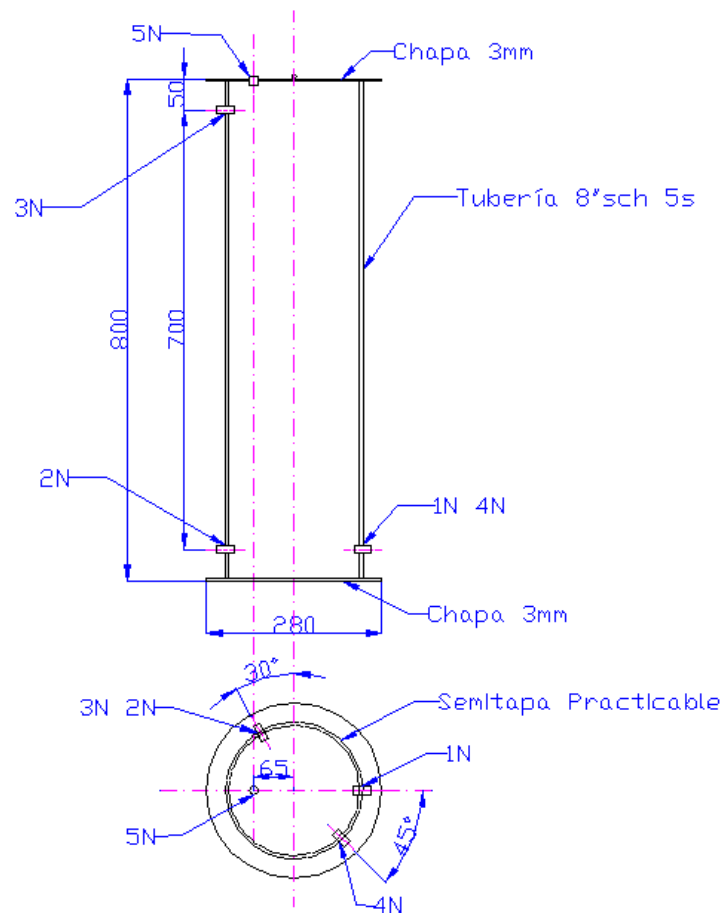


Figura 5. 3- Plano constructivo del depósito D-03.

Construido con una sección de tubería 8” sch 5s de acero inoxidable, con longitud de 800 mm (Figura 5.3). Posee una tapa semipracticable de chapa de 3 mm para permitir el acceso al interior y un fondo de chapa de 3 mm. Se han practicado 5 conexiones para diferentes funciones:

Designación	Dimensión	Descripción
1N	1/2” NPT	Salida agua del depósito
2N	1/2” NPT	Drenaje
3N	1/2” NPT	Rebose
4N	1/2” NPT	Conexión transmisor de nivel LT-03
5N	1/2” NPT	Entrada desde separador-acumulador D-05



Su cometido es almacenar el etanol que se recupera en la destilación o mediante aportación manual, para formar la mezcla de agua y etanol del refrigerante.

