

Universidad de **Cádiz**

Proyectos de fin de carrera de **Ingeniería Química**

Facultad: CIENCIAS

Titulación: INGENIERÍA QUÍMICA

Título: REDISEÑO DE UNA LÍNEA DE
FRACCIONAMIENTO DE ALQUILACIÓN DE
PARAFINAS

Autora: Rosa María BADANI PRADO

Fecha: Noviembre 2014





Resumen del Proyecto

El Sulfonato de Alquibenceno Lineal (Linear Alkylbenzene Sulphonate: LAS o LABS) es una sustancia que se emplea como base de la mayoría de los detergentes sintéticos utilizados a nivel mundial. Se trata de un surfactante aniónico, de gran importancia en la actualidad, debido a su gran capacidad de biodegradabilidad o descomposición en elementos químicos, inofensivos al medio, por la acción de agentes naturales.

Se obtiene a partir de la alquilación de benceno con un tetrámero de propileno mediante la reacción de alquilación de Friedel-Crafts, y la introducción de un grupo sulfonato aniónico al producto obtenido, denominado como Alquibenceno Lineal (Linear Alkylbenzene: LAB), seguido de su neutralización con hidróxido de sodio para la obtención del producto final.

Una de las principales compañías proveedoras de LAS es el grupo CEPSA, con una producción anual de 80.000 toneladas métricas de esta sustancia.

Las etapas de producción de LAS con las que dicha compañía cuenta son: Unifining, Molex, Pacol, Alquilación y Sulfonación.

El presente proyecto se encuentra en la fase de fraccionamiento de la etapa de Alquilación para la producción de LAS, y tiene como objetivo principal el rediseño de las dos columnas de separación, destinadas a la recuperación de benceno, que actualmente operan en la refinería de la compañía CEPSA ubicada en el barrio de Puente Mayorga, San Roque (Cádiz, España).

El rediseño, se basa en la sustitución de las dos columnas por una sola unidad de recuperación de benceno produciendo un ahorro de 277.431 € en material, de 5.748 € por mes en operaciones y mantenimiento, y de 213.571 € por mes en costos totales.

Ésta columna recibe el producto de la unidad previa, columna de separación de ácido fluorhídrico, que contiene benceno, LAB y otros compuestos en menor proporción. Se trata de la torre inicial de la línea de fraccionamiento comprendida por tres torres de rectificación en serie.

El proceso de separación se inicia al ingresar la corriente de alimentación a la columna donde se somete a energía calorífica produciendo vapor y realizándose la separación de compuestos. Una parte de la corriente de producto

de cabeza de columna, condensada, retorna a ésta unidad en forma de reflujo, y la otra es el benceno recuperado que presenta una pureza del 99,97% y se dirige nuevamente al reactor de producción de LAB (Reactor de Alquilación). Esta última corriente es muy importante porque constituye un ahorro económico en materia prima de 211.524.507 € por año.

Por otra parte, el producto de fondo de columna se divide también en dos corrientes, una que retorna a ésta misma columna y otra que continúa el recorrido hacia la siguiente etapa estudiada en el proyecto Parte II: Torre de rectificación de parafinas lineales.

En cuanto al material y el diseño de la columna resultante, está compuesta de acero al carbono SA-285 C con un diámetro externo de 9,43 m y una altura de 22,60 m, cuenta con 30 platos perforados del mismo material, la cubierta de cabeza y cola de columna son fondos toriesféricos de tipo Klopper y está soportada mediante un faldón.

El propósito de este proyecto no solamente es el ahorro económico y energético, sino también el de la preservación del medio ambiente, pues la utilización de fluidos de servicio respetuosos con el medio, como son el agua y el aire, disminuyen notablemente la contaminación ambiental.

REDISEÑO DE UNA LÍNEA DE
FRACCIONAMIENTO DE ALQUILACIÓN DE
PARAFINAS.

PARTE I: UNIDAD DE RECUPERACIÓN DE
BENCENO.

ÍNDICE GENERAL

AUTORA: D^a. ROSA MARÍA BADANI PRADO

DOCUMENTOS DEL PROYECTO

- DOCUMENTO 1: MEMORIA
- DOCUMENTO 2: ANEXOS
- DOCUMENTO 3: PLANOS
- DOCUMENTO 4: PLIEGO DE
CONDICIONES
- DOCUMENTO 5: ESTADO DE
MEDICIONES
- DOCUMENTO 6: PRESUPUESTO
- DOCUMENTO 7: ESTUDIOS CON
ENTIDAD PROPIA

Índice general

DOCUMENTO 1: MEMORIA

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	21
1.1 PROBLEMÁTICA ACTUAL	21
1.2 SULFONATO DE ALQUILBENCENO LINEAL: LAS.....	22
1.2.1 <i>Introducción</i>	22
1.2.2 <i>Obtención de LAS</i>	23
1.2.3 <i>Reactivo fundamental: Benceno</i>	24
1.2.4 <i>Producción y consumo</i>	26
1.3 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE CEPESA.	27
1.3.1 <i>Etapas del proceso de obtención de LAS</i>	27
1.4 APLICACIONES DE LAS.	30
1.5 REQUISITOS DE DISEÑO.	30
1.6 UNIDAD DE RECUPERACIÓN DE BENCENO.	31
1.7 LOCALIZACIÓN DE LA PLANTA.....	35
CAPÍTULO 2: JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVO DEL PROYECTO.....	36
2.1 JUSTIFICACIÓN.....	36
2.2 OBJETIVO.....	36
CAPÍTULO 3: ANTECEDENTES.	38
3.1 VIABILIDAD TÉCNICA.....	38
3.1.1 <i>Operaciones de separación</i>	38
3.1.2 <i>Selección de la operación</i>	41
3.2 VIABILIDAD ECONÓMICA.	42
3.2.1 <i>Inversión total de capital</i>	42
3.2.2 <i>Revalorización de productos</i>	43
3.2.3 <i>Ahorro económico</i>	43
3.3 VIABILIDAD LEGAL.	43
3.3.1 <i>Normativa aplicada</i>	44
3.3.2 <i>Legislación aplicada</i>	44
CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE SOLUCIONES Y RESULTADOS DE LA UNIDAD DE RECUPERACIÓN DE BENCENO.	47
4.1 INTRODUCCIÓN.	47
4.2 JUSTIFICACIÓN.....	48
4.3 NORMATIVA DE DISEÑO.	48
4.4 MÉTODO DE RESOLUCIÓN.....	49
4.5 CARACTERIZACIÓN DE LAS CORRIENTES.....	49
4.5.1 <i>Corriente de alimentación (F)</i>	50
4.5.2 <i>Corriente de cabeza (D)</i>	50
4.5.3 <i>Corriente de fondo (W)</i>	51
4.5.4 <i>Corriente de reflujo (L)</i>	51
4.6 REQUISITOS Y CONSIDERACIONES EN EL DISEÑO.....	51
4.7 DISEÑO DE LA COLUMNA.	52
4.7.1 <i>Aplicación del Método FUG</i>	53
4.7.2 <i>Diseño hidráulico de la columna</i>	53
4.7.3 <i>Eficacia de la unidad</i>	59

4.7.4	<i>Diseño mecánico de la unidad</i>	60
4.8	DISTRIBUCIÓN EN PLANTA.....	64
CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE SOLUCIONES Y RESULTADOS DE LOS SISTEMAS DE INTERCAMBIO DE CALOR. 66		
5.1	INTRODUCCIÓN.	66
5.2	JUSTIFICACIÓN.....	66
5.3	NORMATIVA DE DISEÑO.	67
5.4	DISEÑO DE LOS SISTEMAS DE INTERCAMBIO DE CALOR.	67
5.4.1	<i>Método de resolución</i>	67
5.4.2	<i>Intercambiador de calor de cabeza de columna</i>	68
5.4.3	<i>Intercambiador de fondo de columna</i>	79
CAPÍTULO 6. ANÁLISIS DE SOLUCIONES Y RESULTADOS DEL SISTEMA DE TUBERÍAS. 88		
6.1	INTRODUCCIÓN.	88
6.2	JUSTIFICACIÓN.....	88
6.3	NORMATIVA DE DISEÑO.	89
6.4	DISEÑO DEL SISTEMA DE TUBERÍAS.	89
6.4.1	<i>Método de resolución</i>	89
6.4.2	<i>Requisitos de diseño</i>	90
6.4.3	<i>Características de tuberías</i>	91
6.4.4	<i>Accesorios de tuberías</i>	91
6.4.5	<i>Diseño de conducciones</i>	94
CAPÍTULO 7. ANÁLISIS DE SOLUCIONES Y RESULTADOS DE LOS SISTEMAS DE IMPULSIÓN..... 97		
7.1	INTRODUCCIÓN.	97
7.2	JUSTIFICACIÓN.....	97
7.3	NORMATIVA DE DISEÑO.	98
7.4	DISEÑO DEL SISTEMA DE IMPULSIÓN.	98
7.4.1	<i>Método de resolución</i>	98
7.4.2	<i>Requisitos de diseño</i>	99
7.4.3	<i>Selección del tipo de bomba</i>	99
7.4.4	<i>Parámetros característicos</i>	100
7.4.5	<i>Características de las bombas</i>	101
CAPÍTULO 8. ANÁLISIS DE SOLUCIONES Y RESULTADOS DEL ACUMULADOR DE REFLUJO..... 103		
8.1	INTRODUCCIÓN.	103
8.2	JUSTIFICACIÓN.....	103
8.3	NORMATIVA DE DISEÑO.	104
8.4	DISEÑO DEL ACUMULADOR DE REFLUJO.	104
8.4.1	<i>Corriente de ingreso</i>	104
8.4.2	<i>Tipos de recipientes</i>	104
8.4.3	<i>Selección del tipo de recipiente</i>	105
8.4.4	<i>Características del acumulador de reflujo</i>	106
8.4.5	<i>Componentes</i>	107
CAPÍTULO 9: ANÁLISIS DE SOLUCIONES Y RESULTADOS DE INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL DE LA UNIDAD..... 108		
9.1	INTRODUCCIÓN.	108
9.2	VARIABLES DE OPERACIÓN.	108

9.2.1	Temperatura.....	109
9.2.2	Presión.....	109
9.2.3	Caudal.....	110
9.2.4	Composición.....	110
9.3	LAZOS DE CONTROL.....	110
9.3.1	Lazo abierto.....	110
9.3.2	Lazo cerrado.....	110
9.4	CONTROL DEL PROCESO.....	111
9.4.1	Control de la Línea 1.....	112
9.4.2	Control de la Línea 2.....	113
9.4.3	Control de la Línea 3.....	115
CAPÍTULO 10: MANTENIMIENTO Y PUESTA EN MARCHA.....		116
10.1	INTRODUCCIÓN.....	116
10.2	MANTENIMIENTO.....	116
10.2.1	Tipos de mantenimiento.....	116
10.2.2	Plan de mantenimiento.....	118
10.3	PUESTA EN MARCHA.....	122
CAPÍTULO 11: DEFINICIONES Y ABREVIATURAS.....		123
CAPÍTULO 12: NORMAS Y REFERENCIAS.....		125
12.1.	DISPOSICIONES LEGALES Y NORMAS APLICADAS.....	125
12.2.	REFERENCIAS.....	127
DOCUMENTO 2: ANEXOS		
ANEXO A: DISEÑO DE LA COLUMNA DE RECTIFICACIÓN.....		136
A.1	INTRODUCCIÓN.....	136
A.2	DISEÑO DE LA COLUMNA DE DESTILACIÓN.....	136
A.2.1	Caracterización de las corrientes.....	136
A.2.2	Balance de materia.....	138
A.2.3	Condición de alimentación.....	140
A.2.4	Determinación de etapas mínimas, relación de reflujo y número de etapas de equilibrio.....	140
A.2.5	Posición del plato de alimentación.....	148
A.2.6	Número de etapas reales.....	149
A.3	DISEÑO HIDRÁULICO DE LA COLUMNA.....	152
A.3.1.	Cálculo de caudales molares internos.....	152
A.3.2.	Diámetro de columna.....	154
A.3.3.	Lloriqueo.....	165
A.3.4.	Arrastre.....	166
A.3.5.	Inundación.....	167
A.3.6.	Descarga.....	173
A.4	DISEÑO MECÁNICO DE LA COLUMNA.....	174
A.4.1.	Presión de diseño.....	174
A.4.2.	Temperatura de diseño.....	174
A.4.3.	Altura estimada de torre.....	175
A.4.4.	Factor de corrosión.....	176
A.4.5.	Material empleado.....	177

A.4.6.	Fondos	177
A.4.7.	Cálculo del espesor de la envolvente.....	180
A.4.8.	Cálculo de la altura de faldilla.....	186
A.4.9.	Altura de la columna y la unidad.	187
ANEXO B: DISEÑO DE LOS EQUIPOS DE TRANSMISIÓN DE CALOR.		188
B.1.	INTRODUCCIÓN.	188
B.2.	DISEÑO DEL CONDENSADOR.	188
B.2.1.	Introducción.	188
B.2.2.	Caracterización de las corrientes.	188
B.2.3.	Requisitos de diseño.....	189
B.2.4.	Selección del tipo de intercambiador.	190
B.2.5.	Selección de la trayectoria de flujo.	190
B.2.6.	Características del intercambiador.	190
B.2.7.	Cálculo del calor intercambiado.....	191
B.2.8.	Cálculo del área del intercambiador.	193
B.2.9.	Diseño mecánico del intercambiador.....	211
B.2.10.	Pérdida de carga en tubos.	214
B.2.11.	Sistema de impulsión.	217
B.3.	DISEÑO DEL REHERVIDOR.	221
B.3.1.	Introducción.	221
B.3.2.	Caracterización de las corrientes.	222
B.3.3.	Requisitos de diseño y consideraciones.....	223
B.3.4.	Selección del tipo de intercambiador.	223
B.3.5.	Selección de la trayectoria de flujo.	223
B.3.6.	Características del intercambiador.	224
B.3.7.	Cálculo del calor intercambiado.....	224
B.3.8.	Cálculo del área del intercambiador.	226
B.3.9.	Características de carcasa y haz de tubos.....	239
B.3.10.	Diseño mecánico del intercambiador.....	239
B.3.11.	Pérdida de carga.	245
ANEXO C: SISTEMA DE TUBERÍAS.		250
C.1.	INTRODUCCIÓN.	250
C.2.	DEFINICIÓN DE LAS LÍNEAS DE CONDUCCIONES.....	250
C.3.	CARACTERIZACIÓN DE LAS CORRIENTES.....	251
C.4.	DISEÑO DE CONDUCCIONES.....	253
C.4.1.	Diámetro interno.....	253
C.4.2.	Espesor de tubería.....	254
ANEXO D: DISEÑO DEL SISTEMA DE IMPULSIÓN.		265
D.1.	INTRODUCCIÓN.	265
D.2.	LOCALIZACIÓN EN PLANTA.	265
D.3.	SELECCIÓN DEL TIPO DE BOMBA.	266
D.4.	PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS.	266
D.4.1.	Caracterización de las corrientes.	267
D.4.2.	Altura efectiva.....	267
D.4.3.	Potencia.	268
D.4.4.	Altura neta positiva de succión.	269
D.4.5.	Altura neta positiva de succión requerida.....	271

ANEXO E: DISEÑO DEL ACUMULADOR DE REFLUJO	273
E.1. INTRODUCCIÓN.	273
E.2. CONDICIONES DE DISEÑO.....	273
E.2.1. <i>Presión de diseño.</i>	273
E.2.2. <i>Temperatura de diseño.</i>	274
E.3. PARÁMETROS DEL MATERIAL.	274
E.3.1. <i>Máxima tensión admisible.</i>	274
E.3.2. <i>Eficiencia de soldadura</i>	274
E.3.3. <i>Factor de corrosión.</i>	274
E.3.4. <i>Tamaño óptimo.</i>	275
E.4. DISEÑO MECÁNICO.	276
E.4.1. <i>Fondos del recipiente</i>	276
E.5. DIMENSIONES	279
ANEXO F: TABLAS Y FIGURAS.	280
ANEXO G: FICHAS DE SEGURIDAD Y CATÁLOGOS.	299
DOCUEMENTO 3: PLANOS	
PLANO 1: DISTRIBUCIÓN EN PLANTA.....	325
PLANO 2: COLUMNA DE DESTILACIÓN.	326
PLANO 3: PLATO DE DESTILACIÓN.	327
PLANO 4: AERORREFRIGERADOR	328
PLANO 5: REHERVIDOR.....	329
PLANO 6: ACUMULADOR DE REFLUJO.....	330
DOCUMENTO 4: PLIEGO DE CONDICIONES	
CAPÍTULO 1: PLIEGO DE CLÁUSULAS ADMINISTRATIVAS.....	334
1.1 INTRODUCCIÓN.	334
1.2 DISPOSICIONES GENERALES.	334
1.2.1 <i>Definición y alcance del pliego.</i>	334
1.2.2 <i>Descripción y objetivo del proyecto.</i>	335
1.2.3 <i>Emplazamiento.</i>	335
1.2.4 <i>Documentos del proyecto que definen las obras.</i>	335
1.2.5 <i>Normas, reglamentos y ordenanzas para los materiales y obras.</i>	336
1.2.6 <i>Normas de edificación.</i>	337
1.2.7 <i>Normas UNE.</i>	338
1.2.8 <i>Normas ISO.</i>	338
1.3 DISPOSICIONES FACULTATIVAS.....	338
1.3.1 <i>Partes que intervienen en el pliego. Términos del pliego de condiciones.</i>	338
1.3.2 <i>Obligaciones y derechos del contratista.</i>	339
1.3.3 <i>Facultades en la dirección de obra.</i>	341
1.3.4 <i>Documentación del seguimiento de la obra.</i>	342
1.3.5 <i>Replanteo.</i>	343
1.3.6 <i>Condiciones generales del suministro de equipos y materiales.</i>	343

1.3.7	Discrepancias entre pliegos y normas.....	344
1.3.8	Control de recepción.....	344
1.3.9	Control de ejecución.....	344
1.3.10	Control de finalización.....	345
1.3.11	Ejecución de las obras.....	346
1.3.12	Partidas de alzada.....	347
1.3.13	Recepción y liquidaciones.....	347
1.3.14	Plazo de garantía.....	347
1.4	CONDICIONES ECONÓMICAS.....	348
1.4.1	Fianzas.....	348
1.4.2	Composición de precios unitarios.....	349
1.4.3	Capital de trabajo.....	351
1.4.4	Coste de puesta en marcha.....	351
1.4.5	Precios contradictorios.....	351
1.4.6	Mejoras y modificaciones.....	352
1.4.7	Revisión de precios.....	352
1.4.8	Valoración, medición y abonos de los trabajos.....	353
1.4.9	Penalizaciones.....	353
1.4.10	Seguros y conservación de la obra.....	353
1.4.11	Condiciones de pago.....	354
1.5	CONDICIONES LEGALES.....	355
1.5.1	Contratista.....	355
1.5.2	Contrato.....	356
1.5.3	Adjudicación.....	356
1.5.4	Arbitraje y jurisdicción competente.....	357
1.5.5	Responsabilidades del Contratista.....	357
1.5.6	Subcontrata.....	357
1.5.7	Accidentes de trabajo.....	358
1.5.8	Rescisión de contrato.....	358
CAPÍTULO 2: PLIEGO DE CONDICIONES PARTICULARES.....		360
2.1.	INTRODUCCIÓN.....	360
2.2.	DISPOSICIONES GENERALES.....	360
2.3.	CONDICIONES DE MATERIALES, EQUIPOS Y MAQUINARIA.....	360
2.4.	CONDICIONES GENERALES DE EJECUCIÓN.....	361
2.5.	PLIEGOS, INSTRUCCIONES Y NORMAS APLICABLES.....	362
2.5.1.	Disposiciones de carácter particular.....	362
2.5.2.	Materiales, equipos y maquinaria.....	362
2.5.3.	Condiciones de ejecución.....	374
DOCUMENTO 5: ESTADO DE MEDICIONES		
CAPÍTULO 1: ESTADO DE MEDICIONES.....		379
1.1.	INTRODUCCIÓN.....	379
1.2.	EQUIPOS PRINCIPALES.....	379
1.3.	EQUIPOS AUXILIARES.....	380
1.4.	ELEMENTOS COMPLEMENTARIOS.....	380

DOCUMENTO 6: PRESUPUESTO

CAPÍTULO 1: PRESUPUESTO.....	384
1.1. INTRODUCCIÓN.....	384
1.2. MÉTODO DE CÁLCULO.....	384
1.2.1. Costo de la columna de rectificación.....	385
1.2.2. Costo de los intercambiadores de calor.....	388
1.2.3. Costo del acumulador de reflujo.....	390
1.3. PRESUPUESTOS PARCIALES.....	391
1.4. INVERSIÓN TOTAL DE CAPITAL.....	392
1.4.1. Inversión de capital fijo.....	392
1.4.2. Capital de trabajo.....	397
1.4.3. Coste de puesta en marcha.....	397
1.4.4. Inversión total.....	397
CAPÍTULO 2: ESTUDIO ECONÓMICO.....	398
2.1. INTRODUCCIÓN.....	398
2.2. CONCEPTOS PREVIOS.....	398
2.3. REVALORIZACIÓN DEL PRODUCTO.....	399
2.3.1. Benceno.....	399
2.3.2. Alquilbenceno Lineal (LAB).....	400
2.3.3. Revalorización de productos.....	401
2.4. AHORRO ECONÓMICO.....	401
2.4.1. Costos totales de la unidad.....	401
2.4.2. Costos de las dos columnas a suplir.....	402
2.4.3. Ahorro.....	403

DOCUMENTO 7: ESTUDIOS CON ENTIDAD PROPIA

CAPÍTULO 1: SEGURIDAD E HIGIENE.....	407
1.1. INTRODUCCIÓN.....	407
1.2. LEGISLACIÓN APLICABLE.....	407
1.3. RIESGO QUÍMICO.....	407
1.4. RIESGO FÍSICO.....	409
1.4.1. Ruido.....	409
1.4.2. Energía térmica.....	410
1.4.3. Riesgo eléctrico.....	411
1.5. RIESGO DE EXPLOSIÓN E INCENDIO.....	412
1.6. RIESGOS EN LA UNIDAD DE RECUPERACIÓN DE BENCENO.....	414
1.7. EQUIPOS DE SEGURIDAD.....	415
1.7.1. Equipos de protección individual.....	415
1.7.2. Equipos de protección colectiva.....	415
1.8. GESTIÓN DE SEGURIDAD.....	417
1.8.1. Coordinación.....	417
1.8.2. Registro de la información.....	418
1.8.3. Formación.....	419

CAPÍTULO 2: EVALUACIÓN DE IMPACTO MEDIOAMBIENTAL	420
2.1. INTRODUCCIÓN	420
2.2. LEGISLACIÓN.....	420
2.3. GESTIÓN DE RESIDUOS	421
2.3.1. <i>Emisiones de líquidos</i>	421
2.3.2. <i>Emisiones de sólidos</i>	421
2.3.3. <i>Emisiones de gases</i>	421
2.3.4. <i>Ruido</i>	422

REDISEÑO DE UNA LÍNEA DE
FRACCIONAMIENTO DE ALQUILACIÓN DE
PARAFINAS.

PARTE I: UNIDAD DE RECUPERACIÓN DE
BENCENO.