5.2-Depósito D-04

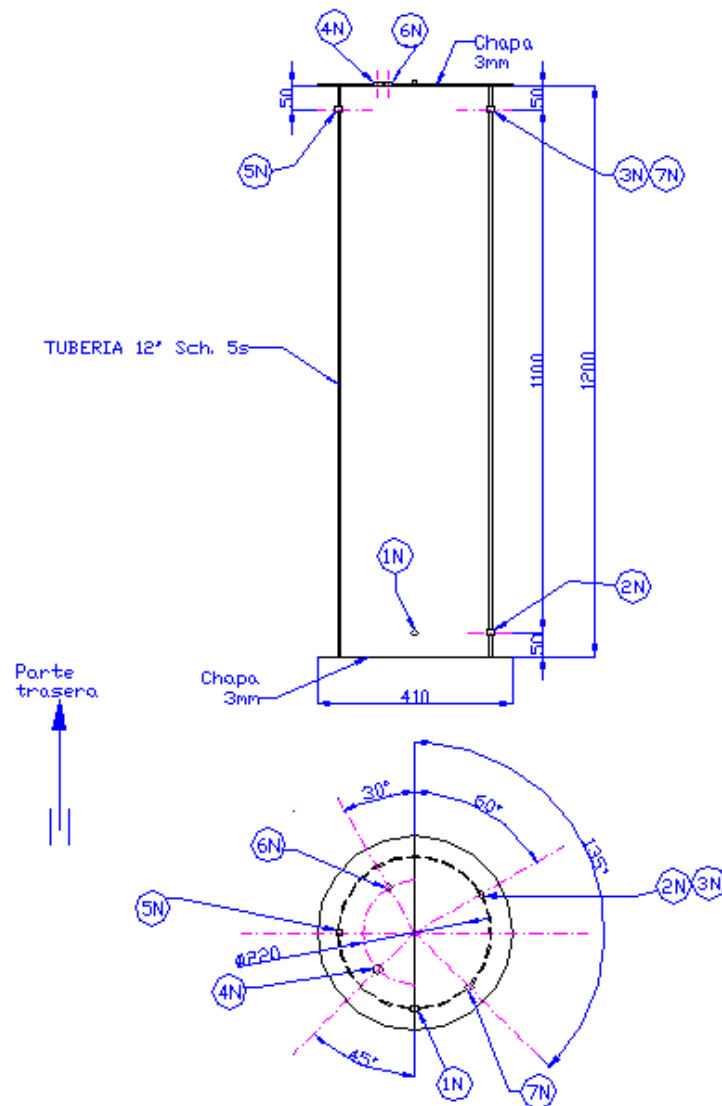


Figura 5. 4- Plano constructivo del depósito D-04.

Construido con una sección de tubería 12" sch 5s de acero inoxidable, con longitud de 1200 mm (Figura 5.4). Posee una tapa semipracticable de chapa de 3 mm para permitir el acceso al interior y un fondo de chapa de 3 mm. Se han practicado 7 conexiones para diferentes funciones:



Designación	Dimensión	Descripción
1N	1/2" NPT	Salida agua del depósito
2N	1/2" NPT	Drenaje
3N	1/2" NPT	Rebose
4N	3/4" NPT	Conexión transmisor de nivel LT-04
5N	1/2" NPT	Entrada desde camisa del reactor
6N	1/2" NPT	Entrada de agua de red
7N	1/2" NPT	Entrada desde depósito D-03

Su cometido es almacenar una mezcla de agua y etanol procedente de la camisa del reactor para posteriormente poder ser enviada a la columna de destilación o devuelta al depósito de almacenamiento D-02.

5.3-Depósito D-05

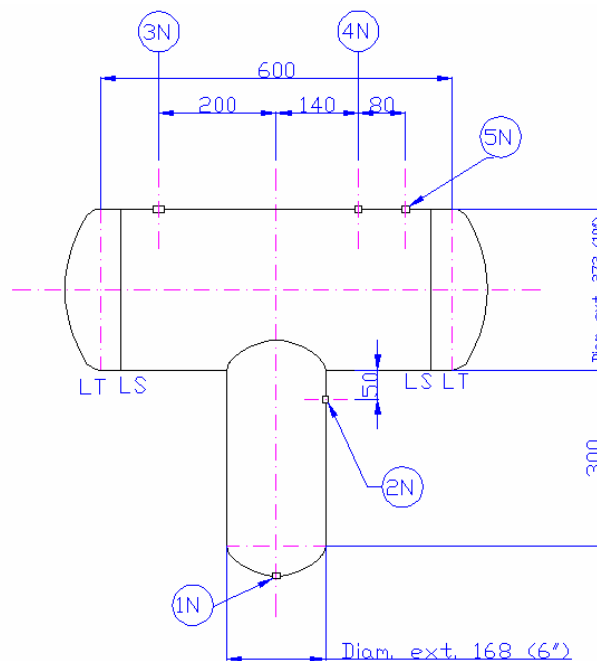


Figura 5. 5-Plano constructivo del depósito D-05.

Construido con una sección de tubería 10" sch 5s de acero inoxidable en su parte horizontal, con longitud de 600 mm (Figuras 5.5 y 5.6). En su parte inferior posee una tubería de 6" de sección y 300 mm de longitud, situada en posición vertical, para realzar la función de decantación del fluido de salida.



Se han practicado 5 conexiones para diferentes funciones:

Designación	Dimensión	Descripción
1N	1/2" NPT	Conexión transmisor de nivel LT-08 y drenaje
2N	1/2" NPT	Conexión transmisor de nivel LT-08
3N	3/4" NPT	Conexión transmisor de nivel LT-08
4N	1/2" NPT	Entrada de proceso
5N	1/2" NPT	Válvula de seguridad

Su cometido es recibir el producto de la torre después de que haya pasado por el condensador para que alcance totalmente la fase líquida.



Figura 5. 6- Fotografía del depósito D-05.



5.4-Columna de Destilación C-02:

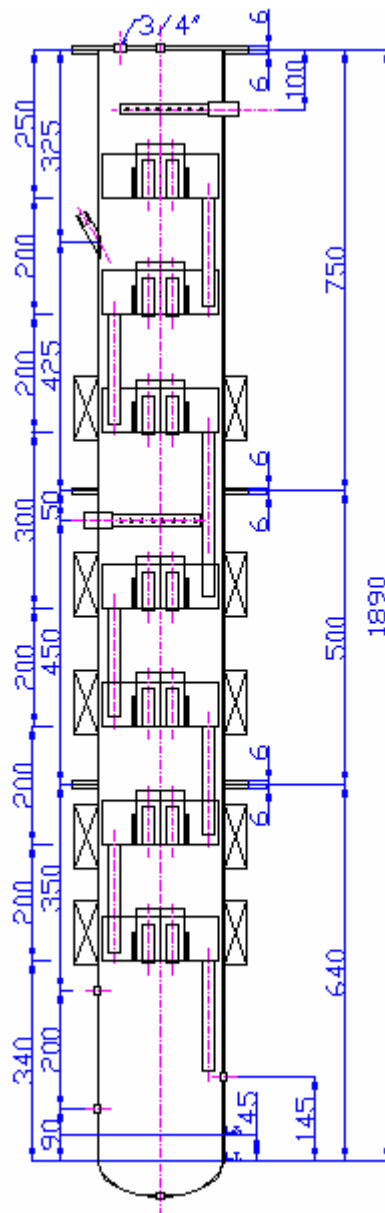


Figura 5. 7- Plano constructivo de la columna de destilación C-02.

Construida con una sección de tubería 8" sch 5s de acero inoxidable, con longitud de 2000 mm (Figuras 5.7 y 5.8). Para facilitar su fabricación fue dividida en tres partes de 750, 500 y 640mm, las cuales son unidas posteriormente para formara la parte exterior. Su parte superior se encuentra cerrada mediante una tapadera no practicable de 3mm de espesor, mediante la cual podemos acceder al interior de la columna.

Se han practicado 9 conexiones para diferentes funciones:



Designación	Dimensión	Descripción
1N	1/2" NPT	Salida del fondo de la columna
2N	1/2" NPT	Conexión transmisor de nivel LT-06
3N	1/2" NPT	Conexión transmisor de nivel LT-06
4N		Entrada de Nitrógeno
5N	1" NPT	Entrada de alimentación
6N	3/4" NPT	Conexión transmisor de temperatura TT-07
7N	1" NPT	Salida de producto
8N	3/4" NPT	Conexión transmisores multisonda TT-08A, TT-08B, TT-08C, TT-08D
9N	1/2" NPT	Conexión transmisor de presión PT-02



Figura 5. 8- Columna en fase de fabricación. Partes superior e inferior.



En el interior de la columna podemos encontrar siete platos (Figuras 5.9 y 5.10), además de encontrarse rellena de bolas de cristal (Figura 5.11), para de esta manera aumentar la superficie de contacto y favorecer la destilación.

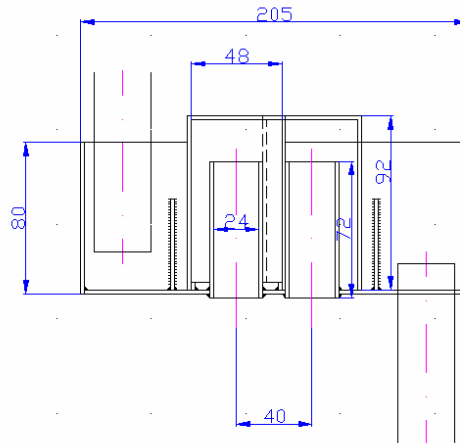


Figura 5. 9- Esquema de un plato.