DOCUMENTO 1: MEMORIA



Da. ROSA MARÍA BADANI PRADO

AUTORA

Índice Memoria

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	21
1.1 PROBLEMÁTICA ACTUAL	21
1.2 SULFONATO DE ALQUILBENCENO LINEAL: LAS.....	22
1.2.1 <i>Introducción</i>	22
1.2.2 <i>Obtención de LAS</i>	23
1.2.3 <i>Reactivo fundamental: Benceno</i>	24
1.2.4 <i>Producción y consumo</i>	26
1.3 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE CEPSA.	27
1.3.1 <i>Etapas del proceso de obtención de LAS</i>	27
1.4 APLICACIONES DE LAS.	30
1.5 REQUISITOS DE DISEÑO.	30
1.6 UNIDAD DE RECUPERACIÓN DE BENCENO.	31
1.7 LOCALIZACIÓN DE LA PLANTA.....	35
CAPÍTULO 2: JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVO DEL PROYECTO.....	36
2.1 JUSTIFICACIÓN.....	36
2.2 OBJETIVO.....	36
CAPÍTULO 3: ANTECEDENTES.	38
3.1 VIABILIDAD TÉCNICA.....	38
3.1.1 <i>Operaciones de separación</i>	38
3.1.2 <i>Selección de la operación</i>	41
3.2 VIABILIDAD ECONÓMICA.	42
3.2.1 <i>Inversión total de capital</i>	42
3.2.2 <i>Revalorización de productos</i>	43
3.2.3 <i>Ahorro económico</i>	43
3.3 VIABILIDAD LEGAL.	43
3.3.1 <i>Normativa aplicada</i>	44
3.3.2 <i>Legislación aplicada</i>	44
CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE SOLUCIONES Y RESULTADOS DE LA UNIDAD DE RECUPERACIÓN DE BENCENO.	47
4.1 INTRODUCCIÓN.	47
4.2 JUSTIFICACIÓN.....	48
4.3 NORMATIVA DE DISEÑO.	48
4.4 MÉTODO DE RESOLUCIÓN.....	49
4.5 CARACTERIZACIÓN DE LAS CORRIENTES.....	49
4.5.1 <i>Corriente de alimentación (F)</i>	50
4.5.2 <i>Corriente de cabeza (D)</i>	50
4.5.3 <i>Corriente de fondo (W)</i>	51
4.5.4 <i>Corriente de refluo (L)</i>	51
4.6 REQUISITOS Y CONSIDERACIONES EN EL DISEÑO.....	51
4.7 DISEÑO DE LA COLUMNA.	52
4.7.1 <i>Aplicación del Método FUG</i>	53
4.7.2 <i>Diseño hidráulico de la columna</i>	53
4.7.3 <i>Eficacia de la unidad</i>	59
4.7.4 <i>Diseño mecánico de la unidad</i>	60

4.8	DISTRIBUCIÓN EN PLANTA.....	64
CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE SOLUCIONES Y RESULTADOS DE LOS SISTEMAS DE INTERCAMBIO DE CALOR..... 66		
5.1	INTRODUCCIÓN.....	66
5.2	JUSTIFICACIÓN.....	66
5.3	NORMATIVA DE DISEÑO.....	67
5.4	DISEÑO DE LOS SISTEMAS DE INTERCAMBIO DE CALOR.....	67
5.4.1	<i>Método de resolución.....</i>	67
5.4.2	<i>Intercambiador de calor de cabeza de columna.....</i>	68
5.4.3	<i>Intercambiador de fondo de columna.....</i>	79
CAPÍTULO 6. ANÁLISIS DE SOLUCIONES Y RESULTADOS DEL SISTEMA DE TUBERÍAS..... 88		
6.1	INTRODUCCIÓN.....	88
6.2	JUSTIFICACIÓN.....	88
6.3	NORMATIVA DE DISEÑO.....	89
6.4	DISEÑO DEL SISTEMA DE TUBERÍAS.....	89
6.4.1	<i>Método de resolución.....</i>	89
6.4.2	<i>Requisitos de diseño.....</i>	90
6.4.3	<i>Características de tuberías.....</i>	91
6.4.4	<i>Accesorios de tuberías.....</i>	91
6.4.5	<i>Diseño de conducciones.....</i>	94
CAPÍTULO 7. ANÁLISIS DE SOLUCIONES Y RESULTADOS DE LOS SISTEMAS DE IMPULSIÓN..... 97		
7.1	INTRODUCCIÓN.....	97
7.2	JUSTIFICACIÓN.....	97
7.3	NORMATIVA DE DISEÑO.....	98
7.4	DISEÑO DEL SISTEMA DE IMPULSIÓN.....	98
7.4.1	<i>Método de resolución.....</i>	98
7.4.2	<i>Requisitos de diseño.....</i>	99
7.4.3	<i>Selección del tipo de bomba.....</i>	99
7.4.4	<i>Parámetros característicos.....</i>	100
7.4.5	<i>Características de las bombas.....</i>	101
CAPÍTULO 8. ANÁLISIS DE SOLUCIONES Y RESULTADOS DEL ACUMULADOR DE REFLUJO..... 103		
8.1	INTRODUCCIÓN.....	103
8.2	JUSTIFICACIÓN.....	103
8.3	NORMATIVA DE DISEÑO.....	104
8.4	DISEÑO DEL ACUMULADOR DE REFLUJO.....	104
8.4.1	<i>Corriente de ingreso.....</i>	104
8.4.2	<i>Tipos de recipientes.....</i>	104
8.4.3	<i>Selección del tipo de recipiente.....</i>	105
8.4.4	<i>Características del acumulador de reflujo.....</i>	106
8.4.5	<i>Componentes.....</i>	107
CAPÍTULO 9: ANÁLISIS DE SOLUCIONES Y RESULTADOS DE INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL DE LA UNIDAD..... 108		
9.1	INTRODUCCIÓN.....	108
9.2	VARIABLES DE OPERACIÓN.....	108
9.2.1	<i>Temperatura.....</i>	109

9.2.2	<i>Presión</i>	109
9.2.3	<i>Caudal</i>	110
9.2.4	<i>Composición</i>	110
9.3	LAZOS DE CONTROL.....	110
9.3.1	<i>Lazo abierto</i>	110
9.3.2	<i>Lazo cerrado</i>	110
9.4	CONTROL DEL PROCESO.....	111
9.4.1	<i>Control de la Línea 1</i>	112
9.4.2	<i>Control de la Línea 2</i>	113
9.4.3	<i>Control de la Línea 3</i>	115
CAPÍTULO 10: MANTENIMIENTO Y PUESTA EN MARCHA		116
10.1	INTRODUCCIÓN.....	116
10.2	MANTENIMIENTO.....	116
10.2.1	<i>Tipos de mantenimiento</i>	116
10.2.2	<i>Plan de mantenimiento</i>	118
10.3	PUESTA EN MARCHA.....	122
CAPÍTULO 11: DEFINICIONES Y ABREVIATURAS		123
CAPÍTULO 12: NORMAS Y REFERENCIAS		125
12.1	DISPOSICIONES LEGALES Y NORMAS APLICADAS.....	125
12.2	REFERENCIAS.....	127

CAPÍTULO 1: Introducción.

1.1 Problemática actual.

Actualmente, un continuo crecimiento en la población mundial así como de su nivel de desarrollo lleva consigo un incremento del consumo de bienes y servicios, conduciendo a una mayor necesidad de recursos energéticos, cuyas consecuencias, exigen un cambio del modelo de vida y producción de materiales para evitar un mayor daño al ecosistema.

Como resultado, la búsqueda de materiales biodegradables y respetuosos con el medio ambiente va en aumento, exigiendo una mayor eficacia de los procesos para disminuir residuos y obtener mejores resultados en el aprovechamiento de los recursos.

Es también un hecho que la higiene ha tomado una posición más elevada en la sociedad, debido a las diversas enfermedades infecciosas que afectan a la población, demandando una continua búsqueda de sustancias que ayuden a combatir la contaminación bacteriana, micológica, virológica y otros y prevenirlas de manera sencilla y desde el hogar mediante la utilización de surfactantes, también llamados tensioactivos empleados como detergentes.

En África y Latinoamérica, el jabón sigue siendo el surfactante principal para el lavado de textiles y el cuidado personal. Sin embargo, en regiones más desarrolladas del mundo como Norte América, oeste de Europa y Japón, los detergentes sintéticos son los más utilizados para estos propósitos [1].

Uno de los surfactantes aniónicos que ha adquirido gran atención por su contribución al medio debido a su gran capacidad de biodegradabilidad o de descomposición en elementos químicos inofensivos al medio por la acción de agentes naturales como el sol, el agua, las bacterias, las plantas o los animales, y que actualmente domina el mercado es el Sulfonato de Alquilbenceno Lineal (Linear Alkylbenzene Sulphonate: LAS o LABS).

1.2 Sulfonato de Alquilbenceno Lineal: LAS.

1.2.1 Introducción.

Los surfactantes son compuestos que afectan la tensión superficial entre las moléculas de agua para poder penetrar mejor en superficies y tejidos, al disolverse en el medio, forman cadenas con un extremo hidrófobo que atrae las moléculas de aceites y grasas ejerciendo como detergente, y su otro extremo hidrófilo se combina con el agua arrastrando consigo las partículas y llevando a cabo la acción limpiadora.

El Sulfonato Alquilbenceno Lineal (LAS) es la base de la mayoría de los detergentes sintéticos utilizados a nivel mundial. Se trata de un surfactante aniónico que debe su denominación al grupo funcional cargado negativamente presente en su molécula [1,2]. Véase Figura 1.1.

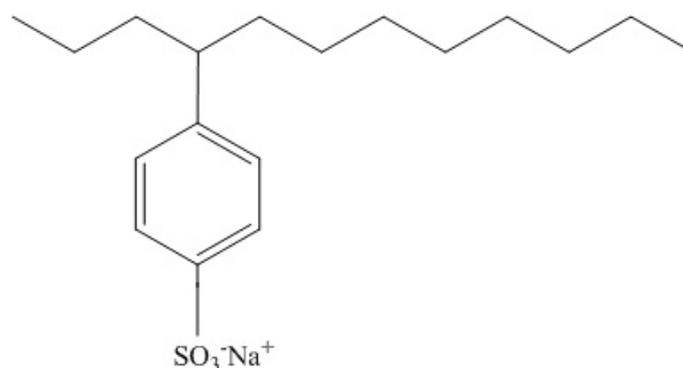


Figura 1.1. Molécula de Sulfato de Alquilbenceno Lineal (LAS).

En cuanto a su composición, el compuesto LAS está formado tanto por parafinas lineales, como por benceno y sulfonato de sodio.

1.2.2 Obtención de LAS.

La materia prima de producción de LAS, es el compuesto Alquilbenceno Lineal (LAB) que se trata del resultado de la alquilación de benceno (C_6H_6) con un tetrámero de propileno mediante la reacción de alquilación de Friedel-Crafts, en la que el tetrámero es una mezcla de olefinas (Figura 1.2).

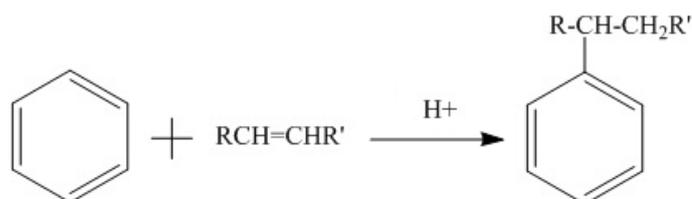


Figura 1.2. Alquilación de Benceno.

La introducción de un grupo sulfonato aniónico (SO_3^-) en el componente orgánico es el camino predominante en la obtención de LAS.

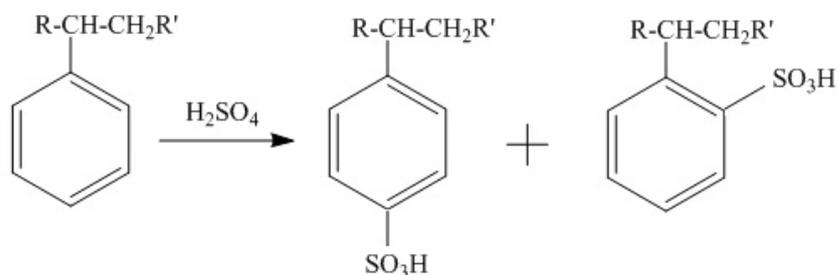


Figura 1.3. Sulfonación de LAB. Izquierda: LAB, centro: configuración *para*-, derecha: configuración *orto*-.

Como resultado, el correspondiente sulfonato alquilbenceno se ramifica, presentando entre 10 y 14 átomos de carbono, adquiriendo configuraciones *para*- y *orto*- (Figura 1.3). El compuesto detergente es entonces producido por sulfonación del alquilbenceno con óleum o trióxido de sulfuro en la posición *para*- menos impedida, seguido de su neutralización con hidróxido de sodio o sosa (Figura 1.4).

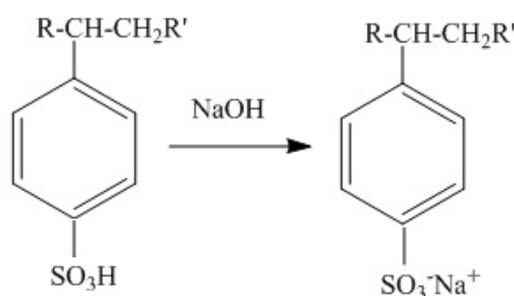


Figura 1.4. Neutralización molécula de LAS.

El detergente activo puede luego ser formulado como producto comercial [2].

1.2.3 Reactivo fundamental: Benceno.

El benceno es un hidrocarburo aromático compuesto por 6 átomos de carbono y 6 átomos de hidrógeno. Se trata de una molécula plana y simétrica de estructura resonante¹ (Figura 1.5) cuyas principales características se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 1.1. Características del benceno.

Aspecto	Líquido incoloro, claro y brillante
Clasificación	Cancerígeno clase 1A, mutágeno clase 1B
Peso molecular (kg·kmol⁻¹)	78,11
Punto normal de ebullición (°C)	80,09
Punto de fusión (°C)	6
Densidad en C.N.* (kg·m⁻³)	882,2
Punto de inflamación (°C)	-11
Temperatura de autoignición (°C)	498

(*) C.N.: Condiciones normales de temperatura 25°C y presión 1 atmósfera.

En su mayoría, el benceno se obtiene del gas de los hornos de coque y del alquitrán de hulla, aunque algunos yacimientos petrolíferos contienen también notables cantidades de este compuesto.

¹ Resonancia molecular: Combinación de estructuras teóricas de una molécula para una mejor aproximación de la estructura real.

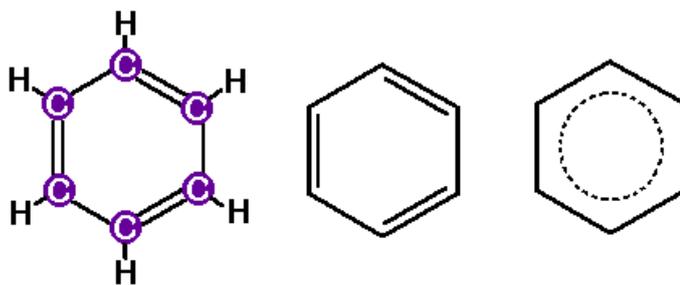


Figura 1.5. Representación de la molécula de Benceno.

La mayor demanda de mercado a nivel mundial de dicho hidrocarburo es de la producción de los siguientes derivados: etilbenceno, cumeno y ciclohexano, sin embargo, su utilización en la producción de nitrobenceno y otros compuestos como el LAS han tomado mayor importancia en los últimos años. Se prevé que la demanda de benceno tendrá un crecimiento anual de un 3,50% hasta 2.016 [3].

Aproximadamente el 50% de la producción de benceno va destinada a la elaboración de etilbenceno, el cual es empleado como materia prima de polifenileno o poliestirenos que a su vez son utilizados en envases de alimentos, electrodomésticos, medicamentos y otros equipos eléctricos y aislantes. El 20%, es utilizado en la producción de cumeno, mediante el cual se elabora fenol y propanona o acetona que se convierten en una amplia gama de polímeros, y forman parte de solventes de grasas, pinturas, esmaltes, recubrimientos, pesticidas y combustibles. Y de los siguientes compuestos que tienen una cuota de demanda del mercado del 10% cada uno, se encuentran: El ciclohexano por una parte, el cual es empleado principalmente en la producción de poliamidas o fibras y resinas de nylon para textiles; luego un segundo producto que es el nitrobenceno, utilizado en la elaboración de colorantes y poliuretano; y finalmente el LAS utilizado como base para la producción de detergentes [4].

El precio del benceno para septiembre de 2.014 es de 1.012 euros por tonelada [5].

1.2.4 Producción y consumo.

Antes de la Segunda Guerra Mundial, la gran mayoría de productos de limpieza y lavandería presentaban como materias primas jabones de ácidos grasos obtenidos de grasas y aceites naturales como el sebo y el aceite de coco.

Durante la misma guerra mundial y el tiempo posterior a ésta, la industria química desarrolla nuevos y eficientes procesos para la producción de detergentes derivados del petróleo basados en tetrámeros de propileno y benceno. Entre los años 1.945 y 1.970 es cuando se da el mayor cambio, pues en 1.945 los surfactantes sintéticos como los BAS (Sulfonato de Alquibenceno Ramificado) representaban solamente un 4% del mercado doméstico, mientras que en 1.970 más de un 80% de los detergentes utilizados eran sintéticos [6].

Actualmente, cerca del 98% de la producción de LAB es utilizada para fabricar LAS, con una fuerte demanda en regiones como el Medio Oriente, China, Sudamérica e India que exhiben una velocidad de crecimiento del 3,5 a 5% desde 2.010 a 2.015, siendo la demanda global también creciente en un 2,7% cada año. Siendo el restante 2% de LAB producido empleado en herbicidas destinados al sector agrícola, así como de emulsiones de polimerización, agentes humectantes de textiles y disolventes de pinturas y tintas destinados al sector industrial [7].

A nivel mundial, la capacidad global de producción de LAB en 2.010 fue estimada en 3,62 millones de toneladas métricas (MMT) y se prevé alcanzar para 2.015 los 3,95 MMT.

Las principales compañías clave actualmente proveedoras de LAS son el grupo CEPSA, Jintung Petrochemical Corporation Limited., PetroChina Fushun Petrochemical Company, Reliance Industries Limited. y Sasol Limited [8].

El precio por tonelada de LAB es de 1.405 euros y el precio de LAS es de 1.460 euros para septiembre de 2.014 [5].

1.3 Descripción general de la planta de producción de CEPESA.

El grupo CEPESA, es uno de los productores clave de LAS, a nivel mundial, por su gran infraestructura y disponibilidad de materia prima, ya que solo en su planta ubicada en Puente Mayorga (San Roque, España) presenta una producción anual de LAB de 220.000 toneladas métricas (MT) y de LAS de 80.000 MT.

Dicha planta, recibe las materias primas que son queroseno, benceno, hidrógeno y azufre, directamente desde la Refinería Gibraltar de CEPESA, con la que está totalmente integrada. A la cual devolverá como subproductos jet fuel, naftas e hidrógeno (Véase Figura 1.6) [9].

1.3.1 Etapas del proceso de obtención de LAS.

Las etapas presentes en el proceso dedicado a la obtención de LAS realizadas por el grupo CEPESA son 5: Unifining, Molex, Pacol, Alquilación y Sulfonación (Figura 1.6).

1.3.1.1 Unifining.

Proceso de hidrodesulfuración en el que se eliminan tanto el azufre como los hidrocarburos ligeros que contenga la corriente de queroseno.

En ésta etapa, se puede diferenciar una fase de reacción en la que se opera con una relación hidrógeno-hidrocarburos de 160, una presión de 53,23 atm y una temperatura de 310°C. Así como una fase de fraccionamiento, en la que mediante varios equipos de separación se logra dividir los gases ligeros de la corriente.

1.3.1.2 Molex.

Proceso de adsorción sobre tamices moleculares en el que se pretende separar n-parafinas y realizar una destilación en cortes.

En ésta etapa, se diferencia una fase de adsorción en la que se logra discriminar entre parafinas lineales y ramificadas mediante equipos especiales (tamices moleculares) que se basan en la rotación y disposición de sus cámaras operando a una presión de 19,36 atm y una temperatura de 177°C.

Éste proceso, va seguido de una fase de fraccionamiento en la que mediante un tren de torres de rectificación las parafinas lineales se dividen en tres que son las siguientes: parafinas menores a n-decano (n-C10), entre n-C10 y n-tridecano (n-C13) y mayores a n-tetradecano (n-C14), sin embargo, pueden realizarse varios tipos de cortes entre los distintos tipos de parafinas dependiendo de la demanda.

1.3.1.3 Pacol.

Proceso de deshidrogenación en el que se realiza la conversión de n-parafinas en mono-olefinas.

En ésta etapa, los equipos en los que se dan las reacciones trabajan con la asistencia de un catalizador altamente selectivo, una relación hidrógeno-hidrocarburos de 4, una presión de 1,55 atm y una temperatura entre 470°C y 485°C, produciendo paralelamente di-olefinas.

Las di-olefinas producidas son convertidas a mono-olefinas en una unidad adicional gracias a una hidrogenación selectiva en fase líquida mediante un catalizador cuyo componente estructural es el níquel.

1.3.1.4 Alquilación.

Proceso en el que se lleva a cabo la alquilación de las mono-olefinas para la obtención de LAB.

En ésta etapa, el ácido fluorhídrico (HF) es el catalizador para lograr la alquilación de benceno (C₆H₆) con parafinas lineales mediante la reacción de

Friedel-Crafts. Los reactores operan a una presión de 6,77 atm y una temperatura de 50°C a 60°C en fase líquida.

Puesto que la reacción real no alcanza un 100% de conversión (~90%), es necesario un fraccionamiento del producto obtenido. Por un lado se encuentran LAB formado, y por otro el catalizador líquido HF, el reactivo sobrante C_6H_6 , parafinas de reciclo o n-parafinas, y compuestos de elevada masa molecular entre los que se encuentra el aquilato pesado.

1.3.1.5 Sulfonación.

Proceso en el que se logra la unión de un grupo sulfónico en la posición para- menos impedida en la molécula de LAB mediante una reacción exotérmica de $169.870 \text{ kJ}\cdot\text{kmol}^{-1}$.

En ésta etapa adicionalmente, se lleva a cabo la neutralización del ácido sulfónico formado con hidróxido de sodio, NaOH (Véase apartado 1.2.2).

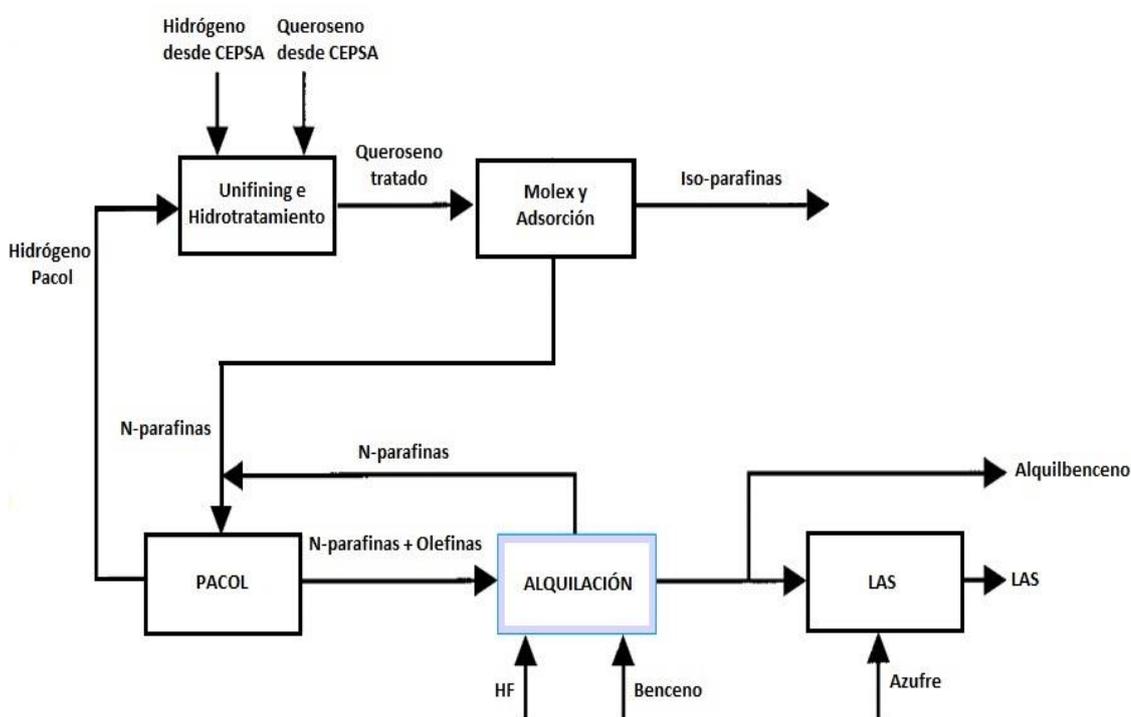


Figura 1.6. Diagrama de obtención de LAS.

1.4 Aplicaciones de LAS.

El compuesto LAS debido a su escaso impacto sobre el medio ambiente y presentar una alta propiedad detergente, es utilizado en la fabricación de todo tipo de formulaciones detergentes para el mercado comercial [10].

Aproximadamente un 80% de su producción es enfocada a los detergentes del hogar presentándose como:

Productos de lavandería en forma de polvos, líquidos y tabletas compuestos con un 5-25% de LAS.

- Productos de lavavajillas en forma de líquidos con un 1-25% de este compuesto.
- Lejías con un 0,10-0,15% de LAS.
- Suavizantes de tejidos con un 0,10-0,15% de LAS.
- Productos de limpieza de superficies con un 0,1-10% de LAS.
- Productos de aseo personal en forma de barras, tabletas y geles con un 1-5%.

El restante 20% de la producción de LAS es utilizada en productos de limpieza para industrias.

- Productos destinados al tratamiento de textiles con un 5-25% de LAS en su composición.
- Productos de limpieza de superficies con un 1-10% de LAS.
- Desinfectantes líquidos con un 5-10% del compuesto.
- Así como en procesos industriales como emulsionantes, y para la formulación de agentes protectores de cultivos y productos de limpieza en general con un 1-30% de LAS en su composición.

1.5 Requisitos de diseño.

- La columna debe ser capaz de operar con $220.350 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ de alimentación que se compone tanto de ácido fluorhídrico, como de diferentes hidrocarburos (n-C10 a n-C14+), alquilbencenos y benceno no reaccionado, con una composición del 11,98% en peso de benceno.
- Debe obtenerse una corriente de fondo de columna que no sobrepase de 50 partes por millón (ppm) de benceno.

- El producto condensado debe presentar una elevada pureza de benceno para su utilización como reactivo en el proceso de producción de LAB.
- El fluido de servicio debe ser eficaz, pero a su vez económico y respetuoso con el medio ambiente.