Figura 5. 10- Vistas del conjunto de platos

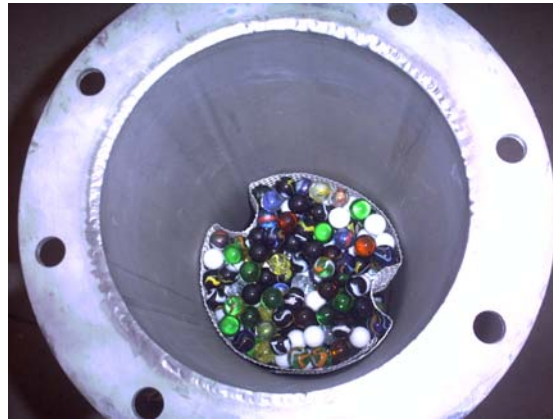


Figura 5. 11- Fotografía del relleno de la columna.

5.5-Resistencias de abrazadera J-10



Figura 5. 12-Detalle de resistencias abrazando la columna.

Su función es la de calentar el interior de la columna de destilación desde su exterior, abrazando a ésta (Figura 5.12). Con este método se consigue que las pérdidas de energía sean menores, ya que se mantiene una temperatura de un modo mas uniforme a lo largo de toda la columna cosa muy útil n una columna de este tamaño y características. La potencia es de 0,5 kW en monofásica de 220 V para cada una de las resistencias, lo que hace un total de 3 kW para el conjunto.



5.6- Estado actual Planta Piloto.

La planta piloto se compone de tres bastidores, en los cuales se engloban la totalidad de sus elementos.

Este diseño fue pensado para que dos de los bastidores contuvieran al reactor químico, y a la columna de destilación, junto con los depósitos y demás elementos que necesitan para su funcionamiento. El último bastidor fue necesario incluirlo para contener los armarios eléctricos comunes a ambas partes de la planta, así como el correspondiente al sistema de control.

Debido a que algunos elementos son comunes a ambas partes principales de la Planta Piloto (Reactor Químico y Columna de Destilación), para facilitar la comprensión de los todos los elementos, se realiza la explicación de los tres bastidores de la planta completos, y mas concretamente los elementos exclusivos de la columna, así como elementos comunes independientemente del bastidor donde se encuentren, aunque algunos no hallan sido desarrollados en este proyecto fin de carrera.

Si se desea ver más fotografías de la Planta Piloto o de ésta durante su fase de fabricación ver *Anexo 5: Fotografías (solo formato electrónico)*.

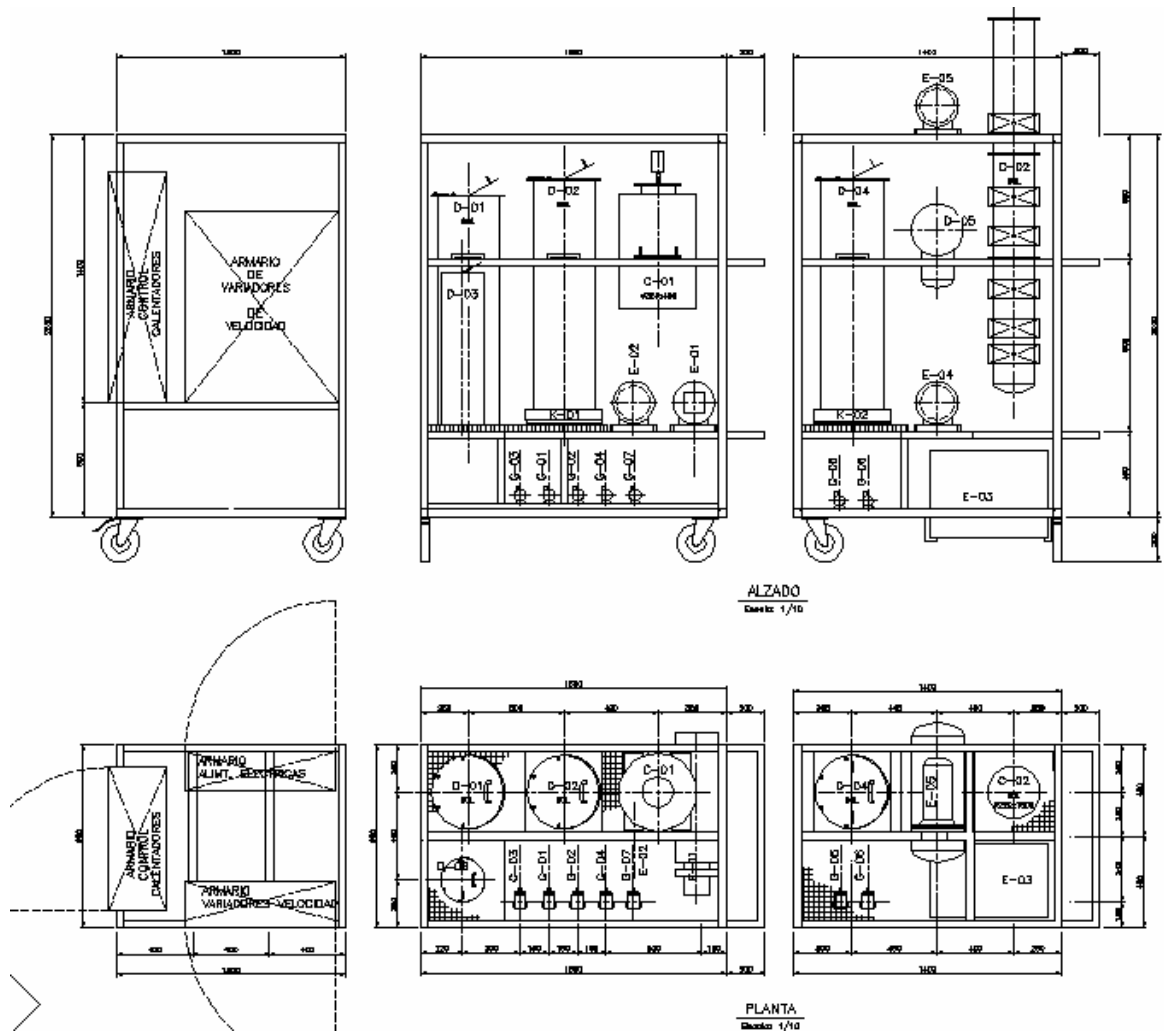


Figura 5. 13- Bastidores y situación de elementos.

A continuación se describen y muestran los elementos y la situación de cada uno de estos en el bastidor correspondiente.



5.6.1- Columna de Destilación. Bastidor 1.



Figura 5. 14- Bastidor columna de Destilación y accesorios.

Para mostrar con detalle los elementos del bastidor anterior se realizará de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo (Figura 5.14).

➤ **Depósito D-04.**

En la Figura 5.15 se puede apreciar la situaron del depósito D-04 en el bastidor, así como un detalle de el sensor de nivel capacitivo instalado en él.



Figura 5. 15- Deposito D-04 y detalle sensor de nivel capacitivo.

➤ **Intercambiador producto de cabeza columna. E-05**

En la Figura 5.16 se puede apreciar con detalle del intercambiador de cabeza .

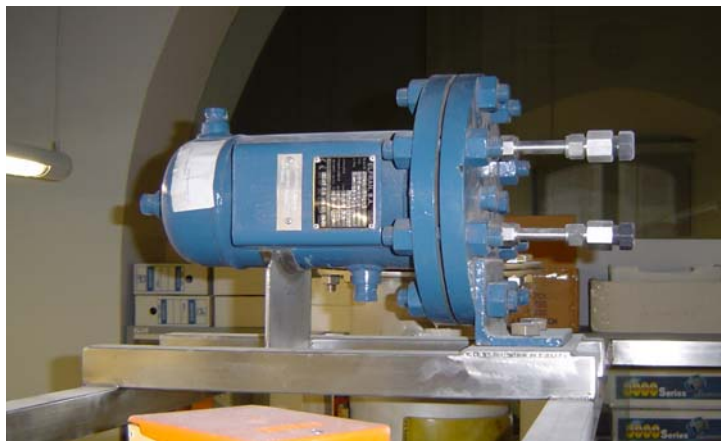


Figura 5. 16- Intercambiador de Cabeza. E-05.



➤ **Depósito decantador D-05.**



Figura 5. 17- Decantador partes delantera y trasera.