1.6 Unidad de Recuperación de Benceno.

La unidad de diseño a la que el presente proyecto se dedica, se sitúa en la fase de fraccionamiento de la etapa de Alquilación en la producción de LAS. Ésta torre sucede inmediatamente a la unidad que separa el ácido fluorhídrico de la corriente, presentándose como torre inicial de la línea de fraccionamiento comprendida por tres torres de rectificación en serie (Véase Figura 1.7).

El objeto de dicha columna (T-01) es la recuperación del benceno y del resto de ácido fluorhídrico contenidos en el fluido de alimentación que presenta un caudal másico de $220.350 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$, de forma que el producto obtenido por fondo de columna no sobrepase 50 ppm de benceno (Véase figura 1.8).

La corriente mencionada anteriormente, es impulsada desde la salida de la Columna de ácido fluorhídrico (Stripper de HF)² mediante una bomba (P-01 A/B) e introducida al plato número 7 de la columna de separación (T-01) como líquido saturado a una presión de 2,47 atm y a su temperatura de ebullición que tiene un valor de 172,28°C. Ésta, se constituye por los 13 compuestos mostrados en la Tabla 1.2 en la que se incluyen datos cuantitativos de contribución a la corriente.

Tabla 1.2. Corriente de alimentación de la columna.

Compuesto	Caudal másico ($\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$)	Porcentaje en peso (%)
Ácido fluorhídrico (HF)	22	0,01
Benceno (C_6H_6)	26.400	11,98
n-decano (n-C10)	22.836	10,36
n-undecano (n-C11)	49.896	22,64
n-dodecano (n-C12)	50.424	22,88
n-tridecano (n-C13)	43.164	19,59
n-tetradecano (n-C14)	858	0,39
n-decil-benceno (n-Decil-BZ)	3.322	1,51
n-undecil-benceno (n-Undecil-BZ)	8.426	3,82
n-dodecil-benceno (n-Dodecil-BZ)	7.920	3,59
n-tridecil-benceno (n-Tridecil-BZ)	5.632	2,56
n-tetradecil-benceno (n-Tetradecil-BZ)	1.100	0,50
Alquilato pesado	350	0,16

² La Columna de ácido fluorhídrico no es analizada en el presente proyecto.

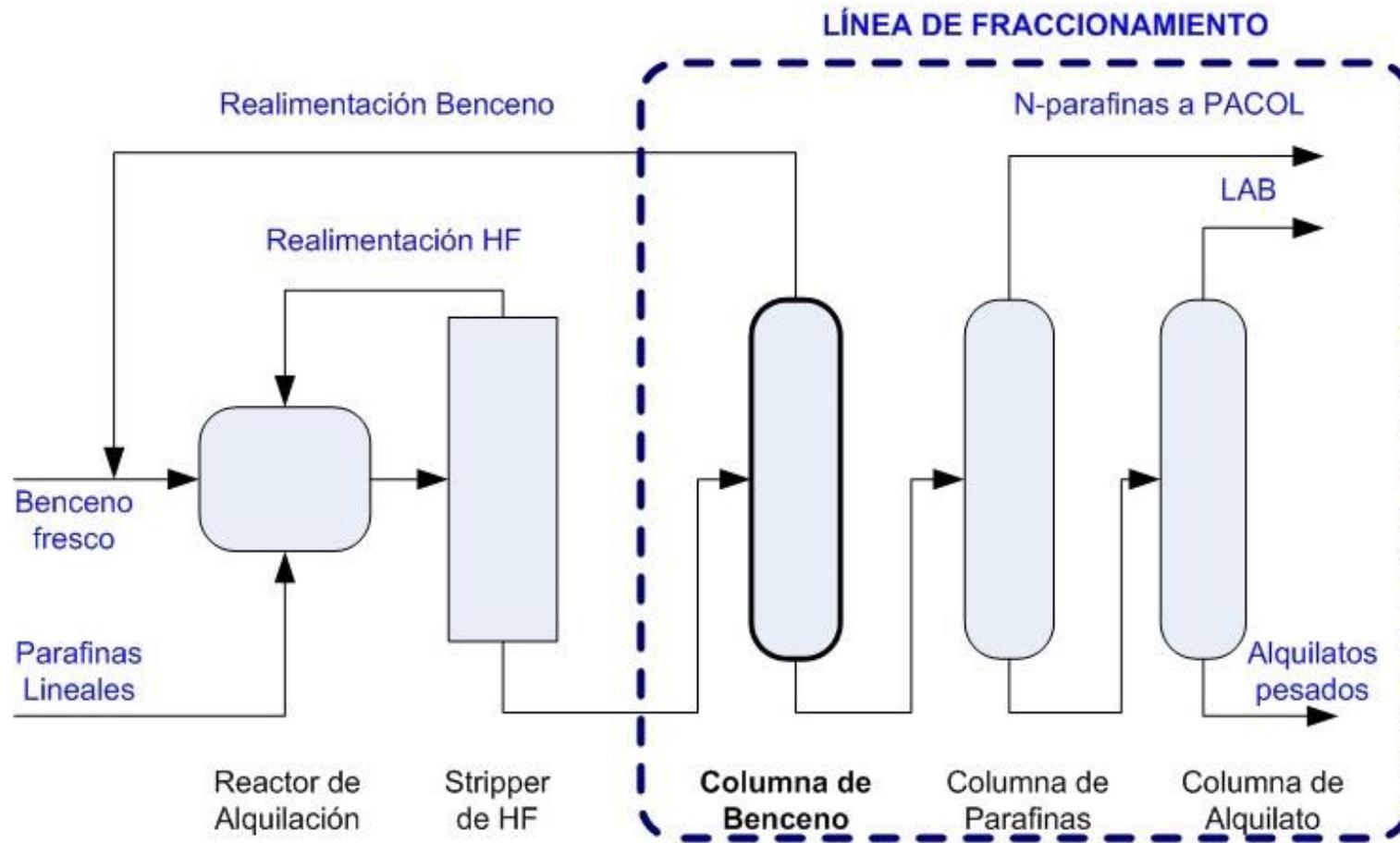


Figura 1.7. Diagrama de la Línea de Fraccionamiento.

Es oportuno mencionar que la columna se enumera empezando por la cabeza, y que al requerir de 30 platos totales para efectuar la separación deseada, se cuentan con 6 platos en zona de rectificación y 24 en zona de agotamiento.

En la zona de rectificación el vapor ascendente se enriquece de los componentes más volátiles de la corriente líquida, es decir tanto de HF como de C_6H_6 , y en la zona de agotamiento el líquido descendente se empobrece de éstos e incrementa la proporción de componentes más pesados desde el n-C10 hasta los alquilatos pesados.

El producto obtenido en cabeza es un vapor de caudal másico igual a $40.632 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ a una temperatura de $113,51^\circ\text{C}$ y una presión de 2,43 atm, con una composición en peso del 99,06% de C_6H_6 , 0,08% de HF y 0,86% de n-C10; y es luego condensado en su totalidad mediante un intercambiador de calor de tipo aerorrefrigerado (AC-01) para bifurcarse en dos corrientes, mediante la asistencia del acumulador de reflujo (TK-01), con un valor de temperatura de $106,03^\circ\text{C}$ y una presión de 2,09 atm.

La primera de las corrientes recibe el nombre de destilado, que ofrece un caudal total de $26.642 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ y se trata del fluido que **realimenta** al reactor de producción de LAB (Reactor de Alquilación)³.

La segunda corriente también impulsada por una bomba (P-02 A/B), recibe el nombre de **reflujo**, ofreciendo un caudal de $13.989 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$, y se trata del fluido que retorna a la columna (T-01) para enriquecer al vapor, con el que se pone nuevamente en contacto, de los componentes más volátiles. La **relación de reflujo** externa con la que la columna opera es de 0,525 que resulta de la multiplicación de 1,3 veces el reflujo mínimo.

El producto obtenido en fondo de columna de caudal másico igual a $272.821 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ con una temperatura de $245,86^\circ\text{C}$ y una presión de 2,61 atm, se transporta en dirección al rehervidor (E-01) y crea dos corrientes.

Por un lado, se origina una corriente líquida de salida, denominada residuo, de caudal másico igual a $193.708 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ a una temperatura de $253,21^\circ\text{C}$, una presión de 2,61 atm y con una composición de 41 ppm de C_6H_6 a razón de $8 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$, cumpliendo con los requisitos de separación, y es transferida

³ El Reactor de Alquilación no es analizado en el presente proyecto.

hacia la Columna de Parafinas⁴ para su posterior tratamiento, siendo el porcentaje en peso de sus demás componentes: 11,67% de n-C10, 25,76% de n-C11, 26,03% de n-C12, 22,28% de n-C13, 0,44% de n-C14, 1,71% de n-Decil-BZ, 4,35% de n-Undecil-BZ, 4,09% de n-Dodecil-BZ, 2,91% de n-Tridecil-BZ, 0,57% de n-Tetradecil-BZ y 0,18% de alquilato pesado.

Y por otro lado, el rehervidor (E-01) origina una corriente de fluido en fase vapor, con las mismas condiciones de presión y temperatura que el líquido producido, pero con un caudal másico igual a $83.313 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ que retornará a la columna (T-01), suministrando la corriente de vapor esencial del proceso.

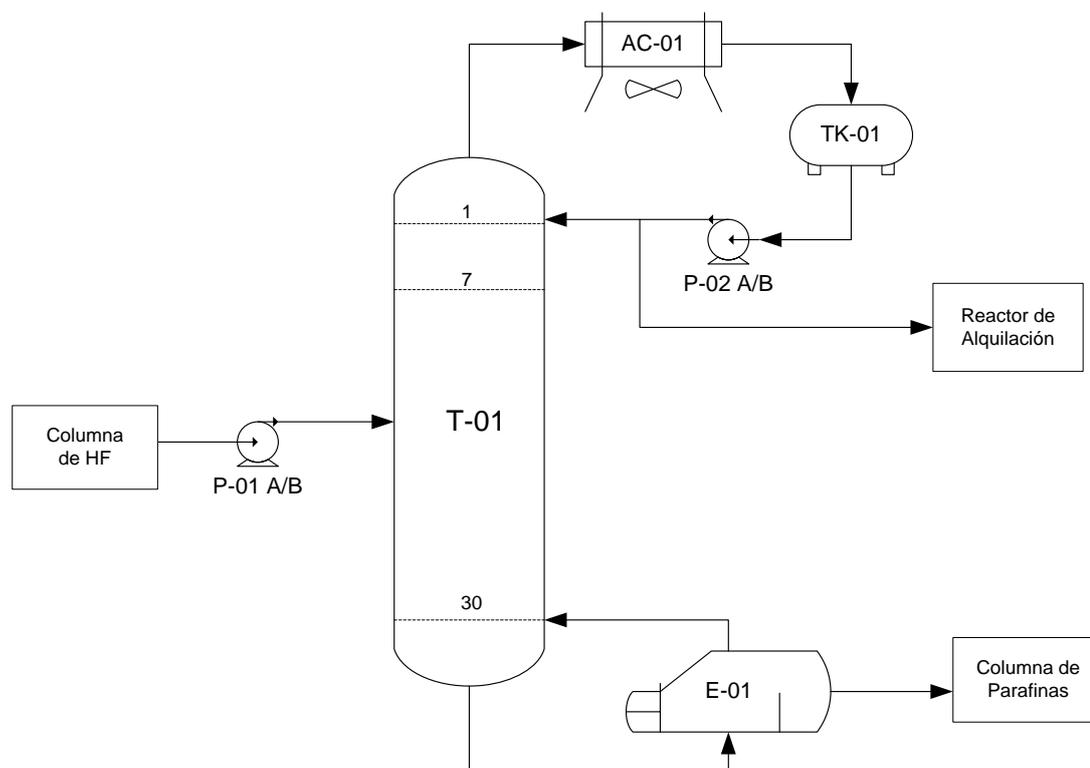


Figura 1.8. Esquema de la planta de Recuperación de Benceno

⁴ La Columna de Parafinas no es examinada en el presente proyecto, su estudio es desarrollado en: Rediseño de una línea de fraccionamiento de alquilación de parafinas. Parte II: Torre de Rectificación de Parafinas.

1.7 Localización de la planta.

Ya que se trata del rediseño de la línea de fraccionamiento de alquilación de parafinas, la planta se localiza en el lugar en el que se encuentran las torres de separación destinadas para la producción de LAS de la Refinería del grupo CEPSA.

Dicha refinería se encuentra situada al sur de España, municipio de San Roque (Cádiz), barrio de Puente Mayorga.

El emplazamiento cuenta tanto con vías importantes de acceso terrestre (Autovía A-381 y A7) como marítimo (puerto y monoboya situada en la bahía de Algeciras), facilitando el transporte de reactivos como de productos para la fabricación de LAS y su comercialización.

Adicionalmente, el clima es ideal, pues la temperatura media anual es de 25°C y una velocidad del viento en torno a 50 km·h⁻¹ con unas ráfagas de valor máximo de 166 km·h⁻¹ [11,12]. Datos que son favorables en cuanto al diseño de los equipos utilizados y que se explican en cada apartado.



Figura 1.9. Localización de la planta de Recuperación de Benceno [Google Maps].

CAPÍTULO 2: Justificación y objetivo del proyecto.

2.1 Justificación.

Para satisfacer la creciente demanda de los tensioactivos en cuya estructura se encuentra un determinado porcentaje de sulfonato alquilbenceno lineal (LAS), es necesario disponer de alquilbenceno lineal (LAB), compuesto de partida en la producción industrial de los mismos.

La reacción de alquilación de parafinas para la síntesis de estos productos biodegradables, requiere tanto de cadenas carbonadas lineales (parafinas lineales) como de benceno para su obtención. Sin embargo, como productos secundarios de reacción se obtienen compuestos no deseados de elevada masa molecular entre los que se encuentra el alquilato pesado, de interés paralelo como base de múltiples aceites de uso industrial.

Como consecuencia, surge la necesidad de realizar la separación tanto de reactivos residuales, como de productos principales y secundarios formados.

2.2 Objetivo.

La finalidad del presente proyecto es rediseñar la primera etapa de reformado de la línea de fraccionamiento de dicho proceso, basándose en la sustitución de dos unidades de rectificación de benceno por una sola columna que realice la recuperación del benceno destinado a la síntesis de LAB.

La torre de rectificación de benceno se presentará formando parte de la línea de fraccionamiento como torre inicial de operación (primera columna de tres dispuestas en serie), consiguiendo un ahorro tanto económico al reducir material y espacio utilizado, como energético al operar un equipo más eficaz en vez de dos, y medio ambiental al reutilizar reactivos y emplear fluidos de servicio respetuosos con el medio.

La columna debe ser capaz de operar con $220.350 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ de alimentación que se compone tanto de ácido fluorhídrico, como de diferentes hidrocarburos (n-C10 a n-C14+), alquilbencenos y benceno no reaccionado, con una composición del 11,98 % en peso de benceno, de forma que sea posible obtener

una corriente de fondo de columna que no exceda de 50 ppm de este compuesto.

Para el adecuado funcionamiento de la planta, es necesario abarcar adicionalmente en el Proyecto Fin de Carrera el diseño de equipos auxiliares como intercambiadores de calor, recipientes de almacenamiento, bombas, tuberías y correspondientes accesorios.

CAPÍTULO 3: Antecedentes.

Los antecedentes o la viabilidad del proyecto se basan en el estudio de tres aspectos, uno técnico, uno económico y uno legal. La investigación minuciosa de cada uno de estos tres aspectos, ha conducido a la elección del material más adecuado con características ecológicas de excelencia evitando un daño al medio ambiente tanto en su consumo de productos como en la emisión y eliminación de residuos. Así como a un ahorro en el consumo de los recursos energéticos y por tanto un ahorro económico en el proceso, siguiendo las normas de diseño, seguridad y medio ambiente.

3.1 Viabilidad técnica.

La viabilidad técnica, se refiere al análisis ante la elección del equipo utilizado y proceso seguido, con la finalidad de determinar si es posible llevar a cabo el proceso satisfactoriamente y en condiciones de seguridad con la tecnología disponible.

Las operaciones semejantes por medio de las cuales se puede realizar una separación de componentes de un fluido de gran caudal, son las basados en la interfase sólido-líquido, líquido-líquido, gas-líquido (absorción, destilación simple y discontinua, y destilación con rectificación) e interfase artificial (membranas) [13,14].

3.1.1 Operaciones de separación.

- Extracción sólido-líquido, líquido-líquido y absorción.

En estos tipos de separación de componentes de una alimentación sólida, líquida o gas, se requiere de un líquido o un gas auxiliar de carácter selectivo (disolvente) para realizar dicho proceso (Ver Figura 3.1).

De hecho, actualmente no solo no se dispone de fluidos selectivos para la separación que se quiere realizar en el presente proyecto, sino que además se necesita una pureza determinada de las corrientes resultantes y al añadir un fluido externo estos productos finales alterarían la pureza demandada o

requerirían de una posterior recuperación del fluido de servicio mediante un equipo adicional, el cual elevaría los costos de producción.

Como consecuencia, estas operaciones no son factibles de desarrollarse en el presente para la recuperación de benceno.

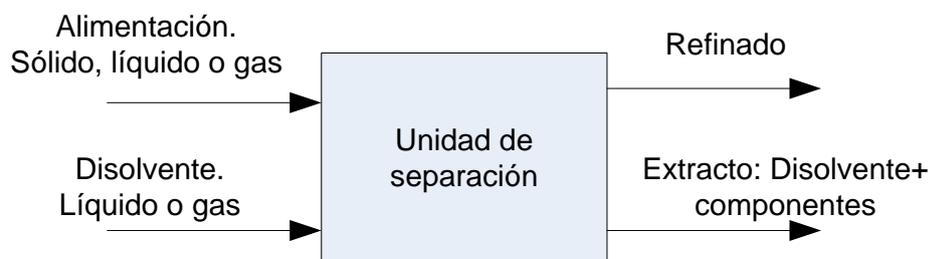


Figura 3.1. Extracción de componentes.

- Membranas.

Este tipo de separación se basa en la utilización de una membrana por medio de la cual los componentes del fluido se separan en situaciones en las que las diferencias entre las propiedades físicas de los componentes a separar son muy pequeñas.

El fluido que vamos a utilizar como alimentación en el presente proyecto tiene la característica de que al someterlo a una temperatura elevada sufre una separación debido a la diferencia de puntos de ebullición de sus componentes. Por lo que el uso de membranas en este caso, no es justificado.

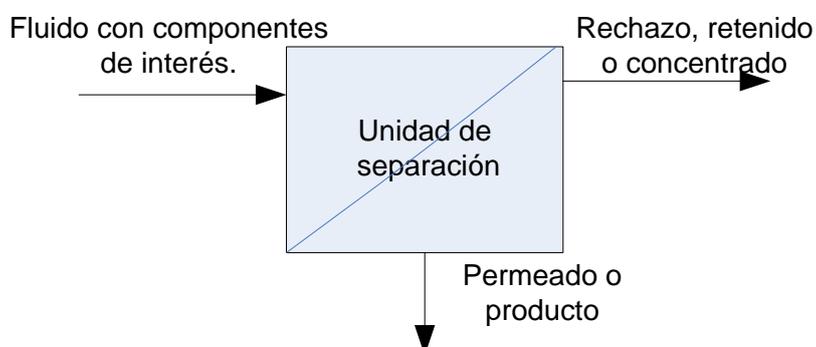


Figura 3.2. Separación de componentes por membranas.

- Destilación simple.

La destilación es una operación de separación controlada por la transferencia de materia en la que una mezcla líquida se vaporiza parcialmente, de forma que se obtienen dos corrientes de distinta composición debido a la diferencia de volatilidad de los compuestos. Por una parte se obtiene un vapor enriquecido de los componentes más volátiles, y por otra, un líquido pobre en éstos componentes.

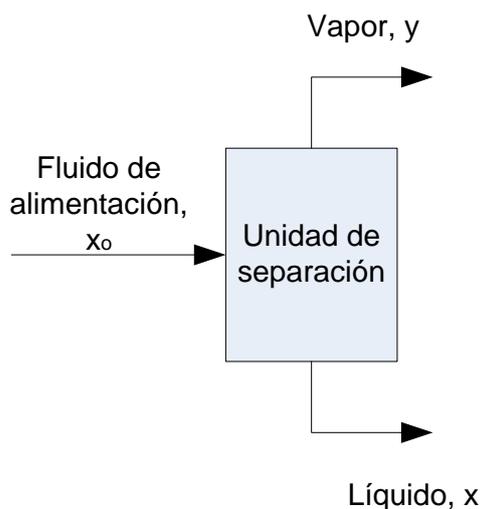


Figura 3.3. Destilación simple. x_0 , y , x : *Fracción molar del componente de interés en cada corriente..*

La destilación simple alcanza un determinado rendimiento, por lo que se necesitarían varias etapas para garantizar la separación requerida y una posterior recuperación de fluidos en cada una de ellas para evitar desperdicio tanto de fluido de alimentación como de producto.

Por estas razones tampoco se trata de un proceso ideal para alcanzar los objetivos buscados.

- Destilación con reflujo.

El proceso se basa en poner en contacto una corriente líquida con una corriente de vapor, que se producen a partir del mismo fluido, a través de direcciones adecuadas para conseguir un determinado grado de separación. Se trata de varias etapas de destilación simple pero en un solo equipo, en el que el

vapor producido se convierte en líquido mediante un condensador y retorna a la columna como reflujo garantizando la existencia de la corriente líquida, así como el enriquecimiento del vapor en los componentes más volátiles. A su vez, el líquido que desciende se convierte en vapor mediante un rehervidor o calderín, empobreciéndose en éstos componentes.

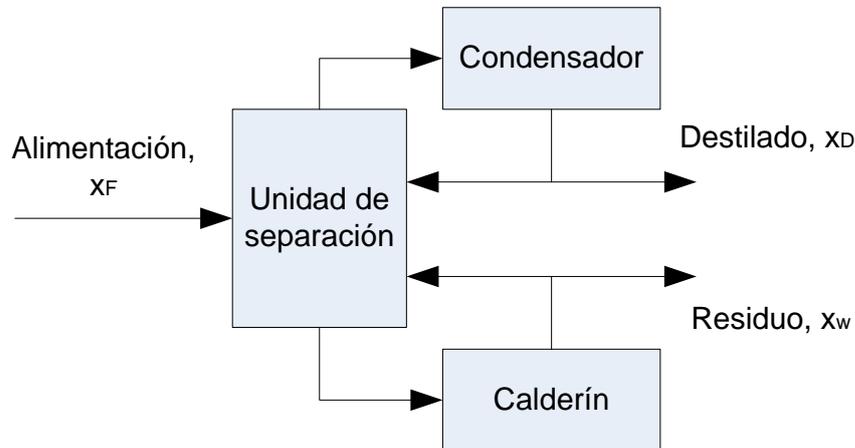


Figura 3.4. Destilación con reflujo. x_F , x_D , x_w : Fracción molar del componente de interés en cada corriente.

Para realizar este procedimiento, puede emplearse una columna de relleno o una columna de platos. La primera sería recomendable ya que cumple todas las expectativas de separación, sin embargo, para un caudal elevado de alimentación requiere mayores dimensiones y esto no es posible, pues las columnas no deben ser muy altas por el peso que ejerce el relleno, o excesivamente anchas por los canales de flujos preferenciales que se forman, incluso, las de platos son más fáciles de limpiar, y tienen un acceso más fácil durante las inspecciones de la torre.

3.1.2 Selección de la operación.

Luego de analizar los diferentes procedimientos de separación posibles, el método seleccionado es el de destilación con reflujo, puesto que permite trabajar con un gran caudal de fluido de admisión y mediante el cual se obtiene una separación de alto rendimiento. Dicho proceso se describe detalladamente en el Capítulo 4. El equipo empleado es una torre de platos, no eligiendo la torre de relleno por las razones ya expuestas anteriormente.

3.2 Viabilidad económica.

Mediante el estudio de la viabilidad económica del proyecto se conoce si es mayor o menor el coste que el beneficio indirecto obtenido al llevar a cabo el proceso de recuperación de benceno (Documento 6: Presupuesto).

Al tratarse de una etapa intermedia en la producción de LAS, no se tienen ingresos directos de venta de productos, por lo que no es posible determinar los beneficios directos, valor actual neto relacionado con la amortización del proyecto o la tasa interna de recuperación.

Sin embargo, debido a que el proyecto tiene la finalidad de sustituir dos columnas de separación por una única columna de recuperación, se determina el ahorro que significa en material, operación, mantenimiento y costes mensuales.

Y finalmente se cuantifica el ahorro que supone la recuperación de benceno en el proceso de obtención de LAS.

3.2.1. Inversión total de capital.

La inversión total de capital requerida para la unidad está formada por la inversión de capital fijo (ICF), el capital de trabajo (CAPT) y el coste de puesta en marcha (CPM) [15].

- ICF: Costo referido a los equipos, personal y servicios de construcción de la unidad. Alcanza un valor de 4.871.017 €.
- CAPT: Costo requerido para operar la planta incluyendo un mes de suministros, gastos de operación, salarios y pago de impuestos. Alcanza un valor de 1.353.060 €.
- CPM: Costo que engloba las modificaciones del proceso necesarias para cumplir con las especificaciones del diseño, mano de obra y pérdidas de producción mientras se pone en operación el proceso. Alcanza un valor de 541.224 €.

Resultando un total de inversión de 6.765.302 €.

3.2.2. Revalorización de productos.

La revalorización se refiere al incremento del precio de los productos obtenidos debido a la pureza que alcanzan mediante el proceso al que se someten en la unidad.

Por una parte, el benceno ingresa a la columna a baja pureza (11,98%) y egresa a una pureza del 99,06%, con lo cual, el precio final es más elevado, revalorizado en 185.933.802 € por año.

Por otra parte, el LAB ingresa a columna formando parte de la corriente al 11,48% y se obtiene una pureza del 13,06% revalorizado en 4.492.363 € por año.

La adición de ambos montos, define la revalorización de productos con un valor total de 190.426.164 € por año.

3.2.3. Ahorro económico.

El ahorro de materia prima que supone la recuperación y realimentación de benceno al reactor de alquilación, es decir, al proceso de obtención de LAS, alcanza el valor de 211.524.507 € por año.

Por otra parte se obtiene una disminución de gastos al sustituir las dos torres por la unidad diseñada en:

- Material: 277.431 €.
- Operaciones y mantenimiento: 5.748 € por mes.
- Costes totales, englobando suministros de energía, vapor, personal necesario y otros gastos: 213.571 € por mes.

3.3 Viabilidad legal.

En este apartado se informa sobre la normativa aplicada en el diseño de la unidad de Recuperación de Benceno, así como de la legislación vigente aplicada a éste.

3.3.1 Normativa aplicada.

La normativa seguida en el diseño de las unidades de proceso y equipos son:

- Código ASME (American Society of Mechanical Engineers), Sección VIII-División 1. Boiler and Pressure Vessel Code (2.004).
- Código ASME B31.3. Process Piping (2.004).
- Normas API (American Petroleum Institute) 610. Centrifugal Pumps for Petroleum, Petrochemical and Natural Gas Industries (2.003).
- Normas API 660. Shell and Tube Heat Exchangers for General Refinery Services (2.001).
- Normas API 661. Air Cooled Heat Exchangers for General Refinery Services (1.992).
- Normas TEMA (Tubular Exchanger Manufacturers Association).
- Normas ANSI (American National Standards Institute).
- Normas ASTM (American Society for Testing Materials)
- Reglamento Español de Recipientes a Presión, capítulo IV.
- Normas ISO (International Organization for Standardization).
- Normas UNE (Una Norma Española).

3.3.2 Legislación aplicada.

- **Ley 31/1995**, de 8 de noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales.
- **Real Decreto 374/2001**, de 6 de abril, sobre la protección de la salud y seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con los agentes químicos durante el trabajo.
- **Real Decreto 1124/2000**, de 16 de junio, por el que se modifica el Real Decreto 665/1992, de 12 de mayo, sobre la protección de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición a agentes cancerígenos durante el trabajo (B.O.E 145 de 17 de junio de 2000).
- **Real Decreto 1299/2006**, de 10 de noviembre, por el que se aprueba el cuadro de enfermedades profesionales en el sistema de la Seguridad Social y se establecen criterios para su notificación y registro (B.O.E número 302 de 19 de diciembre).
- **Real Decreto 681/2003**, de 12 de junio, sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores expuestos a los riesgos derivados de atmósferas explosivas en el lugar de trabajo.

- **Real Decreto de 286/2006**, de 10 de marzo, sobre la protección de la salud y seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición al ruido.
- **Reglamento (CE) 1907/2006**, del Parlamento Europeo y el Consejo, de 18 de diciembre, relativo al registro, la evaluación, la autorización y la restricción de las sustancias y preparados químicos (REACH). Última modificación: Anexo XIV, por reglamento 895/2014, de 14 de agosto (Ref. DOUE-L-2014-81791).
- **Real Decreto 1254/1999**, de 16 de julio, por el que se aprueban las medidas de control de los riesgos inherentes a los accidentes. Última modificación: Anexo I, por Orden PRE/1206/2014, de 9 de julio (Ref. BOE-A-2014-7373).
- **Real Decreto 773/1997**, de 30 de mayo, sobre disposiciones mínimas sobre utilización por los trabajadores de equipos de protección individual.
- **Real Decreto 485/1997**, de 14 de abril, sobre disposiciones mínimas en materia de señalización de seguridad y salud en los lugares de trabajo.
- **Real Decreto 1942/1993**, de 5 de noviembre, por el que se aprueba el Reglamento de instalaciones de protección contra incendios. Se añaden las disposiciones adicionales 2 a 5, por Real Decreto 560/2010, de 7 de mayo (Ref. BOE-A-2010-8190).
- **Real Decreto 2060/2008**, de 12 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento de equipos a presión y sus instrucciones técnicas complementarias. Se añade la disposición adicional 6, por Real Decreto 1388/2011, de 14 de octubre (Ref. BOE-A-2011-16174).
- **Real Decreto 2177/2004**, de 12 de noviembre, por el que se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud para la utilización por los trabajadores de los equipos de trabajo, en materia de trabajos temporales en altura.
- **Real Decreto 614/2001**, de 8 de junio, sobre disposiciones mínimas para la protección de la seguridad y salud de los trabajadores frente a riesgo eléctrico.
- **Real Decreto 842/2002**, de 2 de agosto, por el que se aprueba el Reglamento electrotécnico para baja tensión. Se añaden las disposiciones adicionales 1 a 4, por Real Decreto 560/2010, de 7 de mayo (Ref. BOE-A-2010-8190).
- **Real Decreto 223/2008**, de 15 de febrero, por el que se aprueban el Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en líneas eléctricas de alta tensión y sus instrucciones técnicas complementarias.

Se añaden las disposiciones adicionales 1 a 4, por Real Decreto 560/2010, de 7 de mayo (Ref. BOE-A-2010-8190).

- **Real Decreto 2267/2004**, de 3 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento de seguridad contra incendios en establecimientos industriales. Se modifican los artículos 4.2 y 5, por Real Decreto 560/2010, de 7 de mayo (Ref. BOE-A-2010-8190).
- **Real Decreto 400/1996**, de 1 de marzo, sobre aparatos y sistemas de protección para uso en atmósferas potencialmente explosivas.
- **Real Decreto 379/2001**, de 6 de abril, por el que se aprueba el Reglamento de almacenamiento de productos químicos y sus instrucciones técnicas complementarias. Se añade la MIE APQ-9, por Real Decreto 105/2010, de 5 de febrero (Ref. BOE-A-2010-4510).
- **Ley 11/2014**, de 3 de julio, por la que se modifica la ley 26/2007, de 23 de octubre, de responsabilidad medioambiental.
- **Ley 21/2013**, de 9 de diciembre, de evaluación ambiental.

CAPÍTULO 4: Análisis de soluciones y resultados de la Unidad de Recuperación de Benceno.

4.1 Introducción.

Este capítulo centra su atención exclusivamente en la columna de destilación con reflujo para la separación de componentes.

La destilación es una de las operaciones que se desarrolla habitualmente en la naturaleza, de hecho nuestro planeta, se trata de un sistema en el que la destilación es un fenómeno físico fundamental. La evaporación del agua, su difusión en forma de vapor en la atmósfera, la condensación del vapor en gotas, la lluvia, el granizo o la nieve, y su retorno a la superficie de la Tierra forman las etapas del proceso natural de la destilación.

El desarrollo del procedimiento de separación de componentes del agua de la superficie terrestre, se realiza en el sistema binario agua ligera (H_2O)-agua pesada (HDO), en el que intervienen las moléculas hidrógeno-oxígeno e hidrógeno-deuterio (2H , isótopo de hidrógeno con un neutrón). Ahora bien, si se consideran los isótopos de oxígeno, principalmente (^{18}O), el agua forma un sistema multicomponente de destilación de la Tierra en el que se incluyen océanos, mares, lagos y ríos, y en el que intervienen $0,5 \cdot 10^{15} m^3$ de agua. La energía térmica necesaria, unos 400.000 TW (teravatios) aportada fundamentalmente por la radiación solar, separa los elementos pesados a temperatura ambiente retornándolos a la superficie y enviando a la atmósfera los ligeros.

Hasta donde se sabe, el proceso de la destilación fue inventado por los alquimistas egipcios que además de conseguir agua para beber mediante su almacenamiento de agua de lluvia, emplearon gran cantidad de aparatos diseñados con la finalidad de producir aceites (elaborados por el calentamiento del alquitrán) y vaporizar sustancias volátiles tratando metales con ellas (obtención de mercurio a partir de cinabrio o mineral de sulfuro de mercurio).

Esto constituye probablemente la base para los procesos más complejos, pues las primeras referencias escritas sobre la destilación y el equipo para efectuarlas, datan del año 1.611 para la elaboración de bebidas y medicinas [16].

Éstas técnicas son actualmente utilizados en todo el mundo para la fabricación de diferentes productos desde perfumes, aceites esenciales, medicinas, bebidas alcohólicas y como se demuestra en el presente proyecto materias primas para la obtención de detergentes.

A finales del siglo pasado, Sorel (1.893) introdujo las primeras discusiones matemáticas cuantitativas aplicadas al diseño de aparatos de fraccionamiento de las que se tiene registro, con las que asentaron las relaciones básicas de los métodos modernos de cálculo, es más, la mayoría de los métodos empleados actualmente son extensiones y modificaciones de aquellos métodos originales. [17]

Actualmente se cuenta con distintos tipos de destilación dependiendo de cómo se lleve a cabo la operación, siendo las básicas la destilación simple y la rectificación, de las cuales, destaca la última por su importancia económica y por ser la más utilizada.

4.2 Justificación.

La separación de componentes de una mezcla líquida requiere de un sistema adecuado, en cuanto a dimensiones y forma, que permita el contacto entre el vapor y el líquido producidos por el rehervidor y el condensador, respectivamente, proporcionando un área elevada y un recorrido específico para que cada corriente realice la transferencia de materia con la otra y alcance el grado de separación requerido.

4.3 Normativa de diseño.

El diseño de la columna sigue las especificaciones establecidas de normas mínimas de construcción de la obra "Boiler and Pressure Vessels Code" perteneciente al código ASME Sección VIII División I, así como al Reglamento Español de Recipientes a Presión Capítulo IV, las normas ASTM y ANSI.

4.4 Método de resolución.

Existen diversos métodos para el cálculo de la rectificación, unos se tratan de métodos gráficos como el de McCabe-Thiele pero que resuelven el problema de forma aproximada, y los métodos de cálculo que pueden ser etapa a etapa como el de Lewis-Matheson, de aproximaciones sucesivas como el de Thiele-Geddes y los métodos de grupo como el FUG (Fenske, Underwood, Gilliland).

Debido a que la corriente de alimentación cuenta con 13 componentes y que se va a realizar un diseño de la unidad de separación, el método de resolución más adecuado es el FUG.

Método que proporciona una secuencia de resolución para la determinación del número mínimo de platos teóricos (Fenske), la relación de reflujo mínima y el cálculo de la relación de reflujo (Underwood), así como el número de platos teóricos (Gilliland).

Adicionalmente, para la obtención de las propiedades de los fluidos y la verificación de varios de los cálculos realizados, se ha empleado el programa informático de simulación Aspen HYSYS Versión 8.0.

4.5 Caracterización de las corrientes.

Las corrientes de entrada (alimentación) como las de salida (producto de cabeza o destilado y de fondo o residuo) de la columna de rectificación presentan las siguientes características:

Tabla 4.1. Características de las corrientes de la Columna de Benceno.

Magnitud	Alimentación	Destilado	Residuo
Temperatura (°C)	172,28	106,03	253,21
Presión (atm)	2,47	2,09	2,61
Densidad (kg·m ⁻³)*	652,00	779,55	564,22
Viscosidad (kg·m ⁻¹ ·s ⁻¹)*	27,38·10 ⁻⁵	23,91·10 ⁻⁵	16,29·10 ⁻⁵
Peso molecular (kg·mol ⁻¹)	150,54	78,22	172,46
Caudal molar (kmol·h ⁻¹)	1.464	341	1.123
Caudal másico (kg·h ⁻¹)	220.350	26.642	193.708
Caudal volumétrico (m ³ ·h ⁻¹)	338	34	343

(*) Magnitudes obtenidas mediante el simulador Aspen HYSYS V8.0.

Así mismo, los caudales másicos y las composiciones en porcentaje en peso de las corrientes se muestran en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2. Composición de las corrientes de Columna de Benceno.

Compuesto	Alimentación		Destilado		Residuo	
	(kg·h ⁻¹)	(%)	(kg·h ⁻¹)	(%)	(kg·h ⁻¹)	(%)
HF	22	0,01	22	0,08	-	-
C ₆ H ₆	26.400	11,98	26.392	99,06	8	0,00*
n-C10	22.836	10,36	228	0,86	22.608	11,67
n-C11	49.896	22,64	-	-	49.896	25,76
n-C12	50.424	22,88	-	-	50.424	26,03
n-C13	43.164	19,59	-	-	43.164	22,28
n-C14	858	0,39	-	-	858	0,44
n-Decil-BZ	3.322	1,51	-	-	3.322	1,71
n-Undecil-BZ	8.426	3,82	-	-	8.426	4,35
n-Dodecil-BZ	7.920	3,59	-	-	7.920	4,09
n-Tridecil-BZ	5.632	2,56	-	-	5.632	2,91
n-Tetradecil-BZ	1.100	0,50	-	-	1.100	0,57
Alquilato pesado	350	0,16	-	-	350	0,18

(*) El Benceno presenta 41 ppm en la corriente o una composición de 0,0041% en peso.

4.5.1 Corriente de alimentación (F).

La corriente que alimenta a la unidad de recuperación de benceno proviene de la columna de separación de ácido fluorhídrico (Stripper HF), la temperatura indicada en la Tabla 4.1 se trata de la de temperatura de ebullición de la mezcla a esa presión, como consecuencia el fluido va a ingresar a la columna como líquido saturado con un valor de condición de alimentación $\phi = 1$.

Las características de este fluido influyen de forma muy importante en la operación, ya que depende de las condiciones a las que se encuentre para que todo el proceso se modifique en cuanto a materia y energía, por tanto, es uno de los parámetros que definen el diseño de la unidad.

4.5.2 Corriente de cabeza (D).

La corriente que se obtiene en cabeza de columna (V) se ha enriquecido en los componentes más volátiles de la mezcla, se dirigirá al condensador y posteriormente una parte de ésta retornará a la columna de separación en forma de líquido (L) y otra parte será enviada al Reactor de Alquilación, corriente denominada destilado (D).

4.5.3 Corriente de fondo (W).

La corriente que sale de fondo de columna, o de la zona de agotamiento de los componentes más volátiles, será conducida hacia el rehervidor para que parte de la corriente vuelva a la unidad de separación en forma de vapor, y parte salga del sistema como producto residuo (W) en dirección hacia la siguiente etapa de la Línea de Fraccionamiento, la Columna de Parafinas.

4.5.4 Corriente de reflujo (L).

La relación de reflujo (L/D) es el principio de la columna de rectificación, ya que relaciona cuantitativamente la corriente de líquido que retorna a la columna (L) con la corriente que sale como producto destilado (D), con lo cual, obtener un valor óptimo condiciona el funcionamiento, el dimensionamiento y la economía del proceso en su totalidad. La relación de reflujo externa con la que opera la columna es:

$$\text{Relación de Reflujo externo: } \frac{L}{D} = 0,525$$

El caudal molar de líquido (L) que retorna a columna es 179 kmol·h⁻¹. Cabe añadir que la relación de reflujo mínima es 0,404 y por tanto, la relación de reflujo externa multiplica 1,3 veces el reflujo mínimo.

Al relacionar el caudal de líquido (L) con el caudal de vapor (V), se obtiene la relación de reflujo interna (L/V), esto es:

$$\text{Relación de Reflujo interno: } \frac{L}{V} = 0,344$$

4.6 Requisitos y consideraciones en el diseño.

Para iniciar la resolución de la unidad de separación de componentes se debe tener en cuenta lo siguiente:

Requisitos de diseño.

- La columna debe ser capaz de operar con $220.350 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ de alimentación que se compone tanto de ácido fluorhídrico, como de diferentes hidrocarburos (n-C10 a n-C14+), alquilbencenos y benceno no reaccionado, con una composición del 11,98% en peso de benceno.
- Debe obtenerse una corriente de fondo de columna que no sobrepase de 50 ppm de benceno.

Consideraciones.

- Funcionamiento ideal de la columna: las corrientes de entrada y salida de cada plato se encuentran en equilibrio.
- Funcionamiento en continuo: los caudales que entran y salen de la columna permanecen constantes.
- La volatilidad relativa de componentes es constante con la temperatura.
- El ácido fluorhídrico presente en la alimentación es el único componente corrosivo posible. Si bien, se sabe que es el ácido de más impacto a menores concentraciones, cuando no sobrepasa el 5% en peso es únicamente irritante. De manera que al encontrarse con una concentración del 0,01% en peso en la corriente de alimentación, la posibilidad de dañar los materiales es despreciable [18].
- La pérdida de carga del fluido en el condensador tiene un valor de 0,34 atm [19].
- La pérdida de carga del fluido en el rehervidor debe tener un valor igual o menor al que se produce en una etapa teórica de equilibrio, considerada como 0,010 atm por metro [20].

4.7 Diseño de la columna.

A continuación se realizan los cálculos pertinentes para la determinación de las dimensiones de la columna de rectificación en base a la transferencia de materia producida para la separación de componentes [21].

4.7.1 Aplicación del Método FUG.

Al aplicar el método de resolución aproximado propuesto por Fenske, Underwood y Gilliland se obtienen los resultados mostrados en la siguiente tabla:

Tabla 4.3. Resultados del Método FUG.

Número mínimo de etapas	7
Relación de reflujo externo mínimo	0,404
Relación de reflujo externo	0,525
Número de platos teóricos	17

Dicho método requiere de la definición de los componentes clave del sistema. Se trata de un sistema de clase 2, el componente clave ligero, o más pesado de los ligeros, es el benceno pues se visualiza una cantidad apreciable de éste en cabeza; y de forma similar, el n-decano se trata del compuesto que se encuentra en una cantidad apreciable pero en fondo de columna, por lo que se definirá como el compuesto clave pesado, o más ligero de los pesados. La columna opera a una relación de reflujo óptima igual a 1,3 veces la relación de reflujo mínima.

4.7.2 Diseño hidráulico de la columna.

A pesar de que en el diseño de la unidad de rectificación se pueden obtener muchos resultados en cuanto a dimensiones de columna, el correcto funcionamiento de la torre se comprueba mediante la verificación de 4 fenómenos: Lloriqueo, arrastre, inundación y descarga [22].

4.7.2.1 Diámetro y altura de columna.

En la determinación del diámetro de la columna es necesario considerar las dimensiones de los platos que conduzcan hacia el correcto funcionamiento de la operación y eviten en lo posible que se produzca algún fenómeno de los que más adelante se realizará el análisis.

El diámetro interno óptimo de la columna es:

$$D_{Columna} = 9,35 \text{ m}$$

Se considera un espesor de 41 mm para toda la columna.

Para el cálculo de la altura de la columna, se toman en cuenta el número de platos reales y su espesor, la altura de la envolvente, la altura de los dos fondos, su espesor y las faldillas, resultando:

$$H_{Columna} = 22,60 \text{ m}$$

Si se añade el faldón o soporte, el cual solapa el fondo inferior de la columna, la unidad alcanza:

$$H = 34,71 \text{ m}$$

4.7.2.2 Platos.

El tipo de platos y las dimensiones de éstos determinan el tamaño de la columna, ya que proporcionan la superficie de contacto entre el vapor y el líquido necesaria para que se produzca la separación de componentes.

A continuación se indican los diferentes tipos de platos con los que se podría operar (Figura 4.1), y cuál es el más indicado para las características de los fluidos con los que se trabaja en la unidad de rectificación de benceno. Es necesario decir, que se pueden encontrar otros platos además de los que se indican como los platos de chorro y los de diseños especiales, sin embargo, su coste es mucho mayor.

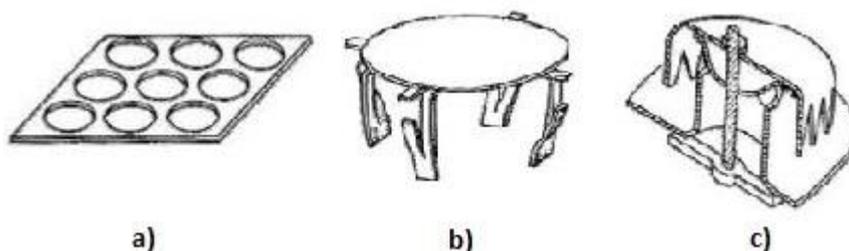


Figura 4.1. Tipos de platos. a) Perforados b) De válvula c) De capucha.

- **Platos de capucha.**

Son también llamados de borboteo, y son platos provistos de chimeneas o elevadores que llevan el gas a través del plato y por debajo de la capucha que coronan los elevadores. A pesar de que fueron los más utilizados desde 1.920 hasta 1.950, y que presentan la ventaja de operar con rangos amplios de flujo de vapor y líquido, el costo es el doble que el de platos perforados, de válvula y de platos de flujo a contracorriente. Tienen tendencia a ensuciarse, y producen elevada pérdida de carga.

- **Platos de válvula.**

Los de válvula, son platos perforados con grandes aberturas variables para el flujo de vapor. Las perforaciones se cubren por capuchas móviles que se elevan a mayor flujo de vapor, por lo que reducen el lloriqueo a flujos bajos.

La caída de presión que producen es mayor que la de platos perforados a velocidades elevadas del vapor y tienen también un coste mayor.

- **Platos de flujo a contracorriente.**

Se trata de platos perforados, pero que no tienen los vertederos usuales. En esta clase de platos, el vapor y el líquido se ponen en contacto en contracorriente a través de los mismos orificios. Tienen menor coste que los platos perforados habituales y no se ensucian con facilidad, sin embargo, tienen un rango de operación bajo y una eficiencia menor.

- **Platos perforados.**

Los platos perforados son unas láminas metálicas multiperforadas que se disponen en forma horizontal con la finalidad de que el líquido fluya en la superficie y el vapor ascienda a través de las perforaciones. El objetivo del flujo del vapor, es expandir al líquido en una espuma turbulenta produciendo una superficie interfacial de elevada magnitud.

La desventaja de este tipo de platos, es que están sujetos a inundaciones, arrastre del líquido en el gas por espumado o lloriqueo a través de las

perforaciones, precisando de un análisis minucioso de las dimensiones empleadas y los fluidos de operación.

Las ventajas son: bajo coste, versatilidad, disponibilidad, baja tendencia al ensuciamiento, construcción simple y bajo coste de mantenimiento.

- **Selección del tipo de plato.**

Luego de distinguir los tipos de platos y considerar sus características, se ha elegido para la unidad de separación de benceno los platos perforados (Figura 4.2), debido a todas las ventajas en cuanto a funcionamiento, disponibilidad y coste que presentan frente a otras. Sus particularidades se describen en la siguiente tabla:

Tabla 4.4. Características de platos.

Material	Acero al carbono SA-285 C
Diámetro (m)	9,35
Espesor de plato (mm)	5
Espaciamiento entre platos (m)	0,61
Diámetro de orificio (mm)	9
Pitch (mm)	27
Número de pasos	1
Área transversal (m²)	68,62
Área neta (m²)	62,58
Área activa (m²)	44,18
Longitud del vertedero (m)	6,54
Área vertedero (m²)	6,04
Área de orificios (m²)	4,45
Área de las vigas (m²)	12,35
Pérdida de carga (atm·m⁻¹)	0,006

- **Pitch.**

Distancia entre orificios. Los orificios se encuentran en disposición triangular, al tresbolillo.

- **Número de pasos.**

Se refiere al recorrido del líquido, presenta únicamente un vertedero por plato, por tanto es de paso simple.

- **Área transversal.**

Sección de la columna relacionada con su diámetro.

- **Área neta.**

Área total que omite el área perteneciente al vertedero de su nivel de plato.

- **Área activa.**
Área disponible para el burbujeo del vapor. Excluye las áreas de vertedero de su nivel de plato y del inmediatamente superior, así como las vigas y soportes.
- **Área del vertedero.**
Área libre destinada a dirigir el fluido al plato inferior y recibir el proveniente del plato superior.
- **Vigas y soportes de platos.**
Elementos de sujeción de los platos.