Se puede observar en la Figura 5.17 la compleja estructura que posee el depósito decantador D-05.

➤ **Intercambiador de fondo de columna. E-04**

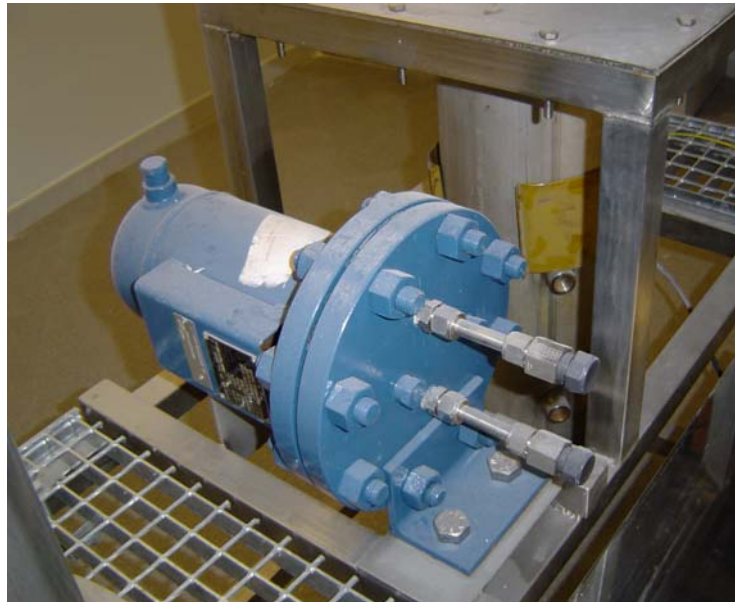


Figura 5. 18- Intercambiador E- 04.

Vista lateral del intercambiador E- 04 (Figura 5.18).



➤ **Enfriador de agua. E-03.**

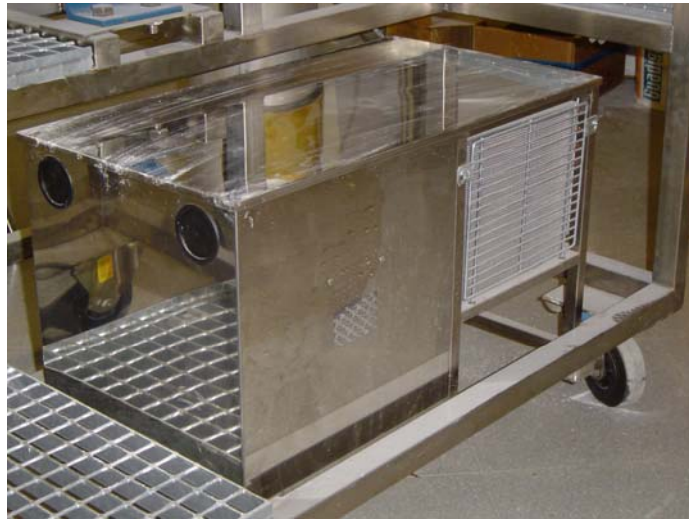


Figura 5. 19- Enfriador de agua. E-03

Debido a circunstancias constructivas el enfriador perteneciente a la parte del reactor químico, se encuentra situado en este bastidor de la planta (Figura 5.19).

➤ **Columna de destilación.**



Figura 5. 20- Detalle de resistencias en cabeza y fondo de columna.



Figura 5. 21- Columna de destilación partes delantera y trasera.

En las Figuras 5.20 y 5.22, se aprecia claramente con detalle la construcción modular de la columna, y sus apoyos sobre el bastidor sobresaliendo un poco por su parte superior por causa de ser mayores las dimensiones de la columna de destilación. También se observan algunos detalles de las resistencias calefactoras y su posición sobre la columna.

➤ **Bastidor completo**

En las figuras 5.22 y 5.23 se puede observar el bastidor perteneciente a la columna de destilación con todos los elementos que forman parte de éste.



Figura 5. 22- Vista delantera Bastidor columna.



Figura 5. 23- Vista trasera Bastidor.



5.6.2- Reactor Químico. Bastidor 2



Figura 5. 24- Bastidor Reactor Químico y accesorios.



Figura 5. 25- Parte trasera bastidor.