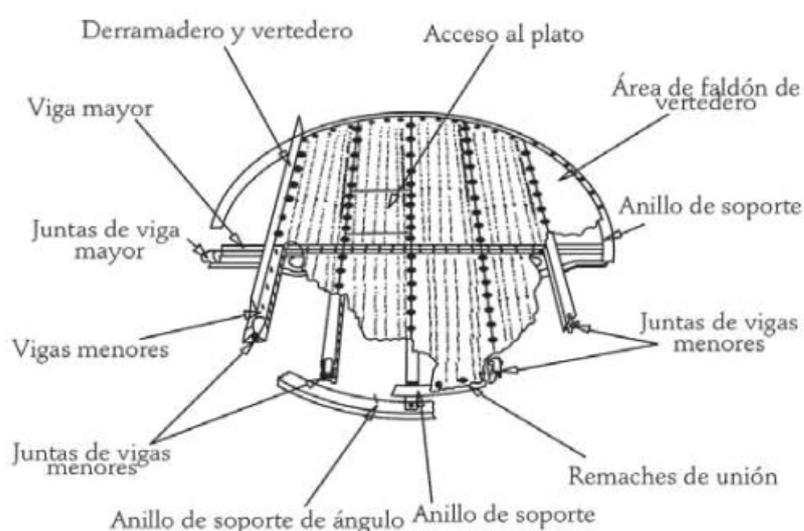


Figura 4.2. Plato perforado de paso simple [22].

4.7.2.3 Lloriqueo.

El fenómeno de lloriqueo ocurre cuando la velocidad de vapor ascendente es muy baja y el líquido que proviene del plato superior "gotea" a través de los orificios por donde debería fluir el vapor.

Por debajo de una velocidad de vapor de $0,21 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ el líquido descendería por los orificios del plato, y la velocidad con la que el vapor circula por éstos es de $0,24 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, por lo que no se produce dicho fenómeno.

4.7.2.4 Arrastre.

El arrastre, se trata de un fenómeno que se produce cuando la velocidad del vapor es tan elevada que arrastra con él una gran cantidad de líquido que modifica la concentración que presenta el plato al que asciende.

El valor de arrastre máximo permisible es, generalmente, de 0,10 y se determina mediante métodos gráficos (Véase Figura A.2, Anexo A). El parámetro de flujo (PF) de 0,47 y la relación entre la velocidad del vapor y la velocidad de inundación de 0,8, definen un valor de arrastre igual a 0,003 verificando un funcionamiento correcto de la columna con respecto a este fenómeno.

4.7.2.5 Inundación.

La situación en la que la velocidad del vapor es elevada al mismo tiempo que alto el nivel de líquido, la diferencia de presión producida en el vapor impulsa al líquido a incrementar su nivel y dado que sigue accediendo líquido, el plato se inunda.

De acuerdo con lo anterior y considerando que la máxima altura a la que puede alcanzar el líquido sin producir la inundación del plato es el 50% del espaciamiento entre platos (espaciamiento entre platos $t=610$ mm), es decir 305 mm, se determina el valor de las diferentes alturas de líquido y pérdidas de carga (Véase Tabla 4.5 y Figura 4.3), resultando un valor de 235 mm, y por tanto se logra un adecuado funcionamiento de columna.

Tabla 4.5. Factores de inundación: Alturas de líquido y pérdidas de carga en el plato

Descripción				Valor (mm)
Altura de rebosadero (h_w)				61
Altura de la cresta de líquido (h_c)				51
Retroceso de nivel de líquido (h_B)	Pérdida de carga del líquido al acceder al plato		54	123
	Pérdida de carga del vapor entre plato y plato.	Caída de presión en plato seco.	0*	
		Caída de presión generada al circular el vapor a través del líquido y la espuma.	68	
		Caída de presión residual.	1	
Total*				235

(*) La caída de presión en plato seco es 0,3 mm.

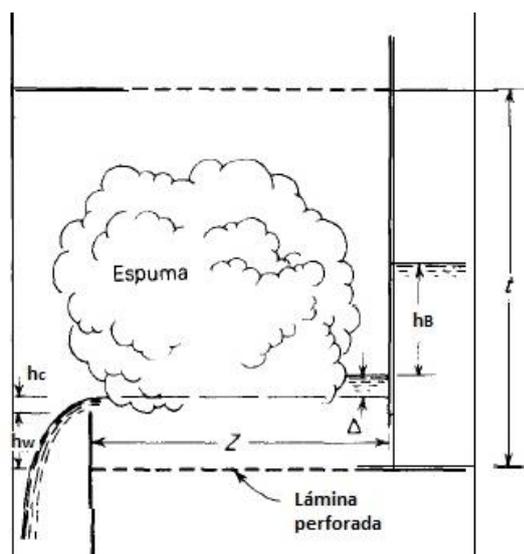


Figura 4.3. Factores de inundación.

4.7.2.6 Descarga.

La descarga del líquido se produce para una velocidad de líquido mayor a $0,30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ o una carga mayor a $32\cdot 10^{-3} \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ de líquido por metro de vertedero.

El caudal de líquido en la columna es $0,14 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, la longitud de vertedero $6,54 \text{ m}$ y su área $6,04 \text{ m}^2$. La velocidad del líquido por tanto es $0,02 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, mucho menor a la velocidad máxima permitida, y la carga de líquido igual a $21\cdot 10^{-3} \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$ también menor a la establecida, asegurando una correcta actividad en el proceso.

4.7.3 Eficacia de la unidad.

Con respecto a los platos teóricos obtenidos, éstos no proporcionan una eficacia elevada en la operación debido a los problemas que pueden surgir, como los comentados anteriormente, afectando a la velocidad de transferencia de materia entre los fluidos, por tanto, es necesario obtener el valor requerido de etapas necesarias de equilibrio en la columna para satisfacer el grado de separación de componentes establecido.

Su determinación se realiza mediante la ecuación aplicable de Drickamer y Bradford para columnas que operan con mezclas de hidrocarburos, obteniendo un valor de 57,49% de eficacia global.

Y como consecuencia, un número de platos reales igual a 30, contando con 6 platos en la zona de rectificación y 24 platos en la zona de agotamiento de la columna. Con lo que el plato de alimentación es el 7.

4.7.4 Diseño mecánico de la unidad.

4.7.4.1 Material.

El material del que se conforma la columna se elige considerando las condiciones de operación de la columna, así como las propiedades de los fluidos implicados en el proceso (Véase Tabla 4.1) [22,23].

La selección de acero al carbono SA-285 C se realiza por las características que presenta el material frente a las condiciones adversas, más aún, es el material más utilizado para recipientes a presión con baja y media tensión [24], el cual se caracteriza por ser uno de los más económicos para este tipo de aplicaciones, su buena soldabilidad y su gran resistencia a bajas y altas, temperaturas de hasta 427°C, así como a una tensión entre 3.743 atm y 5.103 atm.

4.7.4.2 Espesor de la envolvente.

El espesor se ha determinado mediante el análisis de las tensiones a las que se somete la columna. Las tensiones internas, son debidas a la presión con la que opera la unidad, y las externas debidas a las condiciones ambientales de la zona, como el viento y la corrosión que puede producirse. Con lo cual, se obtiene un valor de 41 mm.

4.7.4.3 Fondos.

La elección de los fondos sigue las normas establecidas por el Código ASME, siendo de tipo toriesféricos y cuyas dimensiones se recogen en la Tabla 4.6. Dichos fondos, denominados así tanto para cabeza como para fondo de columna, pueden ser a su vez de dos tipos: Klopper o Korbogen (Figura 4.4). Sin embargo, se emplean los de tipo Korbogen cuando se cumple una de las siguientes condiciones:

- a) Temperatura mayor a 350°C.
- b) Presión igual o mayor a 6,77 atm.
- c) Relación altura-diámetro mayor a 10.

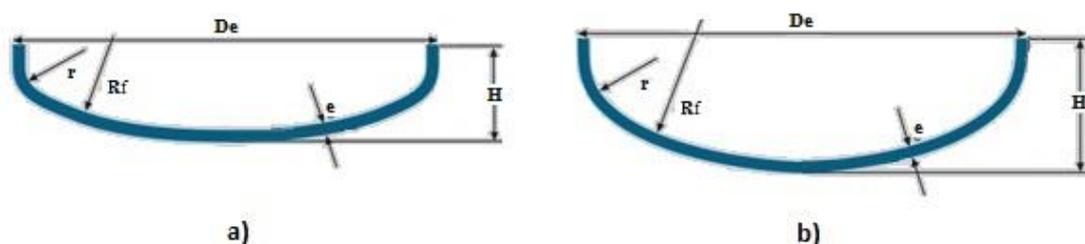


Figura 4.4. Fondos toriesféricos. a) Klopper b) Korbogen.

Las condiciones más adversas del proceso se dan en fondo de columna y por tanto, se consideran los valores de diseño siguientes: una temperatura igual a 273,21°C, una presión de 4,55 atm y una relación altura-diámetro igual a 2,37. Estas condiciones permiten el empleo de los fondos de tipo Klopper con seguridad para el proceso.

Tabla 4.6. Dimensiones fondos.

Dimensión	Valor
Radio mayor, R_f (m)	9,35
Radio menor, r (m)	0,93
Espesor, e (mm)	41
Altura, H (m)	1,91

4.7.4.4 Faldilla.

La faldilla de la columna, se trata de una placa de forma cilíndrica del mismo diámetro interno y espesor que la columna, mediante la cual se une cada fondo (de cabeza y fondo de columna) con la envolvente formando el recipiente final y disminuyendo las tensiones que se producirían si los fondos se unieran directamente por la línea de tangencia, debilitando la columna. Ambas faldillas van soldados a la envolvente y cada una tiene una altura de 180 mm.

4.7.4.5 Soporte.

Existen varios tipos de soportes para recipientes a presión como las patas, silletas, consolas o faldones. Sin embargo, los faldones son aconsejados cuando se da alguna de las condiciones siguientes:

- a) Diámetro de envolvente mayor a 1,50 m.
- b) Relación altura-diámetro de columna mayor a 5.
- c) Pueden esperarse vibraciones.
- d) Peso de columna llena de agua superior a 15.000 kg.

Dado que la unidad de recuperación de benceno tiene un diámetro interno de 9,35 m y una relación altura-diámetro igual a 2,37, se cumplen las condiciones citadas y se justifica el uso del faldón como soporte para la columna, del cual, se muestran sus características en la siguiente tabla:

Tabla 4.7. Características del faldón.

Material	Acero al carbono SA-285 C y recubrimiento de hormigón
Altura (m)	14,02
Diámetro interno (m)	9,35
Espesor (mm)	41

Dicho faldón, debe ir soldado al fondo inferior de la columna de forma que ambos diámetros coincidan.

Presenta adicionalmente:

- Dos aberturas de acceso de 0,51 m de diámetro cada una.
- Una abertura para la tubería de salida de fondo de columna de diámetro 0,35 m, esto es, 25 mm mayor al de la propia tubería, reforzada por un collarín.
- Cuatro aberturas de ventilación a la altura de los fondos, de 51 mm de diámetro cada una, debido a que el diámetro de columna es mayor a un metro, y describiendo las puntas de una cruz simétrica.
- Estará provisto de una capa de protección ignífuga de espesor de 51 mm hecha de hormigón.

4.7.4.6 Aislamiento.

La columna estará recubierta por lana de roca de 80 mm de espesor, un aislamiento térmico muy eficaz, de densidad $100 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, de temperatura de

operación de hasta 750°C en régimen continuo, y conductividad térmica baja, que estará a su vez protegida por una lámina de aluminio. Se emplea un valor de espesor estándar en su especificación, sin embargo, cabe destacar que su espesor óptimo se ha determinado mediante el programa informático libre Insulan de la compañía CALORCOL [25].

4.7.4.7 Pescante.

La columna, como recipiente de altura y que contiene en su interior elementos de peso, debe contar con un pescante, o elemento que facilite montar y desmontar dichos elementos, que tenga una capacidad mínima de 500 kg y esté situado en la parte superior de éste. Se prefiere el pescante antes que una bisagra debido al menor espacio requerido en su utilización en una torre elevada, así como cuando su uso es frecuente.

4.7.4.8 Escalerilla y plataformas.

La escalerilla permite el acceso a las bocas de hombre para la inspección o mantenimiento de la unidad. Ésta debe presentar un ancho de 0,41 m, dimensión mínima establecida. Dispondrá de dos plataformas de descanso a la altura de las bocas de hombre del centro de la columna, y jaulas de seguridad a partir de los 6,10 m de altura con un ancho de 0,61 m, valores mínimos requeridos.

4.7.4.9 Bocas de hombre.

Las bocas de hombre son compuertas de 0,51 m de diámetro que permiten el acceso hacia la unidad de separación. Estarán dispuestas de forma práctica, con una separación máxima de 6,10 m. Éstas se sitúan justamente por encima del primer plato de la columna, del plato de alimentación, y del último plato, y dos últimas situadas entre la de alimentación y último plato de forma simétrica, concretamente por encima del plato 15 y del plato 23.

4.8 Distribución en planta.

Los equipos que comprenden la unidad de recuperación de benceno se distribuyen en la planta según las distancias de seguridad recomendadas para cada uno de ellos.

La separación se realiza en base al tipo de equipo, las condiciones de trabajo y los compuestos con los que opera. El esquema de la planta se muestra en la Figura 4.5.

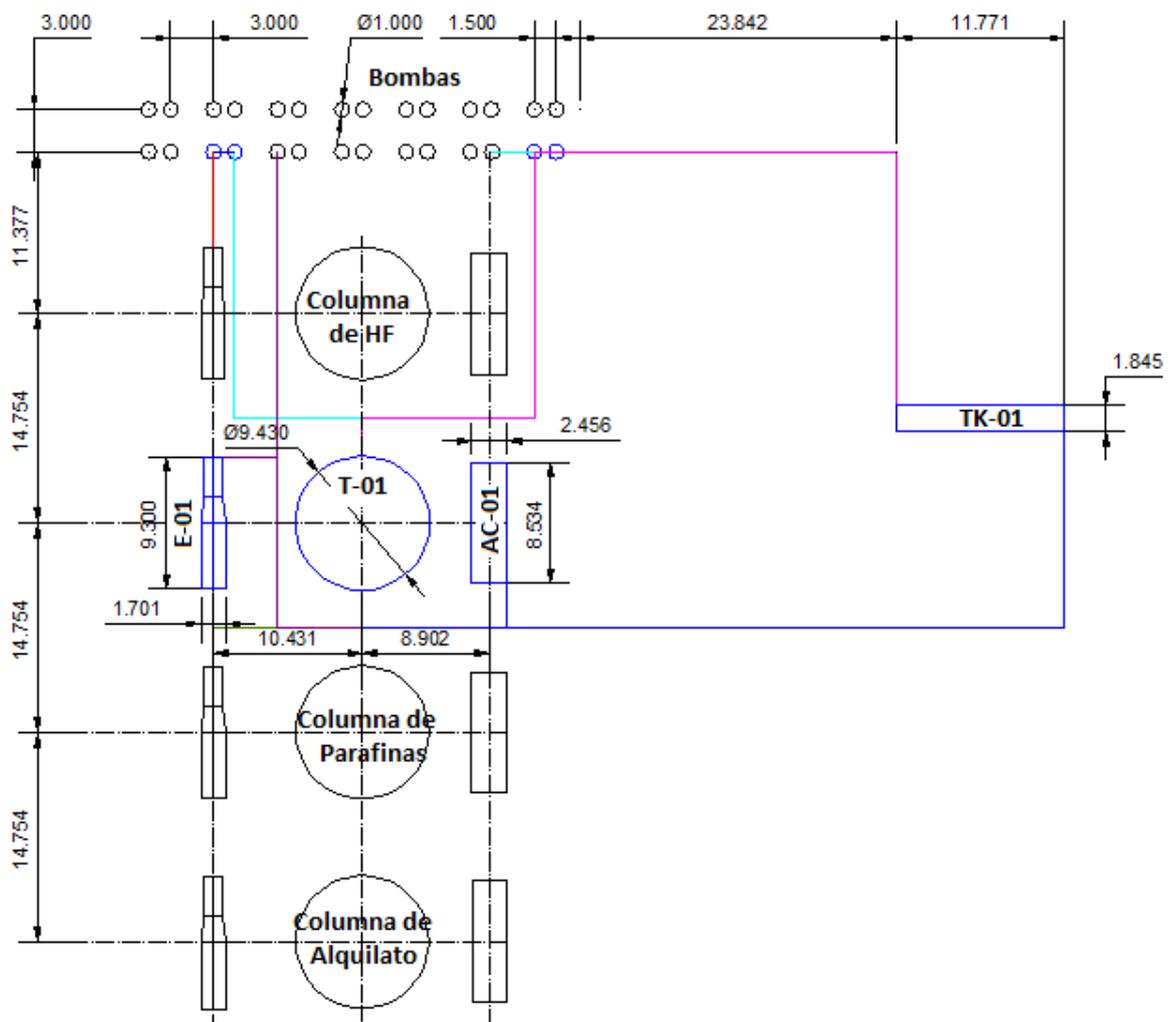


Figura 4. 5. Distribución en planta.

Los equipos que conforman la unidad de recuperación de benceno son los siguientes:

- T-01: Columna de rectificación o columna de recuperación de benceno.
- AC-01: Condensador tipo aerorrefrigerador.
- E-01: Rehervidor tipo Kettle.
- TK-01: Acumulador de reflujo.
- Bombas (P-01 A/B, P-02 A/B): Bombas de impulsión.

Los equipos que no conforman la unidad, pero que influyen en la distribución de los equipos son:

Columna de HF: Stripper de ácido fluorhídrico.

Columna de Parafinas: Torre de rectificación de parafinas lineales. Perteneciente a la Parte II de Rediseño de una Línea de Fraccionamiento de Alquilación de Parafinas.

Columna de Alquilato: Columna de rectificación de alquilato pesado. Perteneciente a la Parte III de Rediseño de una Línea de Fraccionamiento de Alquilación de Parafinas.

Las distancias de seguridad han sido calculadas según la Tabla 4.8 [26].

Tabla 4. 8. Separación entre equipos.

Equipo	Columna	Aerorrefrigerador	Rehervidor	Acumulador de reflujo	Bomba
Columna	3	3	2	25	5
Aerorrefrigerador	3	3	5	25	5
Rehervidor	2	5	5	25	5
Acumulador de reflujo	25	25	25	25	25
Bomba	5	5	5	25	1,5-3*

(*) Bombas para un mismo servicio 1,5 m de separación entre sí. Bombas de servicios diferentes 3 m de separación entre sí.

CAPÍTULO 5. Análisis de soluciones y resultados de los Sistemas de Intercambio de Calor.

5.1 Introducción.

El proceso de separación se basa en la transferencia de materia como de energía, y puesto que en el anterior apartado se ha tratado la transferencia de materia producida en la columna, en esta sección del proyecto se hará mención de los distintos equipos que llevan a cabo el intercambio de energía necesario para una correcta operación de la misma [14,27].

5.2 Justificación.

Es importante recordar que la separación de componentes realizada en la columna produce dos corrientes de flujo distintas, una en forma de vapor que asciende a cabeza de columna y que por medio de tuberías se transporta a un condensador; otra en forma líquida, desciende al fondo de la columna y se transporta por tuberías dirigida al calderín. Evidenciando de esta manera que son dos los equipos necesarios para este intercambio de calor.

El siguiente paso que se describe a continuación es muy importante, pues es el principio de funcionamiento que modifica al diseño de la torre, Por una parte, el producto de cabeza que es un vapor, debe ser convertido en líquido mediante un condensador de tipo total. La conducción de este líquido resulta menos costosa debido a las condiciones menos agresivas que presentan sus propiedades hacia los materiales de transporte utilizados. Una fracción del fluido resultante debe transportarse por medio de tuberías hacia el reactor productor de LAB situado justo antes de la torre de separación de ácido fluorhídrico, previa a la presente columna de recuperación de benceno, como corriente de realimentación de reactivo principal. Y la otra fracción del fluido proveniente del condensador, debe retornar a la columna como corriente de reflujo por una tubería independiente para nuevamente iniciar el proceso de separación de compuestos.

Por otro lado, el líquido obtenido en fondos de columna, será transportado a un rehervidor o calderín por medio de una tubería, en el cual el fluido tomará el calor necesario para cambiar de estado y bien retornar a columna en forma de vapor, o bien ser conducida en forma de producto final al siguiente proceso que se denomina Parte II: Torre de rectificación de parafinas lineales, que es motivo de otro estudio.

5.3 Normativa de diseño.

El código de construcción que proporciona normas mínimas es la obra "Rules for Construction of Pressure Vessels, Division I" que forma parte de la sección VIII del ASME Boiler and Pressure Vessel Code, que debe ser complementaria con la obra "Shell and Tube Heat Exchangers for General Refinery Services" de la normativa API, así como con las prácticas recomendadas para definir características mecánicas y térmicas correspondientes a las condiciones de funcionamiento, además de la designación de intercambiadores de calor convencionales de carcasa y tubos mediante números y letras establecidas por las normas TEMA y los espesores de los tubos definidos por BWG.

5.4 Diseño de los sistemas de intercambio de calor.

5.4.1 Método de resolución.

En el diseño de intercambiadores se deben seguir los siguientes puntos para asegurar un funcionamiento del proceso adecuado a las posibilidades económicas y características de las corrientes implicadas:

- Especificar condiciones de operación (Composiciones, flujos, temperaturas, presiones, calor transferido, fracción vaporizada, etc.)
- Obtener propiedades físicas de todas las corrientes que entran o salen del intercambiador en los intervalos de temperaturas y presiones que interesan.
- Seleccionar el tipo de intercambiador más adecuado.
- Seleccionar el fluido de servicio.

- Estimación preliminar del tamaño del intercambiador, mediante hipótesis de coeficientes globales de intercambio de calor teóricos.
- Realizar primer diseño completo con todas las dimensiones necesarias de los componentes del intercambiador.
- Evaluar el diseño obtenido en el punto anterior en cuanto a su capacidad para satisfacer las especificaciones del proceso con respecto a la transferencia de calor, caída de presión y otros parámetros.
- Sobre la base de los resultados obtenidos en el anterior punto, se escoge una nueva configuración si es necesario, y se repite la evaluación hasta obtener el resultado deseado.

5.4.2 Intercambiador de calor de cabeza de columna.

Para cambiar el estado del vapor a líquido, es necesario transmitir su calor a un fluido de menor temperatura denominado refrigerante, proceso que se logra mediante un condensador.

5.4.2.1 Corriente de ingreso.

El vapor obtenido en la zona superior de la columna se caracteriza por las magnitudes expresadas en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1. Características del vapor de cabeza de columna.

Magnitud	Valor
Temperatura (°C)	113,51
Presión (atm)	2,43
Densidad (kg·m ⁻³)	6,36
Viscosidad (kg·m ⁻¹ ·s ⁻¹)	0,94·10 ⁻⁵
Conductividad térmica (W·m ⁻¹ ·°C ⁻¹)	0,017
Peso molecular (kg·kmol ⁻¹)	78,22
Caudal molar (kmol·h ⁻¹)	519
Caudal másico (kg·h ⁻¹)	40.632
Caudal volumétrico (m ³ ·h ⁻¹)	6.386

5.4.2.2 Requisitos de diseño.

En la selección del tipo de intercambiador, para realizar el cambio de estado de la corriente, se consideran los siguientes requisitos de diseño:

- El producto condensado debe presentar una elevada pureza de benceno para su utilización como reactivo en el proceso de producción de LAB.
- El área de intercambio de energía debe tener un tamaño considerable ya que el vapor presenta una elevada temperatura y un gran caudal.
- El fluido de servicio debe ser eficaz, pero a su vez económico y respetuoso con el medio ambiente.

5.4.2.3 Tipos de condensadores.

En la industria se puede encontrar diferentes tipos de equipos utilizados para la condensación de los fluidos y pueden presentar dos tipos de contacto entre las corrientes implicadas.

a) Contacto directo.

En éste, las corrientes de vapor y de refrigerante se mezclan físicamente y abandonan el equipo formando una sola corriente (Véase Figura 5.1). Este tipo de condensador presenta la característica de ser más pequeño en cuanto a sus dimensiones y tener un menor coste que el condensador de contacto indirecto. El más conocido se denomina condensador jet.

Este tipo de condensador es utilizado en el caso de que la interacción entre ambos fluidos no cause contaminación mutua, y generalmente cuando una de las corrientes sea un gas y la otra un líquido. Los fluidos de servicio empleados, normalmente, son el aire y el agua.

Estos equipos alcanzan coeficientes de transferencia de calor elevados a causa de que la resistencia producida por los coeficientes de ensuciamiento son automáticamente eliminados por la ausencia de una superficie sobre la cual se pueda producir algún tipo de acumulación de impurezas y disminuya el contacto entre corrientes [13].

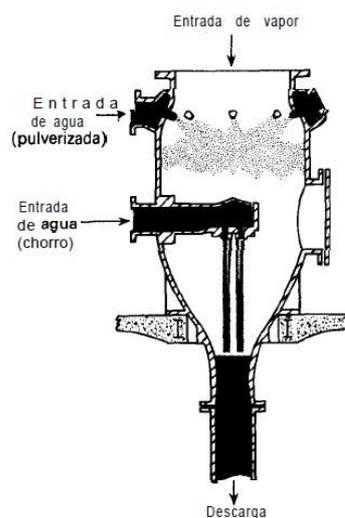


Figura 5.1. Condensador de contacto directo [13].

b) Contacto indirecto.

Este tipo de condensador no implica una interacción física entre las corrientes. El vapor condensante y el fluido refrigerante están separados por una superficie de transmisión de calor.

Dentro de este tipo de condensadores, también llamados de superficie, se encuentran los condensadores de carcasa y tubos y los condensadores deshumidificantes.

Intercambiadores de carcasa y tubos.

Las configuraciones de carcasa-tubos disponibles en el comercio son las siguientes: 1-1, 1-2, 1-4 y 1-6 cuya característica es de que el fluido atraviesa una sola vez la carcasa y en la que el fluido circulante por tubos, puede tener un paso simple (1) o múltiples pasos (2 a 6) a través de la carcasa; así mismo, es posible encontrarse una configuración de dos pasos por carcasa y múltiples pasos por tubos. De éstas, la configuración más empleada en la industria es la 1-2 (un paso por carcasa y dos por tubos).

Los tubos a su vez, pueden adquirir una disposición cuadrada o triangular en el interior de la carcasa, de las que la primera cuenta con la ventaja de producir una menor pérdida de carga del fluido que circula por la carcasa, y la segunda permite instalar un mayor número de tubos con el consecuente incremento de la superficie de intercambio [27].

Los fluidos implicados en el intercambio, tanto refrigerante como refrigerado, tienen muchas combinaciones en cuanto a su composición, sin embargo uno de los equipos más conocidos es el aerorrefrigerador por el fluido de servicio que utiliza, el aire.

Si bien, en este apartado la atención se centra en los condensadores, los intercambiadores de carcasa (coraza) y tubos son utilizados tanto como calentadores, como enfriadores de corrientes fluidas. Las diferentes conformaciones posibles se muestran en la Figura 5.2.

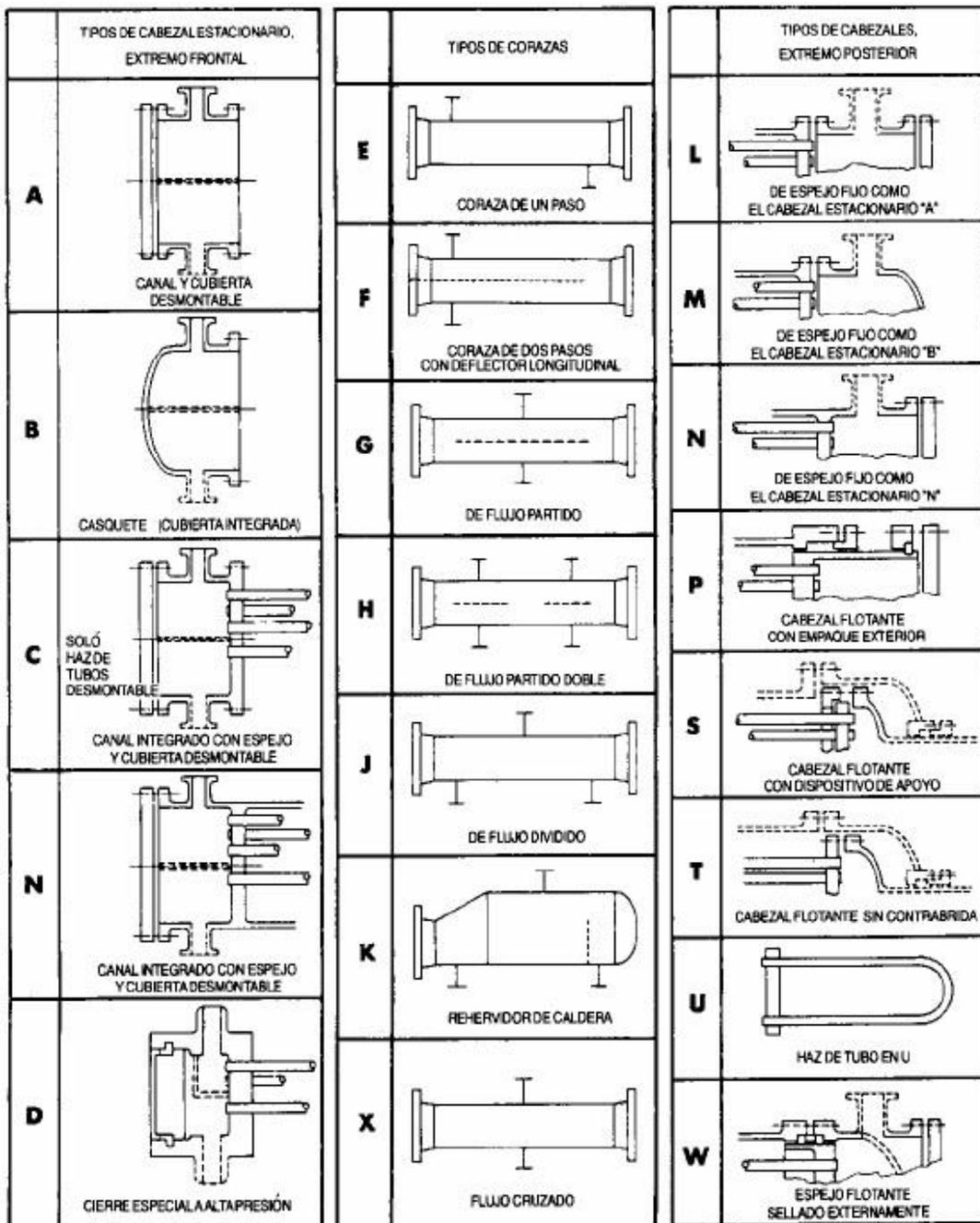


Figura 5.2. Intercambiadores de carcasa y tubos [14].

Condensadores deshumidificantes.

Estos equipos presentan una configuración semejante a los de carcasa y tubos (Figura 5.3), pero de disposición vertical, los cuales permiten trabajar con mezclas de vapores y gases no condensables [13].

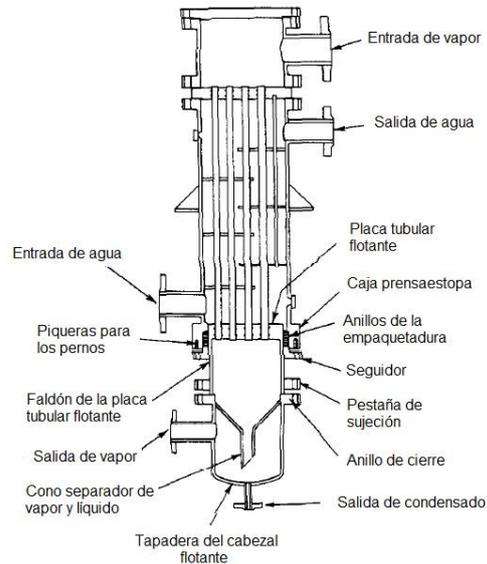


Figura 5.3. Condensador deshumidificante [13].

Superficies ampliadas.

Para incrementar el valor del coeficiente de transmisión de calor es posible utilizar una superficie ampliada en el equipo condensador, mediante el uso de aletas (tiras de metal) hechas de cobre, aluminio o acero en los tubos dentro del condensador, proporcionando una superficie de intercambio de calor de 15 o más veces mayor a de la que tuvieron originalmente los tubos simples (Véase Figura 5.4). Éstas pueden ser unidas al tubo mediante ranurado o bien, mediante soldadura, y recorrer el tubo de forma longitudinal o transversal.

Las aletas longitudinales son comúnmente utilizadas en intercambiadores de carcasa y tubos que no contengan placas deflectoras y en los cuales el flujo del fluido es paralelo al eje del tubo.

Las aletas transversales se emplean para el enfriamiento o calentamiento, en flujo cruzado, de corrientes que implican gases [27].

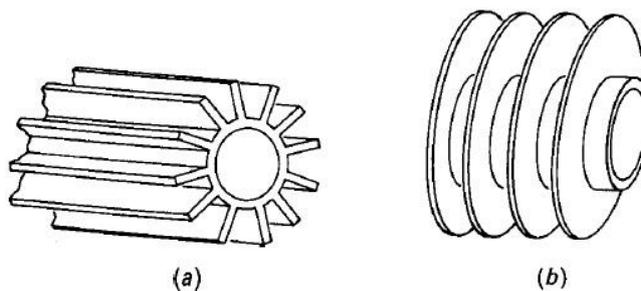


Figura 5.4. Superficies ampliadas. a) Aletas longitudinales b) Aletas transversales [13].

5.4.2.4 Selección del tipo de intercambiador.

Debido a que el vapor obtenido en cabeza de columna es un producto importante para el proceso de obtención de LAS, y por el cual se justifica el diseño de la columna de recuperación de benceno, es necesario que el condensador utilizado sea de tipo de contacto indirecto. De hecho, se requiere una corriente lo más limpia posible de otros componentes que no sean el ácido fluorhídrico y el benceno, por añadidura el uso de un componente ajeno al proceso es desaconsejado.

Dentro del condensador de contacto indirecto, seleccionamos al de carcasa y tubos pues ofrece una amplia gama de fluidos de servicio, así como de configuraciones.

Todas las razones expuestas, señalan que el equipo indicado es un aerorrefrigerador de tiro forzado, pues el fluido de servicio, como su nombre indica, es el aire del ambiente, el cual será impulsado por ventiladores situados estratégicamente a lo largo de la carcasa, proporcionando tanto un flujo turbulento, como un coeficiente mayor de transferencia en la totalidad del haz de tubos. A diferencia de los aerorrefrigeradores de flujo inducido, éstos presentan menores costos estructurales y mejor acceso para mantenimiento y ajuste del ventilador y transmisión, además de requerir menor potencia para impulsar el aire frío.

Por otro lado, hay que tener en cuenta también que el enfriamiento de éstas corrientes empleando agua de refrigeración podría alcanzar mejores resultados, así como que los aerorrefrigeradores requieren de tubos aleteados que tienen un mayor coste que los habituales y que las variaciones de la

temperatura del aire afectan al rendimiento del equipo, es decir, el sol y la lluvia pueden dificultar el control de la operación.

Sin embargo, el aire utilizado, al tratarse de una mezcla de gases que constituye la atmósfera terrestre, proporciona una de las fuentes más limpias de fluidos de servicio, la fuente es ilimitada, el aire no es corrosivo, no tiene costo, no necesita una preparación previa, y finalmente al ser devuelto a su origen, la atmósfera, luego de atravesar el equipo, no produce contaminación mediante sustancias externas a éste por lo que es ecológicamente aceptable. Además es importante indicar que el equipo aerorrefrigerado cuenta con un costo de mantenimiento bajo en relación a otros equipos, así como que en caso de corte de energía eléctrica mantienen una capacidad de enfriamiento de hasta el 30% por tiraje natural.

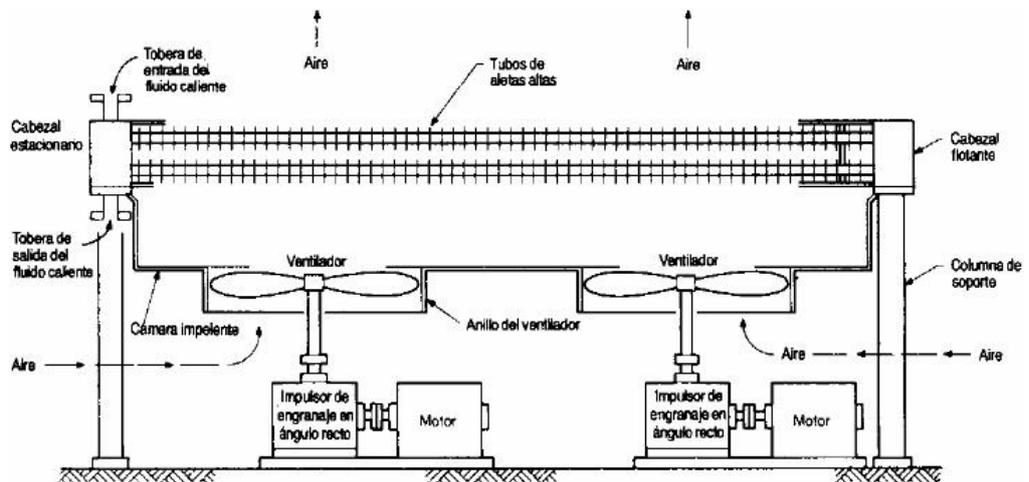


Figura 5.5. Aerorrefrigerador de flujo forzado [14].

5.4.2.5 Características principales.

El aerorrefrigerador contará con una configuración similar a los intercambiadores de carcasa-tubos de tipo 1-2 (un paso por carcasa y dos por tubos) y con aletas transversales (Figura 5.5). Los cabezales con los que cuenta son de tipo A removibles para facilitar el mantenimiento y limpieza (Véase Figura 5.2).

El material de los tubos acero al carbono SA-106 B, y el de las aletas aluminio. La temperatura para la que están diseñados los tubos tiene un valor de 133,51°C, y la presión de diseño 4,37 atm.

Cuenta con un haz de 93 tubos en forma de "U", 186 tubos en total, agrupados en 6 filas. Los tubos con una longitud igual a 8,53 m y un diámetro exterior de 25 mm mantienen una disposición triangular o Pitch con un valor de 64 mm.

Los anteriores resultados se explican detalladamente en Documento 2: Anexo B, y las características restantes del intercambiador se resumen en las Tablas 5.2, 5.3, 5.4 y 5.5.

5.4.2.6 Selección de la trayectoria de flujo.

La trayectoria de flujo para los fluidos implicados se elige dependiendo de varios criterios definidos por las propiedades tanto físicas como químicas, y condiciones en las que se encuentren.

El fluido que circula por los tubos será el que presente las características siguientes:

- Fluido más corrosivo.
- Fluido más sucio.
- Presión más alta.
- Temperatura más alta.

Debe recorrer por la carcasa el fluido que se presente con alguna de estas características:

- Líquido de viscosidad elevada.
- Gas.

Estos criterios se establecen de esta forma debido a que la limpieza del interior de los tubos se hace con mayor facilidad que la de las superficies exteriores [14].

Teniendo en cuenta los anteriores puntos y las características de los fluidos, se procede a la determinación de la trayectoria que sigue cada uno: La elevada presión y temperatura que porta el vapor procedente de cabeza de columna, determina que éste sea conducido por los tubos del intercambiador, y

ratificando lo dicho, al tratarse de un aerorrefrigerador, la corriente de aire del ambiente, que es el principio de funcionamiento del aparato, requiere que el aire fluya por el exterior de los tubos.

5.4.2.7 Componentes.

- **Tubos.**

En procesos industriales, los intercambiadores tienen un número par de pasos de tubo, siendo generalmente de tipo 1-2, con tubos de diámetro exterior desde 6 mm a 32 mm con una longitud entre 2,44 m y 12,19 m, siendo el espesor común de calibre BWG 14, una separación entre tubos (Pitch: p') que toma valores entre 2 y 2,5 veces el diámetro exterior y una disposición cuadrada o triangular (Figura 5.6).

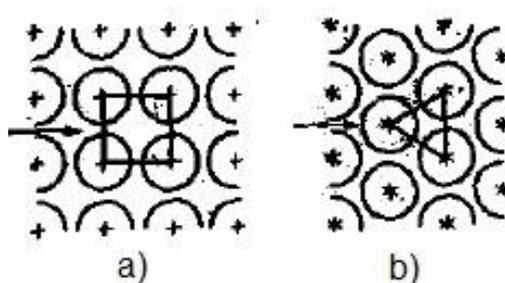


Figura 5.6. Disposición de tubos. a) Cuadrada b) Triangular [27].

El material utilizado, acero al carbono SA-106 B, es el habitualmente empleado para tuberías sin costura para servicio de alta temperatura, presenta una gran resistencia a bajas y altas temperaturas de hasta 427°C, así como a una tensión mínima de 4.083 atm [24].

Las dimensiones de los tubos utilizados en el condensador diseñado, se seleccionan tomando en cuenta el gran caudal presente en la corriente de cabeza de columna, por el cual, se requiere de una elevada área de intercambio, así como obtener una pérdida de presión igual o menor a 0,34 atm que es el valor supuesto fijado en el diseño de la columna de separación.

Tabla 5.2. Características de los tubos del condensador.

Material	Acero al carbono SA-106 B
Diámetro interno (mm)	20
Diámetro externo (mm)	25
Calibre BWG	12
Pitch (mm)	64
Longitud (m)	8,53
Nº Tubos	186
Nº Filas	6
Velocidad fluido ($m \cdot s^{-1}$)	1
Pérdida de carga (atm)	0,30

- **Aletas.**

Las aletas dispuestas en los tubos serán integradas transversales debido a que gran parte del flujo del fluido externo es cruzado, es decir, perpendicular a la circulación del fluido del interior de los tubos.

Existen aletas de gran variedad de aleaciones y tamaños, se extruyen radialmente del tubo de pared gruesa a una altura entre 13 mm a 15 mm con una densidad de 276 a 433 aletas por metro.

Las dimensiones seleccionadas mostradas en la siguiente tabla posibilitan la mayor superficie de intercambio de calor.

Tabla 5.3. Características de las aletas del condensador.

Material	Aluminio
Altura (mm)	13
Espesor (mm)	1
Densidad (aletas$\cdot m^{-1}$)	394
Eficacia (%)	94

- **Cabezal de retorno y distribución.**

Los cabezales del intercambiador se sitúan en el extremo frontal, cabezal de distribución, y en el extremo posterior, cabezal de retorno. Éstos pueden ser fijos o removibles (Véase Figura 5.2), sin embargo, los utilizados en el condensador serán los removibles de tipo A, ya que son los recomendados cuando se emplean en el intercambiador tubos en "U", bien para poder examinar los extremos de los tubos de manera más sencilla, como para realizar su limpieza.

- **Haz de tubos.**

Los tubos se unen mediante dos o más ranuras en la pared de un haz de tubos, situándose a una determinada distancia el uno del otro dependiendo de si su disposición es cuadrada o triangular (Pitch). Éste condensador contará con una disposición triangular de los tubos.

Tabla 5.4. Características del haz de tubos del condensador.

Nº haz de tubos	1
Longitud haz de tubos (m)	8,53
Distancia entre el haz de tubos y ventiladores, vertical (m)	1,52
Ancho haces de tubos (m)	2,46

- **Ventiladores.**

El aire proveniente del entorno con una temperatura media de 25°C en el área en la que la planta de recuperación de benceno se sitúa, debe ser impulsado por ventiladores hacia el haz de tubos para proporcionar un flujo turbulento e incrementar el valor del coeficiente de calor, con un determinado alcance, es por eso que se necesita un mayor o menor número de ellos para abarcar todo el haz de tubos.

Los ventiladores serán de flujo axial, mediante el cual se reduce espacio de instalación y se tiene la mayor incidencia sobre los tubos, pueden disponer entre 4 a 6 álabes de aluminio, sin embargo, en éste diseño se emplearán

ventiladores de 6 álabes, pues se envía la misma cantidad de aire pero a menor velocidad angular que con 4 [14].

Tabla 5.5. Características de los ventiladores del condensador.

Diámetro ventilador (m)	2,13
Espaciamiento entre ventiladores (m)	2,84
Distancia centro de ventilador extremo-fin de haz, horizontal (m)	1,42
Área de incidencia por ventilador (m)	8,94
Nº Ventiladores	3
Potencia de cada ventilador (kW)	2,98
Rendimiento mecánico (%)	75
Rendimiento de impulsores (%)	95

5.4.3 Intercambiador de fondo de columna.

Para obtener por una parte la fuente de vapor de la columna, y por otra la corriente de producto líquida, es necesario un rehervidor⁵ que aporte el calor necesario en el cambio de fase y que separe ambos fluidos.

5.4.3.1 Corriente de ingreso.

El líquido obtenido en la zona inferior de la columna presenta las siguientes características:

Tabla 5.6. Características del líquido de fondo de columna.

Magnitud	Líquido
Temperatura (°C)	245,86
Presión (atm)	2,61
Densidad (kg·m ⁻³)	561,33
Viscosidad (kg·m ⁻¹ ·s ⁻¹)	15,97·10 ⁻⁵
Conductividad térmica (W·m ⁻¹ ·°C ⁻¹)	0,084
Peso molecular (kg·mol ⁻¹)	166,09
Caudal molar (kmol·h ⁻¹)	1.643
Caudal másico (kg·h ⁻¹)	272.821
Caudal volumétrico (m ³ ·h ⁻¹)	486

⁵ Se puede referir al rehervidor en el presente proyecto como calderín, caldera o reboiler.

5.4.3.2 Requisitos de diseño.

En la selección del tipo de intercambiador, para realizar el cambio de estado de la corriente, se consideran los siguientes requisitos de diseño:

- Debe ser posible obtener una corriente de fondo de columna que no exceda 50 ppm de benceno en su composición.
- El área de intercambio de energía debe tener un tamaño considerable ya el caudal a tratar es elevado.
- El fluido de servicio debe ser eficaz, pero a su vez económico y respetuoso con el medio ambiente.

5.4.3.3 Tipos de rehervidores.

En la industria se puede encontrar diferentes tipos de equipos utilizados para la ebullición de los fluidos, sin embargo, para las operaciones de separación realizadas en una columna de rectificación se emplean, generalmente, dos tipos de rehervidores. Su funcionamiento se basa en poner en contacto una corriente de elevada temperatura, que procede de una fuente externa, con un líquido mediante una superficie de intercambio de energía para lograr la ebullición de la corriente líquida. Estos equipos se dividen dependiendo de su configuración y disposición en internos y externos.

a) Rehervidores internos.

Esta clase de rehervidores o calderínes se encuentran incorporados al fondo de la torre de separación como si de una extensión de ésta se tratase, lo que supone un incremento de las dimensiones de la columna. Una característica de este intercambiador que resulta ser una desventaja, es la cancelación temporal de la operación de separación para su limpieza.

b) Rehervidores externos.

Esta clase de calderínes presentan diversos tamaños y formas y se sitúan como equipos adyacentes a la columna. Entre éstos, los más utilizados son los rehervidores de carcasa y tubos [28] dentro de los cuales se presentan tres diferentes:

- **Termosifones horizontales o verticales.**

Se trata de un equipo que realiza la ebullición de la corriente líquida proveniente del último plato inferior de la columna de separación. Una fracción de este líquido admitido ebulle, y son enviados de vuelta a la columna, por medio de tuberías, tanto el vapor producido como el líquido que no ha llegado a cambiar de fase o estado.

- **Rehervidor de circulación forzada.**

Se trata de un equipo de funcionamiento similar al de los termosifones descritos en líneas anteriores. La diferencia radica en que este intercambiador utiliza bombas de impulsión para transportar el contenido total del líquido proveniente de fondo de columna hasta su entrada. De igual forma que el termosifón, devuelve a la columna fluido en forma de vapor y de líquido.

Ventajas:

- Se considera una etapa de equilibrio teórica.
- Aconsejado para operar con líquidos altamente viscosos que contienen sólidos.
- Proporciona un gran coeficiente de transferencia.

Desventajas:

- Altamente costoso debido a los tubos adicionales y alto número de bombas requeridas.
- Alto costo de operación.
- Amplia área de instalación.

- **Rehervidor externo tipo Kettle.**

En éste tipo de equipos, el producto líquido proveniente de fondos de columna se transporta al rehervidor mediante tuberías, a continuación realiza el intercambio de calor y devuelve a la columna una parte del fluido en una sola fase, en forma de vapor, y drenando la otra parte en forma de líquido. Su característica principal es que está conformado por los tubos y una cúpula que permite la separación de los fluidos de distinta fase.

Ventajas:

- Se considera como una única etapa teórica de equilibrio.
- Simple en cuanto a su mantenimiento.
- No tiene límite en la carga de vapor.
- Presenta dimensiones variadas.
- Es simple en cuanto al control requerido.
- Es capaz de operar con fluidos que presenten viscosidades mayores a $5 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$.

Desventajas:

- Alto costo de inversión debido a los tubos adicionales necesarios.
- Gran espacio necesario para su instalación.
- Sensible a los factores de ensuciamiento de los fluidos implicados.
- No puede utilizarse con determinados fluidos que tiendan a degradarse con altas temperaturas debido a los altos tiempos de residencia.

5.4.3.4 Selección del tipo de intercambiador.

Una vez analizados los diferentes tipos de rehervidores internos como externos, así como sus ventajas y desventajas, y debido a que se requiere una determinada composición de producto final del proceso de separación y una separación clara entre el vapor y el líquido calentados, los rehervidores externos son los más apropiados.

Este producto final, es el fluido único de alimentación del siguiente proceso que es motivo de otro estudio denominado Parte II: Torre de rectificación de parafinas.

En consecuencia y dirigido a cumplir los requisitos de diseño tomando en cuenta las propiedades del fluido con el que se opera, proveniente de la columna (Véase Tabla 5.6) se requiere proporcionar una elevada área de intercambio de calor, así como un fluido de trabajo adecuado y respetuoso con el medio ambiente como es el agua, el rehervidor Kettle es el indicado pues cumple con las expectativas de operación (Véase Figura 5.7).