Dado que este bastidor es desarrollado en otro proyecto fin de carrera, en este apartado tan solo se muestra una vista general del bastidor con todos sus elementos (Figuras 5.24 y 5.25), y se comenta elemento común (Figura 5.26) utilizado por ambos procesos

➤ **Deposito Etanol D-03.**



Figura 5. 26- Depósito D-03.

- **Bombas.** Actualmente no se encuentran instalados los grupos bomba, pero la situación reservada para estos es la parte inferior de este bastidor, como puede observarse en la Figura 5.13.



5.6.3- Armarios eléctricos y de control. Bastidor 1



Figura 5. 27- Bastidor elementos eléctricos y de control.

Actualmente en este bastidor se encuentran dos elementos (Figura 5.27):



- Armario de **control de potencia de las resistencias** calefactoras.



Figura 5. 28- Detalles del interior del armario de control de potencia.

En la Figura 5.28 se puede apreciar el tamaño del armario y sus elementos principales, y un detalle donde se observan claramente los cuatro rectificadores en cuyo interior se encuentran los tiristores.

- Armario de **variadores de velocidad** de las bombas.

La Figura 5.29 muestra claramente el armario de variadores de velocidad completo, en cuyo interior pueden apreciarse los siete variadores.



Figura 5. 29- Armario de variadores de velocidad.

Para completar este bastidor faltan dos elementos de vital importancia, los cuales deberán ser incluidos para poder realizar la puesta en marcha de la planta. Se puede observar la futura situación de estos elementos en la Figura 5.13.

- **Armario eléctrico.** Que debe contener la alimentación eléctrica junto con los interruptores automáticos diferenciales y magnetotérmicos necesarios, así como los relés y contactores, para todos los dispositivos que lo necesiten.
- **Armario de control.** En el deben encontrarse tanto el sistema de control como las conexiones de control de Entrada-Salida de los dispositivos que la requieran.



5.6.4- Fotografías generales Planta Piloto Completa.



Figura 5. 30- Vista general Planta piloto.

Para finalizar se muestran dos fotografías de la Planta Piloto completa (Figura 5.30), y de los dos bastidores principales (Figura 5.31).



Figura 5. 31- Vista bastidores principales reactor y columna.



6.-Conclusiones y trabajos futuros.

6.1 -Conclusiones.

Se puede concluir que los objetivos principales del proyecto se han cumplido satisfactoriamente.

- **Se han estudiado diferentes alternativas** a la construcción de la planta piloto, que pudieran cubrir las necesidades de la misma, llegándose a la conclusión de la conveniencia de llevar a cabo un desarrollo propio en vez de comprar un equipo o serie de equipos comerciales.
- **Se ha logrado un diseño de procesos** de gran interés tanto para las empresas implicadas como para la Universidad, debido a que forman parte de la producción de las empresas y presentan grandes posibilidades para la investigación y la optimización.
- **Se han llevado a cabo simulaciones** de los procesos implicados para comprobar el correcto funcionamiento y dimensionamiento de los mismos. Para ello se han utilizado las herramientas informáticas de simulación Matlab y Chemcad.
- **Se ha construido la planta piloto** instalándose en el laboratorio del departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad y durante este proceso se ha realizado un seguimiento continuado en cada una de sus fases.
- **Se ha elegido y adquirido un sistema de control automático** adecuado a las necesidades de la planta así como se han seleccionado los **sensores y actuadores** necesarios para crear los lazos de control precisos que permitan el correcto funcionamiento automático del sistema y una gran flexibilidad para la configuración del mismo. Además las diferentes clases de sensores y actuadores también permiten, con vistas a un uso docente, mostrar diferentes posibilidades a los alumnos para llevar a cabo una misma tarea.



6.2 -Trabajos futuros.