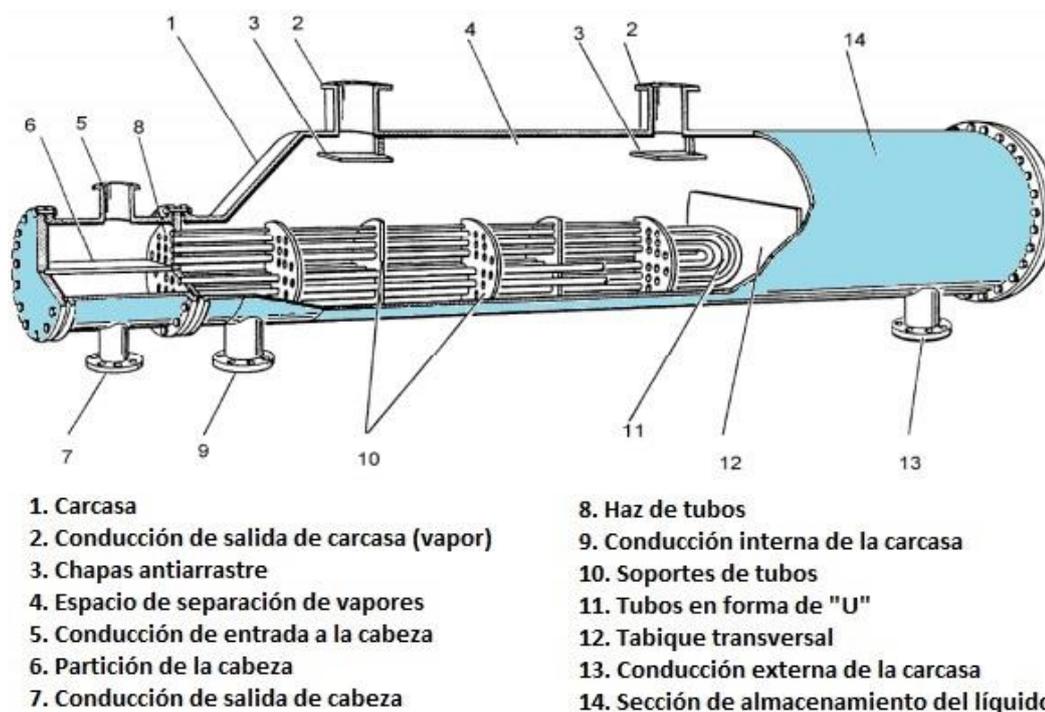


Figura 5.7. Rehervidor Kettle.

5.4.3.5 Características principales.

El rehervidor tipo Kettle contará con una configuración de carcasa-tubos de tipo 1-2 (un paso por carcasa y dos por tubos) y con aletas rectangulares transversales. El material de la carcasa es acero al carbono SA-285 C, el de los tubos acero al carbono SA-106 B, y el de las aletas aluminio.

La temperatura del fluido de servicio, vapor de agua de alta presión, es de 265,08 °C a 50,33 atm, con lo cual el líquido de entrada al rehervidor con una temperatura de 245,86°C captará el calor de éste alcanzando 253,21°C.

Cuenta con 90 tubos en forma de "U", 180 tubos en total, de 32 mm de diámetro externo dispuestos en 8 filas. La longitud de los tubos es 3,66 m y se sostienen, mediante soportes, en la carcasa inferior de diámetro externo 1,25 m la cual cuenta con una carcasa superior de diámetro externo de 1,70 m y 13 mm de espesor.

Los soportes externos de la carcasa son silletas del mismo material que ésta, localizados cerca de las líneas de tangencia de los cabezales y aguantados en cimentaciones que proporcionan estabilidad a la estructura. Los anteriores resultados se explican en Documento 2: Anexo B, y las características restantes del intercambiador se resumen en las tablas 5.7, 5.8 y 5.9.

5.4.3.6 Selección de la trayectoria de flujo.

Teniendo en cuenta las características de los fluidos, se procede a la determinación de la trayectoria que sigue cada uno, siguiendo las mismas pautas consideradas en el apartado 5.4.2.: La elevada presión y temperatura que porta el vapor de agua determinan a que éste sea conducido por los tubos del intercambiador, ya que si fluyera por el lado de la carcasa en esas condiciones, habrían serios problemas de corrosión en los materiales utilizados, por tanto, el líquido procedente de fondos de columna circulará por el lado de la carcasa.

5.4.3.7 Componentes.

- **Tubos.**

El fluido que circula por los tubos es el vapor de agua de alta presión. El material utilizado es acero al carbono SA-106 B debido a las elevadas temperaturas y tensiones que es capaz de resistir; se trata del mismo material utilizado en los tubos del aerorrefrigerador comentado anteriormente.

Las dimensiones de los tubos en "U" utilizados en el rehervidor diseñado, se seleccionan tomando en cuenta el gran caudal de líquido presente en la corriente de fondo de columna, por el cual, se requiere de una elevada área de intercambio, así como obtener una pérdida de presión igual o menor a 0,006 atm que se trata del valor inicial supuesto de caída de presión producido en cada plato en el diseño de la columna de separación equivalente a 0,010 atm por metro. Las características principales de los tubos se encuentran en la siguiente tabla:

Tabla 5.7. Características de los tubos del rehervidor.

Material	Acero al carbono SA-106 B
Diámetro interno (mm)	25
Diámetro externo (mm)	32
Calibre BWG	10
Pitch (mm)	79
Longitud (m)	3,66
Nº Tubos	180
Nº Filas	8
Velocidad fluido (m·s⁻¹)	3,97
Pérdida de carga (atm)	4·10 ⁻⁴

- **Aletas.**

Las aletas transversales de aluminio de las que dispone el cada tubo del rehervidor, permiten que el intercambio de calor sea el mayor posible. Hay que mencionar además que el aluminio puede colocarse en el lado de la carcasa del rehervidor ya que los compuestos de fondo no son corrosivos y ya que el aluminio tiene muy buena conductividad térmica, no es necesario el uso de otro material.

A pesar de que también podrían haberse utilizado aletas longitudinales ya que el rehervidor no posee deflectores si no soportes, se emplean en su lugar las aletas transversales debido a que el flujo de los fluidos implicados es en esencia en contracorriente.

Tabla 5.8. Características de las aletas del rehervidor.

Material	Aluminio
Altura (mm)	3
Espesor (mm)	1
Densidad (aletas·m⁻¹)	315
Eficacia (%)	89

- **Carcasa.**

La principal característica de este tipo de calderín, es que presenta dos diámetros, uno inferior y uno superior, pues debe presentar un espacio adecuado de cúpula para la separación del vapor y el líquido por encima del haz de tubos y una capacidad adicional que va más allá del vertedero cercano a la cubierta de la coraza.

En el diseño de la carcasa, se toman en cuenta tanto el gran caudal de vapor de agua necesario para realizar el cambio de fase del líquido obtenido en fondos, como del número elevado de tubos que proporcionan el área de contacto requerida entre las corrientes fluidas. Adicionalmente estará recubierto por aislante de lana de roca de densidad $100 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ con un espesor, calculado mediante el programa Insulan de la compañía CALORCOL [25] que a su vez se reviste de una placa de aluminio para protegerlo.

Este tipo de intercambiador, no utiliza placas deflectoras para producir turbulencia en el fluido externo a los tubos, sino que el haz de tubos está sumergido casi en su totalidad en el líquido a calentar.

La longitud total del intercambiador alcanza 9,30 m según las dimensiones comerciales de este tipo de equipos.

Tabla 5.9. Características de la carcasa del rehervidor.

Material	Acero al carbono SA-285 C
Diámetro externo superior (m)	1,70
Diámetro externo inferior (m)	1,25
Espesor (mm)	13
Espesor aislante (mm)	80
Pérdida de carga (atm)	$1\cdot 10^{-9}$

- **Cabezal de retorno y distribución.**

Los cabezales seleccionados para el intercambiador son de tipo flotantes removibles, A, con una cubierta sujeta mediante pernos en el espejo flotante, no se fija completamente debido a las dilataciones que se pueden producir en los tubos. Esta característica reduce el tiempo de las operaciones de mantenimiento durante la inspección y reparaciones.

- **Fluido de servicio.**

El vapor de agua es el fluido de servicio seleccionado para realizar la transferencia de energía, el cual entra a una temperatura de 265,08°C y sale a 263,21°C. La presión de ingreso es 50,33 atm y generalmente cuando se opera con este fluido, la pérdida de carga máxima es de 0,07 atm, pues bien, en este caso, el valor obtenido de máxima pérdida es de $4 \cdot 10^{-4}$ atm.

CAPÍTULO 6. Análisis de soluciones y resultados del Sistema de tuberías.

6.1 Introducción.

Este sistema se trata del conjunto de conducciones encargadas de transportar los fluidos entre los equipos involucrados en el presente proceso de separación de componentes, entre ellos se encuentra la columna de rectificación, el condensador, el rehervidor, el acumulador de reflujo y las bombas que impulsan las corrientes fluidas hacia su destino final.

Dichas conducciones incluyen accesorios en su estructura para que el fluido logre recorrer el camino desde un punto de partida hasta un punto determinado en la planta, el cual como es lógico, no es totalmente lineal, pues los tramos pueden cambiar de dirección de forma lateral como ascendente o descendente, o bien mezclarse o bifurcarse; así mismo, las conducciones cuentan con accesorios de control como son las válvulas.

6.2 Justificación.

Debido a que los equipos encargados de llevar a cabo la operación de separación están situados a distancias determinadas entre ellos, tanto por seguridad como por funcionalidad, es necesario el uso de tuberías que transporten los fluidos de alimentación como de producto en todo el sistema del proceso.

Las distancias que se fijan entre los equipos son establecidas por la seguridad exigida. Estos requisitos de seguridad son debidos tanto a los compuestos con los que se opera, como a las condiciones de operación de los fluidos como la presión y la temperatura, y las dimensiones de cada equipo.

Como punto de partida del proceso, la corriente líquida que proviene de la Torre de separación de ácido fluorhídrico debe transportarse hacia la torre diseñada, Unidad de Recuperación de Benceno, como fluido de alimentación (Línea 1).

Acto seguido y luego de realizar la operación de separación de componentes, la unidad diseñada origina dos corrientes de producto.

Por un lado, es necesario que el producto en estado vapor, obtenido en cabeza de columna, sea conducido hacia el condensador para convertirlo en líquido y poder transportarlo hacia el acumulador de reflujo. Así mismo, se solicita que dicho acumulador de reflujo suministre un caudal determinado a la columna de separación de benceno en forma de corriente de reflujo, y a su vez, que proporcione otra fracción de líquido almacenado, en forma de realimentación de reactivo principal, al reactor productor de LAB (Línea 2).

Y por otro lado, se requiere que el producto obtenido del fondo de columna, sea enviado al rehervidor con la finalidad de que luego de introducir en éste el líquido, y se convierta una parte en vapor, pueda transportarse una corriente en estado vapor que retorne a la columna de separación. Y por último, un producto líquido final que se dirija al siguiente proceso de separación estudiado en la Parte II: Torre de rectificación de parafinas (Línea 3) (Véase Figura 1.7 y Figura 4.5).

6.3 Normativa de diseño.

El código que se sigue para el diseño del sistema es el código ASME B31.3 del año 2004, el cual es una sección de "American Society of Mechanical Engineers Code for Pressure Piping, ASME B31".

6.4 Diseño del sistema de tuberías.

6.4.1 Método de resolución.

El sistema ha sido dividido por líneas de proceso con la finalidad de situar fácilmente las agrupaciones de tuberías en la planta. Las líneas a su vez se segmentan en conducciones, las cuales explican el recorrido que deben realizar las corrientes fluidas entre los equipos implicados en el proceso principal.

La Tabla 6.1 indica el origen y destino de las conducciones que conforman las líneas, así como el fluido transportado, y son definidas como sigue:

- Línea 1: Columna HF-Columna Benceno.
- Línea 2: Cabeza de columna vapor/líquido-Reactor Alquilación.
- Línea 3: Fondo de columna líquido/vapor-Columna de parafinas.

Tabla 6.1. Líneas y conducciones del sistema de tuberías.

Línea	Conducción	Origen	Destino	Fluido
1	1	Columna HF	Bomba (P-01 A/B)	Alimentación (F)
	2	Bomba (P-01 A/B)	Columna Benceno (T-01)	Alimentación (F)
2	3	Cabeza de columna (T-01)	Condensador (AC-01)	Producto de columna vapor (V)
	4	Condensador (AC-01)	Acumulador Reflujo (TK-01)	Producto condensado (L+D)
	5	Acumulador reflujo	Bomba (P-02 A/B)	Producto condensado (L+D)
	6	Bomba (P-02 A/B)	Cabeza de Columna (T-01)	Reflujo (L)
	7	Bomba (P-02 A/B)	Reactor de Alquilación	Destilado (D)
3	8	Fondo de columna (T-01)	Rehervidor (E-01)	Producto líquido (L _R)
	9	Rehervidor (E-01)	Fondo de Columna (T-01)	Vapor de retorno (V _R)
	10	Rehervidor (E-01)	Columna de Parafinas	Producto líquido final (W)

6.4.2 Requisitos de diseño.

Los requisitos de diseño vienen dados por las propiedades y características que presenta cada corriente fluida, es decir, temperatura, presión, caudal volumétrico, capacidad corrosiva y velocidad recomendada de flujo.

En la Tabla 6.2 se muestran las velocidades recomendadas para cada tipo de flujo.

Tabla 6.2. Velocidad recomendada de flujo en tuberías [13].

Fluido	Tipo de flujo	Velocidad ($m \cdot s^{-1}$)
Líquidos poco viscosos	Flujo por gravedad	0,15-0,30
	Entrada de bomba	0,30-0,90
	Salida de bomba	1,20-3,00
	Línea de conducción	1,20-2,40
Líquidos viscosos	Entrada de bomba	0,06-0,15
	Salida de bomba	0,15-0,60
Vapor de agua		9,00-15,00
Aire o gas		9,00-30,00

6.4.3 Características de tuberías.

Todas las tuberías que conforman este sistema serán de acero al carbono SA-106 B sin costuras porque este material es capaz de resistir temperaturas de hasta de hasta 427°C, así como las grandes tensiones, siendo la mínima tensión que resiste de 4.083 atm [24].

Los diámetros nominales utilizados, dependiendo del caudal y características del fluido, van desde 64 mm a 610 mm con diferentes espesores de pared o números de Schedule.

Las longitudes que presentan son muy variadas dependiendo de la distancia del recorrido de cada conducción.

El aislante empleado en las conducciones es de fibra de vidrio para minimizar las variaciones de temperatura en los fluidos y su espesor depende de las propiedades que caracterizan al fluido.

6.4.4 Accesorios de tuberías.

- **Juntas.**

Los métodos que se utilizan para unir tuberías dependen en parte de las propiedades del material de construcción, pero sobre todo del espesor de pared. Los productos tubulares de pared gruesa, se conectan entre sí por medio de

accesorios roscados, bridas o soldadura. Las piezas de pared delgada se unen por soldadura, compresión o accesorios cónicos.

Debido a que en el presente sistema de tuberías, éstas presentan diámetros mayores a 51 mm, su conexión se realiza por medio de bridas o soldadura. Las bridas son dos discos iguales o anillos de metal, unidos mediante tornillos que comprimen una junta que está situada entre sus caras. Las bridas se unen a la tubería por soldadura, y no por rosca, debido a las altas presiones que solicita el proceso de separación de componentes, proporcionando uniones más fuertes que los accesorios roscados, no debilita la pared de la tubería y produce una unión hermética (Figura 6.1.a).

- **Soportes.**

Se trata de dispositivos para expansión de las tuberías, los cuales son utilizados porque las conducciones están sometidas a variaciones de temperatura. Estas variaciones producen expansiones y contracciones, y si la tubería estuviera fijada rígidamente a los soportes, podría desprenderse, curvarse o romperse, es por eso que las conducciones largas no emplean soportes fijos sino que se colocan sobre anillos o se suspenden por medio de cadenas o varillas (Figura 6.1.b)

- **Codos.**

Se trata de accesorios que tienen una forma tal que son capaces de desviar el flujo del fluido un determinado número de grados. Los grados de desviación de la dirección de flujo inicial les concede su denominación, con lo cual se tienen codos de 30° a 90°. A su vez, estos pueden presentar radios de curvatura cortos y largos (Figura 6.1.c)

Los codos que se van a emplear en el presente diseño de tuberías, son los de 45° y 90° con radio de curvatura largo para que el efecto producido por el cambio de dirección sea menor y por tanto, también menor la pérdida de carga.

- **Reducciones.**

Las reducciones son accesorios de forma cónica que permite la conexión entre dos tuberías de diámetros distintos, permitiendo una disminución o incremento de la sección con la menor pérdida de carga posible (Figura 6.1.d).

- **Tes.**

Se trata de un accesorio que permite dividir una corriente en dos o más direcciones con flujos distintos. Su nombre es debido a la forma que presenta la bifurcación más simple, forma de "T" (Figura 6.1 e.).

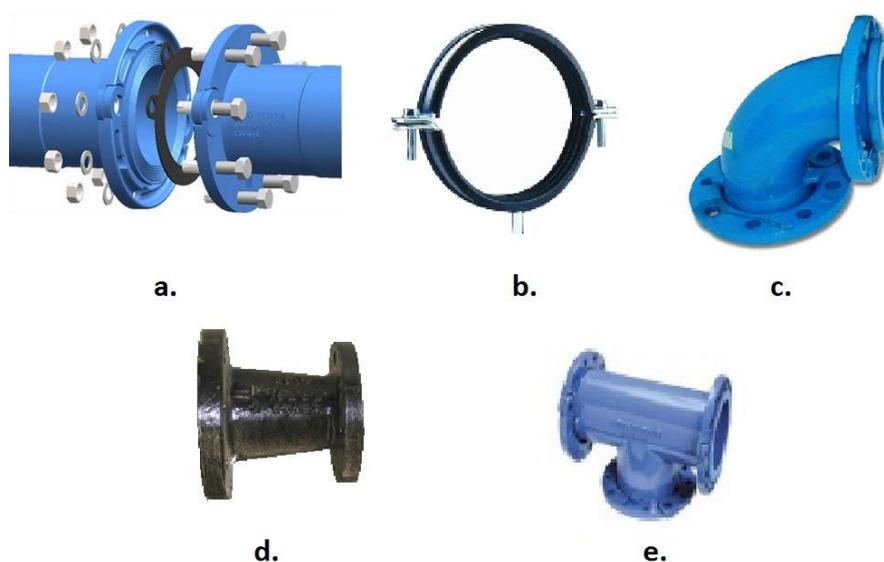


Figura 6.1. Accesorios de tuberías

- **Válvulas.**

El propósito de las válvulas es controlar o detener el flujo del fluido, presentando tamaños y formas diversas [14], dentro de las cuales se mencionan solo 3 tipos, debido a que son las que se utilizarán en éste sistema de conducciones:

Válvulas de globo.

Estas válvulas son también llamadas de asiento, y reciben su nombre debido a la forma esférica de los primeros modelos utilizados. Éstas son ampliamente utilizadas para controlar la velocidad de flujo de un fluido. Su funcionamiento se basa en la circulación del fluido a través de una pequeña abertura y la producción de una pérdida de presión apreciable en el fluido al cambiar varias veces de dirección para controlar el caudal (Figura 6.2 a.).

Válvulas de retención.

Este tipo de válvulas permiten el flujo del fluido en una única dirección. Ésta se abre debido a la presión del fluido que circula en una determinada dirección, cuando el flujo se detiene y tiende a invertirse, la válvula se activa bien por medio de la gravedad o por medio de un resorte que ejerce presión sobre el disco (Figura 6.2.b)

Válvulas de compuerta.

Estas válvulas son también llamadas de compuerta o de asiento, pues tienen un disco en forma de cuña que se adapta a un asiento de la misma forma y son adecuadas para abrir o cerrar completamente una conducción. Cuando se abre la válvula, el disco se eleva dentro del cabezal hasta que queda completamente fuera de la trayectoria del fluido, por consiguiente, introduce una pérdida baja de presión. Y al contrario, al cerrar la válvula, la conducción queda totalmente obstruida por el disco (Figura 6.2.c)

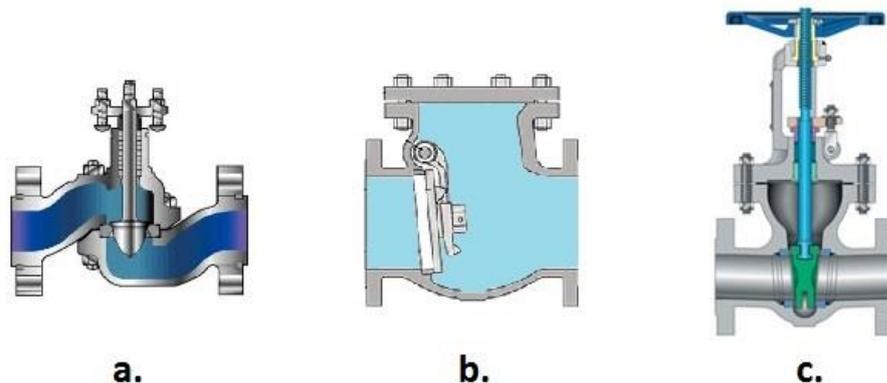


Figura 6.2. Válvulas.

6.4.5 Diseño de conducciones.

A continuación se muestran los resultados obtenidos de los cálculos realizados para el diseño de las conducciones, los cuales se explican en Documento 2: Anexo C. Se presentan las dimensiones de las tuberías y los accesorios necesarios en cada una de éstas.

Línea 1: Torre HF-Columna Benceno.

Tabla 6.3. Características Línea 1.

Conducción	1 y 1'	2 y 2'
Diámetro interno (mm)	295	248
Diámetro nominal (mm)	305	254
Espesor (mm)	14	13
Espesor aislante (mm)	80	80
Longitud (m)	10	53
Velocidad fluido ($m \cdot s^{-1}$)	0,69	0,97
Pérdida de carga (m)	0,05	0,59

La conducción 1 y la conducción 2 han sido divididas cada una en dos idénticas (1 y 1', 2 y 2') para facilitar la impulsión del fluido mediante bombas en paralelo.

LÍNEA 2: Cabeza de columna vapor/líquido-Reactor de Alquilación.

Tabla 6.4. Características Línea 2.

Conducción	3	4	5	6	7
Diámetro interno (mm)	346	97	102	59	78
Diámetro nominal (mm)	356	102	102	64	76
Espesor (mm)	5	9	6	7	5
Espesor aislante (mm)	80	30	30	30	30
Longitud (m)	50	57	43	68	83
Velocidad real ($m \cdot s^{-1}$)	19,69	2,00	0,65	1,95	1,99
Pérdida de carga (m)	77,50	2,86	0,22	5,91	5,50

LÍNEA 3: Fondo de columna líquido/vapor-Torre de parafinas.

Tabla 6.5. Características Línea 3.

Conducción	8	9	10
Diámetro interno (mm)	295	373	491
Diámetro nominal (mm)	305	406	457
Espesor (mm)	14	17	19
Espesor aislante (mm)	80	100	80
Longitud (m)	34	34	30
Velocidad real ($m \cdot s^{-1}$)	1,97	19,38	0,69
Pérdida de carga (m)	1,85	64,10	0,05

En la Tabla 6.6 se indican las unidades de los accesorios empleados en cada conducción, siendo C1: Conducción 1 y 1', C2: Conducción 2 y 2', C3: Conducción 3, de igual forma para las 10 conducciones; y V.: Válvula.

Tabla 6.6. Accesorios en tuberías.

Conducción Accesorio	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
Codo de 90°	1	5	6	6	4	5	0	6	6	3
Reducciones	1	1	0	0	1	1	0	1	1	0
Tes	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0
V. Compuerta	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0
V. de Globo	0	1	0	0	0	1	1	1	0	0
V. de Retención	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0

CAPÍTULO 7. Análisis de soluciones y resultados de los Sistemas de Impulsión.

7.1 Introducción.

Los sistemas de impulsión son los medios que producen el flujo de fluidos. A estos sistemas pertenecen los equipos encargados de suministrar energía mecánica a una corriente fluida.

La energía mecánica asocia la energía potencial y la energía cinética, las cuales aportan velocidad al fluido así como altura en base a un punto de referencia. Sin embargo, el material de las conducciones o tuberías por medio de las cuales se transportan las corrientes de fluido, no es una superficie lisa, sino que presenta cierta rugosidad que produce una resistencia al flujo, fuerza de rozamiento, al realizarse el contacto con el fluido.

La fuerza de rozamiento lleva asociado un coeficiente que depende del material del que se compone la tubería, y mediante el cual se puede determinar la fuerza necesaria que venza este rozamiento para permitir un flujo determinado de fluido. Para conocer la fuerza requerida de impulsión, se necesitan conocer las características iniciales del fluido a transferir, y las características que se pretenden conseguir como la presión, la velocidad o la distancia al punto de destino.

Los equipos utilizados serán bombas de impulsión debido a que los fluidos que se quieren transportar se encuentran en fase líquida.

7.2 Justificación.

Los sistemas de impulsión son muy importantes en el funcionamiento de la planta, pues al situar los diferentes equipos involucrados en la recuperación de benceno a distancias concretas, es necesario impulsar los fluidos de un punto a otro e incluso a distintos niveles o alturas para que se pueda completar el proceso.