Una vez que la planta piloto se encuentra físicamente en el laboratorio de la Universidad, las labores que restan para su completa utilización serían las siguientes:

- **Adquirir tubería flexible y racorería** adecuados a las características de las líneas, es decir, que soporten las temperaturas y presiones que se van a alcanzar durante un uso continuado de la planta, e instalarlos.
- **Calorifugar depósitos y tuberías** que puedan contener fluidos calientes, como por ejemplo la torre de destilación.
- **Instalar actuadores, sensores y sistema de control**, y conectarlos de manera adecuada.
- **Instalar el software del sistema de control (SCADA)** y programarlo con los elementos de la planta para poder realizar alguna aplicación que demuestre el funcionamiento correcto de la misma.
- **Probar y mejorar los algoritmos de control inteligentes** desarrollados por el departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática.
- **Contribuir a solventar los problemas de control** que se dan en las empresas Derivados Químicos S.A y Repsol Y.P.F.
- **Conseguir que los procesos de la planta piloto sean lo más parecidos** posible a los procesos productivos reales con el fin de mejorar su rendimiento extrapolando los resultados del proceso piloto al proceso industrial.
- **Utilizar la planta para labores docentes**, además de labores de investigación, para que los alumnos observen y utilicen instrumentación industrial y procesos reales.



Bibliografía

- [1] Proyecto de Investigación Científica y Desarrollo Tecnológico: “*Sistema jerárquico para la supervisión y control inteligente de procesos farmacéuticos y petroquímicos*” (SUYCON).
- [2] “Predictive control of a high temperature-short time pasteurisation process”. Julio Ibarrola Lacalle. *Control Engineering Practice* 10 (2002) 713-725.
- [3] “Neuro-fuzzy architecture in a batch reactor temperature control system”. E. Sánchez Cuellar, J. López Coronado, C. García Moreno, J.M. Cano Izquierdo. 9th IEEE International Symposium on Intelligent Control pp:11-15. Columbus, Ohio. Agosto 1994.
- [4] George Stephanopoulos: “*Chemical Process Control: An Introduction to Theory and Practice*”. Prentice-Hall International Editions.
- [5] Instituto Valenciano de la Edificación:
[<http://www.five.es/productos/jornadaDomotica/Sistemas de Control Distribuido.pdf>] Tres Forques, 98 - 46018 Valencia.
- [6] url: <http://www.automatas.org/redes/scadas.htm>
- [7] Proyecto fin de carrera: “Proyecto de automatización de una columna de destilación etano-etileno propano-propileno”, Haritz Ugalde Olascoaga. Escuela Técnica Sup. De Ingeniería, Universitat Rovira i Virgili. Septiembre 2003.
- [8] Proyecto fin de carrera: “Análisis de esquemas de control en plantas químicas”. Juan Antonio Serrano Romero, Manuel Rodríguez Hernández
- [9] Proyecto fin de carrera: “Modelado y Simulación de un Proceso de Destilación usando *Matlab* y *Simulink*. Aplicación a un Sistema con Doble Columna Splitter de Propileno/Propano”. Josep Barranco Arnau. Escuela Técnica Sup. De Ingeniería, Universitat Rovira i Virgili. Septiembre 2003.
- [10] Perry, Robert. H. (ed) ; Green, Don. W. (ed) ; Maloney, James. O. (ed): “*Perry: manual del ingeniero químico*”. Tomo 1”. 6ª ed., 3ª ed. en español. Mc Graw Hill, 1997.
- [11] Perry, Robert. H. (ed) ; Green, Don. W. (ed) ; Maloney, James. O. (ed): “*Perry: manual del ingeniero químico*”. Tomo 2”. 6ª ed., 3ª ed. en español. Mc Graw Hill, 1997
- [12] Centro de Computación:
[<http://cipres.cec.uchile.cl/~iq53d/PROCESOS/Documentos>] Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.



- [13] G.U.N.T. Gerätebau GMBH: [<http://www.gunt.de>] Fahrenberg 14 D-22885 Barsbüttel, Germany
- [14] Armfield Inc: [<http://www.armfield.co.uk>] 436 West Commodore Blvd Jackson NJ 08527.
- [15] Carlos A. Smith, Armando B. Corripio: “*Control Automático de Procesos, teoría y práctica*”. Noriega Limusa.
- [16] url: [<http://www.msds.com>]. MSDS Solutions, Free material safety data sheets.
- [17] url: [<http://www.alfinal.com/monografias/destilado.shtml>]
- [18] ICPDAS Co.,LTD : [<http://www.icpdas.com>] No. 111, Kuang-Fu N. Rd., Hsin-Chu Industrial Park, HuKou Shiang, HSINCHU 303, Taiwan.