Las 3 líneas y conducciones asociadas a éstas que son Línea 1: Torre HF-Columna Benceno, Línea 2: Cabeza de columna vapor/líquido-Reactor LAB y Línea 3: Fondo de columna líquido/vapor-Torre de parafinas, descritas en el Capítulo 6, conducen tanto alimentación como productos de la unidad de recuperación de benceno. Los fluidos obtenidos o bien se transportan por la presión que adquieren debido a la temperatura suministrada por los equipos, como las corrientes de vapor, o bien requieren de la fuerza suministrada por los equipos de impulsión que se determinan a continuación.

7.3 Normativa de diseño.

El código consultado para el diseño del sistema de impulsión es el de la norma API 610 "Centrifugal Pumps for Petroleum, Petrochemical and Natural Gas Industries" del año 2.003.

7.4 Diseño del sistema de impulsión.

7.4.1 Método de resolución.

El sistema de impulsión se acopla a la división realizada para el sistema de tuberías de la planta. Las bombas se sitúan entre dos conducciones con la finalidad de impulsar el fluido hasta un punto final designado.

Por un lado, la alimentación (F) va a transportarse, mediante una bomba (P-01 A/B), desde la Columna de HF hacia la unidad de recuperación de benceno (T-01), en forma de fluido de ingreso, para iniciar el proceso en estudio.

Por otro lado, el fluido que egresa del acumulador de reflujo (TK-01), va a suministrarse en forma de corriente de reflujo (L), mediante otra bomba (P-02 A/B) directamente hacia la columna de benceno (T-01), y en forma de destilado (D), mediante otra bomba hacia el reactor de alquilación (Véase Figura 1.7 y Figura 4.5).

La tabla siguiente indica la bomba, el origen, el destino y el fluido a transportar por cada una.

Tabla 7. 1. Sistema de impulsión.

Bomba	Origen	Destino	Fluido
P-01 A/B	Columna HF	Columna de benceno (T-01)	Alimentación (F)
	Conducción 1	Conducción 2	
P-02 A/B	Acumulador reflujo (TK-01)	Columna de benceno (T-01)	Reflujo (L)
	Conducción 5	Conducción 6	

7.4.2 Requisitos de diseño.

El requisito que debe cumplir el sistema de impulsión es garantizar que el fluido llegue a destino a la velocidad, presión y altura requeridas.

7.4.3 Selección del tipo de bomba.

A pesar de que existen muchos tipos de bombas, las más utilizadas en la industria son las centrífugas por su versatilidad, gran capacidad de impulsión y por las diferentes configuraciones que puede adoptar para proveer mayor caudal o mayor altura [29].

Sus ventajas son: Construcción sencilla, sin válvulas en el cuerpo de la bomba, coste inicial y mantenimiento bajo, y aptas para líquidos con sólidos en suspensión.

Sus desventajas: No proporciona presiones elevadas, tienen bajo rendimiento con líquidos viscosos, y solo operan a un alto rendimiento en un intervalo reducido.

Debido al gran caudal que es necesario aportar a la unidad de recuperación de benceno y gran altura a la que debe llegar el fluido, las bombas centrífugas de etapa simple son las elegidas. Puede verificarse cuantitativamente en el anexo a la memoria dedicado al sistema de impulsión.

Los parámetros que se tienen en cuenta para la selección de la bomba son: Características del fluido incompresible, altura efectiva, potencia y altura neta positiva de succión de la bomba.

7.4.4 Parámetros característicos.

A continuación se indican las características del fluido a impulsar, la altura efectiva, potencia y el NPSH disponible para cada equipo.

Tabla 7. 2. Parámetros característicos de las bombas de impulsión.

		P-01 A/B	P-02 A/B
Fluido	Caudal ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	0,047	0,005
	Densidad ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	652,00	779,55
	Viscosidad ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)	$27,38 \cdot 10^{-5}$	$23,91 \cdot 10^{-5}$
	Presión de vapor (atm)	2,35	2,17
Altura efectiva (m)		29,40	41,39
Potencia (kW)		8,83	1,58
NPSH_d (m)		1,75	2,00

La bomba P-01 A/B está conectada en paralelo a una idéntica, pues se ha dividido el caudal de la alimentación en dos corrientes por su elevado valor.

Las dos bombas principales (A) se conectan con sus respectivas bombas de respaldo (B).

- **Características del fluido.**

El carácter corrosivo de los fluidos, la temperatura y la presión de trabajo, son decisivos del material que constituye la bomba, pues requieren de mayor o menor resistencia de éste a las condiciones en las que se opera. A su vez, la viscosidad y densidad del fluido, afectan directamente a la velocidad de impulsión, presión, altura y potencia de la bomba por el aumento de la resistencia al flujo a mayores valores.

En relación con la bomba P-01 A/B, la temperatura del líquido, 172,28°C, su presión 2,47 atm, su densidad y su carácter no corrosivo permiten operar con la bomba centrífuga de acero al carbono como componente.

La bomba P-02 A/B, de temperatura 106,03°C y una presión de 2,09 atm, igualmente, permite trabajar con una bomba centrífuga de acero al carbono como componente.

- **Altura efectiva.**

Es la presión efectiva o carga total que debe aportar el equipo para vencer la resistencia de flujo, presiones y los desniveles en la localización y recorrido.

- **Altura neta positiva de succión NPSH (Net Positive Suction Head).**

Es la diferencia entre la energía que tiene el fluido en la toma de aspiración y la energía que tiene debida a su presión de vapor.

El NPSH disponible debe tener un valor mayor al de la altura neta positiva de succión requerida por el equipo, así se evitan problemas de cavitación y el consecuente deterioro de la bomba.

Cavitación: Es el fenómeno por el cual el líquido empieza a formar burbujas debido a que la presión ambiente disminuye hasta tal punto, que alcanza el valor de la presión de vapor del fluido, y se produce el burbujeo. Es frecuente en sistemas hidráulicos donde se dan cambios bruscos de velocidad del fluido, como es el caso de los rotores de las bombas. Dichas burbujas de vapor, ocupan mayor volumen, reducen el flujo de líquido, se dirigen hacia la zona de menor presión y condensan produciendo ondas de choque que consiguen desprender partículas de las superficies. Es por esta razón que se debe prestar atención al NPSH disponible de los equipos y asegurar que la presión sea mayor que la de vapor del fluido.

7.4.5 Características de las bombas.

Las bombas se han seleccionado mediante los parámetros definidos anteriormente y el programa facilitado por la página Web de Goulds Pumps.

La altura neta positiva de succión disponible calculada, debe tener un valor mayor al de la altura neta positiva de succión requerida por el equipo, así se evitan problemas de cavitación y el consecuente deterioro de la bomba.

Los resultados son los siguientes:

Tabla 7. 3. Características de las bombas de impulsión.

	P-01 A/B	P-02 A/B
Modelo	Goulds Pumps 3620 8X10-13B	Goulds Pumps API 3171 1X1,5-8
Velocidad angular (rpm)	1.485	2.930
Potencia (kW)	11,63	2,91
Frecuencia (Hz)	50	50
Eficiencia (%)	75,5	54,5
NPSHr (m)	1,01	1,58

CAPÍTULO 8. Análisis de soluciones y resultados del Acumulador de Reflujo.

8.1 Introducción.

El acumulador de reflujo se trata de un recipiente a presión que recibe el líquido proveniente del condensador y se encarga de su almacenamiento temporal con el objetivo de distribuir dos corrientes de flujo diferentes, una que se dirige hacia el reactor encargado de la producción de LAB, y otra que se dirige en forma de reflujo hacia la columna de separación.

Por otra parte, mediante este recipiente se suministra únicamente una corriente líquida a las bombas empleadas en la impulsión de las corrientes. Esto es necesario debido a que si estas bombas operaran con una fracción de fluido en fase vapor, se produciría la cavitación en su interior y el consecuente deterioro del material del que se conforman viéndose afectados tanto su funcionamiento como su tiempo de vida útil.

8.2 Justificación.

Primero, y como su nombre lo indica, es el responsable de almacenar un tiempo determinado y enviar una fracción de caudal de líquido contenido hacia la columna de separación mediante las vías correspondientes y una bomba de impulsión, con el propósito de poner nuevamente en contacto una corriente en fase líquida con una en fase vapor y realizarse el proceso de separación de componentes.

Segundo, se ocupa de acumular y dar salida como producto final de proceso, a otra fracción de líquido que, impulsado por una bomba y sus conducciones pertinentes, adquiera la denominación de destilado del proceso de separación y sea la corriente que realimente al reactor productor de LAB de un reactivo principal como es el benceno.

8.3 Normativa de diseño.

El código seguido para el diseño del sistema de impulsión es el código ASME Sección VIII-División I. con denominación "Boiler and Pressure Vessel Code" correspondiente al año 2.004, así como el Reglamento Español de Recipientes a Presión Capítulo IV.

8.4 Diseño del acumulador de reflujo.

8.4.1 Corriente de ingreso.

Tabla 8.1. Características de la corriente de ingreso del acumulador de reflujo.

Temperatura de diseño (°C)	126,03
Presión de diseño (atm)	4,07
Densidad del líquido (kg·m⁻³)	779,55
Viscosidad del líquido (kg·m⁻¹·s⁻¹)	23,91·10 ⁻⁵
Peso molecular del líquido (kg·kmol⁻¹)	78,22
Caudal molar (kmol·h⁻¹)	519
Caudal volumétrico (m³·h⁻¹)	52

8.4.2 Tipos de recipientes.

Esta clase de contenedores pueden ser de dos tipos según su forma, esféricos y cilíndricos [30]. Ambos recipientes son empleados, habitualmente, para almacenar grandes volúmenes de fluidos a altas presiones.

a) Recipientes esféricos.

Por lo que se refiere a la forma esférica que toman los cuerpos al ser sometidos a presión, ésta sería la configuración más económica para almacenar éstos fluidos, no obstante, la fabricación de los recipientes esféricos es más costosa en comparación a los de configuración cilíndrica.

Su capacidad es muy diversa, puede resistir presiones desde 0,68 atm a 13,61 atm para recipientes menores y desde 68,05 atm a 1.701,15 atm para recipientes mayores.

b) Recipientes cilíndricos.

En cuanto a los recipientes cilíndricos, pueden adoptar una orientación vertical u horizontal, y ser recipientes abiertos o cerrados según los requerimientos del fluido a almacenar.

Los acumuladores abiertos se emplean, generalmente, para dosificar operaciones donde los materiales pueden ser decantados, como desecadores o reactores químicos.

Los acumuladores cerrados, se emplean para fluidos combustibles, tóxicos o con componentes volátiles o peligrosos. Estos a su vez pueden ser de fondo plano o con cabeza y fondo formados.

Los cilindros de fondo plano que operan a presión atmosférica, poseen un techo cónico y se posan en una cimentación compuesta de arena, grava o piedra triturada. En caso de que éste suministre fluidos por gravedad, se incorpora mediante columnas y vigas de acero para obtener determinada altura.

Los cilindros de fondos formados se emplean para resistir mayores presiones que los de fondo plano. Los fondos pueden presentar varias formas: elipsoidal, esférica, semiesférica, cónica o torisférica (Ver apartado 4.7.4: Fondos).

En cuanto a sus soportes, para volúmenes de líquido de hasta $3,79 \text{ m}^3$ son aconsejables solamente patas y para volúmenes entre $3,79$ y $37,85 \text{ m}^3$ los recipientes deben sustentarse mediante una cimentación de hormigón y disponer de una orientación horizontal, mientras que para volúmenes superiores a $37,85 \text{ m}^3$ son aconsejables los recipientes verticales también soportados por una cimentación de hormigón.

8.4.3 Selección del tipo de recipiente.

Luego de analizar los diferentes tipos de recipientes que se pueden emplear en el almacenamiento de fluidos a presión, y considerando tanto las propiedades del líquido (Véase Tabla 8.1) como la economía de la planta, se opta por un recipiente cilíndrico de fondos formados.

El acumulador posee fondos toriesféricos de tipo Klopper debido a la presión de diseño moderada 4,07 atm no mayor a 6,77 atm, una temperatura de 126,03 °C no mayor a 350°C y una relación longitud-diámetro de 6,03 no mayor a 10.

8.4.4 Características del acumulador de reflujo.

El acumulador de reflujo tiene forma cilíndrica y disposición horizontal, posee, tanto el fondo como la cabeza, fondos de tipo toriesférico Klopper y está hecho de acero al carbono SA-285 C, debido a que éste es el material utilizado para recipientes a presión con baja y media tensión [24]. Dicho material se caracteriza por su buena soldabilidad y gran resistencia a bajas y altas temperaturas de hasta 427 °C, así como a una tensión entre 3.743 atm y 5.103 atm.

Cuenta con un aislamiento de lana de roca para evitar las variaciones de temperatura del fluido con un espesor de 60 mm.

Sus características se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 8.2. Características del acumulador de reflujo.

Material de carcasa y fondos	Acero al carbono SA-285 C
Diámetro externo (m)	1,84
Espesor de pared (mm)	8
Espesor aislante (mm)	60
Longitud (m)	11,77
Capacidad (m³)	30,18
Volumen líquido (m³)	26,06

8.4.5 Componentes.

- **Carcasa.**

La determinación del volumen necesario del recipiente tiene en cuenta tanto el caudal de líquido que recibe, como el tiempo de residencia de éste, así como que el líquido recibido no ocupe más de un 90% del volumen total del acumulador. En este caso, se considera un tiempo de residencia de 30 minutos (0,5 h) ya que solamente se retiene el líquido un corto período de tiempo para luego ser enviado a destino.

Así mismo, cabe señalar que el factor de corrosión para un tiempo de vida útil del equipo de 10 años cuenta con un valor igual a 1 mm causando que el espesor de la carcasa según las condiciones de diseño sea de 8 mm.

Está recubierto externamente por una capa de 60 mm de espesor del aislante lana de roca de densidad $100 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. El cual, ha sido calculado mediante el programa Insulan de la compañía CALORCOL [25].

- **Fondos.**

Cada fondo toriesférico Klopper posee un diámetro interno igual al de la carcasa, es decir, 1,83 m con una altura de 0,37 m. El espesor de cada fondo será el mismo que tiene la carcasa, 8 mm, para que el recipiente tenga uniformidad.

- **Soportes.**

El soporte utilizado por el acumulador, se trata de una cimentación de hormigón por tener un volumen mayor a $3,78 \text{ m}^3$.

- **Abertura de inspección.**

Al tratarse de un recipiente a presión y con un diámetro mayor a 0,91 m la abertura de inspección debe contar con una boca de hombre de 0,38 m de diámetro interno o bien dos boquillas de 0,15 m, seleccionado simplemente una boca de hombre de 0,38 m de diámetro interno.

CAPÍTULO 9: Análisis de soluciones y resultados de Instrumentación y control de la unidad.

9.1 Introducción.

Un proceso consiste en un sistema de operaciones que se efectúan por etapas, que pueden ser simultáneas o consecutivas pero siguiendo un determinado orden, con la finalidad de conseguir un producto o resultado final. Dicho orden, requiere del control de algunas actividades para alcanzar un propósito.

El proceso mediante el que se obtiene Sulfonato de Alquilbenceno Lineal (LAS) está compuesto por varias operaciones, de las cuales, la separación de benceno y a su vez la concentración de la materia prima Alquilbenceno Lineal (LAB), forman una fase imprescindible en la fabricación del surfactante.

La Unidad de Recuperación de Benceno se considera también un proceso ya que está compuesta por diversos equipos interconectados que deben estar controlados para un correcto funcionamiento. El sistema de control empleado en éste proceso para la monitorización de las diferentes variables como el caudal, la temperatura, la presión, el nivel o la composición, es estudiado en este apartado.

Mediante el control de los procesos se pretende asegurar la calidad del producto final, así como la seguridad de la operación, la economía del proceso y el respeto al medio ambiente cumpliendo con la normativa establecida.

9.2 Variables de operación.

Existen varios tipos de variables de operación, unas que pueden controlarse, otras que pueden manipularse y otras que son perturbaciones que ingresan al sistema de control y alteran su funcionamiento.

En el proceso de recuperación de benceno, las variables que pueden controlarse dependiendo de los equipos son la temperatura, la presión y los niveles de líquido; las variables que pueden manipularse son los caudales; y las

perturbaciones serán la composición, caudal y temperatura de la alimentación, así como la presión y temperatura de los fluidos de servicio.

Es necesario aclarar que el objetivo del control de las variables es mantenerlas en un punto de consigna (*set point*) y corregir las variaciones que puedan suceder. Esto se consigue con la instrumentación adecuada, que se encarga de indicar las magnitudes de las variables operacionales y transmitir la información hasta los controladores.

9.2.1 Temperatura.

Una magnitud física como es la temperatura y su control, es fundamental para la operación de separación ya que ésta se produce por la diferencia de volatilidades de los componentes. Es necesario tanto un aporte de energía en forma de calor con la finalidad de que esta diferencia de volatilidades se haga evidente, como el enfriamiento para promover el cambio de fase de vapor a líquido de corrientes determinadas.

El control de temperaturas es importante tanto en la alimentación de la columna de separación, para asegurar su entrada como líquido saturado proporcionando las condiciones necesarias para la correcta separación de componentes; como en el rehervidor para garantizar que exista la corriente de vapor y producto. De la misma manera, debe controlarse la temperatura en la corriente de salida del aerorrefrigerador asegurar que el reflujo adquiera las condiciones requeridas.

9.2.2 Presión.

La presión es una variable tan importante como la temperatura, pues su valor define también la volatilidad de los compuestos.

La supervisión de esta variable se realizará principalmente en la columna de separación, pues ésta condiciona que se alcance el rendimiento deseado en la separación de componentes mediante el efecto directo en la temperatura de volatilización.

9.2.3 Caudal.

Es fundamental el control del caudal en el proceso, ya que todos los equipos están condicionados por las corrientes fluidas que entran o salen de ellos. El control del caudal debe efectuarse principalmente en la alimentación de la columna y en la corriente de reflujo que retorna a ésta, pues son líquidos primordiales en el proceso de fraccionamiento desarrollado en la columna.

9.2.4 Composición.

La composición de los productos debe ser controlada para obtener el nivel de calidad deseado.

Un requisito del diseño de la Unidad de Recuperación de Benceno es la separación del benceno presente en la corriente de alimentación de forma que no sobrepase de 50 ppm de éste compuesto en el producto obtenido en fondo de columna, por lo que se controlan las composiciones en la corriente de destilado y en la de residuo.

9.3 Lazos de control.

El sistema de control es una interconexión de componentes que forman una configuración del sistema que proporcionará una respuesta deseada. La configuración puede ser de dos tipos, en lazo abierto o en lazo cerrado [31].

9.3.1 Lazo abierto.

El sistema en lazo abierto utiliza un regulador o actuador de control para obtener una respuesta deseada, sin embargo no es adecuado para el proceso de separación, ya que no compara la respuesta de salida con la que se desea obtener.

9.3.2 Lazo cerrado.

En cambio, el sistema en lazo cerrado utiliza la medida de la salida real, la compara con la respuesta requerida y usa la diferencia como un medio de control mediante el cual se ejercerá cierto poder sobre las variables.

El modo de actuación puede ser de dos tipos, el control regulatorio básico o control por realimentación, y el control regulatorio avanzado o control anticipativo en cascada y multivariable.

9.3.2.1 Control regulatorio básico.

El lazo cerrado, realiza el control del proceso mediante la realimentación de la señal de salida con el objetivo de minimizar los errores, así como los efectos de la variación de parámetros no deseados o perturbaciones, mediante la actuación del regulador sobre un elemento final de control. Como se ha comentado anteriormente, su finalidad es mantener un determinado valor de la variable sobre la que se actúa.

9.3.2.2 Control regulatorio avanzado.

Se trata de una estrategia avanzada con lazos complejos que añaden un control anticipativo y niveles jerárquicos para optimizar el sistema.

El lazo anticipativo en cascada, se trata de una combinación de dos lazos cerrados, en la que uno de éstos realiza la función de lazo primario actuando sobre el secundario y estableciendo su *set point*. Cabe destacar que el *set point* del lazo primario lo establece el operario.

El lazo de control multivariable opera de la misma forma que el anticipativo en cascada, con la diferencia de que el lazo primario actuará sobre diversas variables y recibirá información (retroalimentación) procedente de variables que guarden relación con éstas.

9.4 Control del proceso.

Para el estudio de control, se va a realizar la división del sistema en líneas de proceso. Estas líneas se tratan de las mismas que han sido definidas en el Capítulo 6 de este mismo documento (Tabla 6.1):

- Línea 1: Torre HF-Columna Benceno.
- Línea 2: Cabeza de columna vapor/líquido-Reactor LAB.
- Línea 3: Fondo de columna líquido/vapor-Torre de parafinas.

9.4.1 Control de la Línea 1.

La línea 1 transporta mediante una bomba (P-01 A/B) a la corriente de alimentación desde la columna de ácido fluorhídrico (Columna de HF) hasta la columna de benceno (T-01).

Lazo 1: Cerrado.

Es el lazo perteneciente a la Conducción 2 que cuenta con una bomba principal, una de respaldo (P-01 A/B) y una válvula de regulación de caudal (V-01). Al caudal designado de alimentación (Set Point 1: SP1)⁶, se le realiza la medida que luego es transferida por el transmisor de caudal, FT⁷, hacia el controlador, FC⁸, que actúa directamente sobre la válvula (V-01), la cual ampliará o disminuirá su apertura con el objetivo de asegurando la velocidad de la corriente (Figura 9.1).

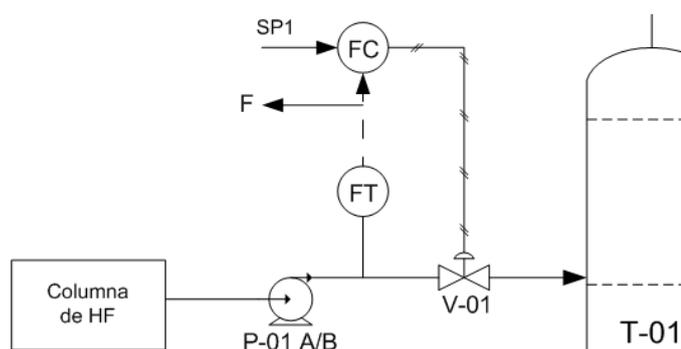


Figura 9.1. Lazo de control 1.

El transmisor de caudal, a su vez, entrega el dato del caudal de alimentación (F), que recorre la corriente de entrada a la columna de separación, hacia los controles anticipativos de proporción (Reflujo/Alimentación, Vapor/Alimentación) para que éstos realicen las modificaciones pertinentes en sus corrientes.

⁶ Set point: Punto de consigna.

⁷ FT: Flow Transmitter.

⁸ FC: Flow Controller.

9.4.2 Control de la Línea 2.

La línea 2 transfiere el vapor de cabeza de columna hacia el aerorrefrigerador (AC-01) para cambiar su fase, convirtiéndolo en líquido, el cual se almacena en el acumulador de reflujo (TK-01) para luego ser bifurcado en dos corrientes. La primera corriente se impulsa por una bomba (P-02 A/B) retornando a columna en forma de reflujo. La segunda corriente se impulsa hacia el Reactor de alquilación como producto destilado.

Lazo 2: En cascada.

Este lazo es incluido en la Conducción 3. El controlador de caudal de aire del aerorrefrigerador, FC (lazo secundario), sobre el cual actúa el controlador de presión, PC⁹ (lazo primario), que se sitúa en cabeza de columna, activándose en la situación en que la presión en columna se modifique, produciendo mayor o menor flujo de aire, con ayuda de los ventiladores, para corregirlo (Figura 9.2)¹⁰. Es necesario añadir, que la columna cuenta con una válvula de alivio (V-06) que actúa en caso de sobrepasar el límite establecido de presión.

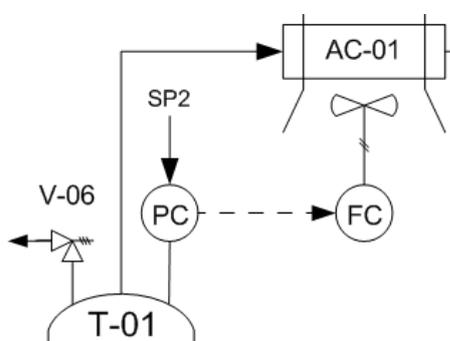


Figura 9.2. Lazo de control 2.

Lazo 3: En cascada.

Lazo incluido en la Conducción 7 de destilado, en el que se supervisa el nivel de líquido del acumulador de reflujo mediante un controlador, LC¹¹ (lazo primario), al que se le designa el valor máximo que puede alcanzar el volumen del líquido (SP3) que se trata del 90% del volumen del recipiente. El lazo

⁹ PC: Pressure Controller.

¹⁰ Se debe tener en cuenta que las figuras son una simplificación del sistema de control. Cada controlador (XC) está compuesto por el transmisor correspondiente (XT), el controlador en sí (XC), y el dispositivo convertidor de señal electrónica en presión neumática (I/P) que se encarga de actuar directamente sobre la válvula. Ejemplo: FC: FT+FC+I/P.

¹¹ LC: Level Controller.

primario actúa sobre el controlador de caudal, FC, ejerciendo influencia directa sobre la válvula (V-03) para que esta deje circular mayor o menor caudal de fluido (Figura 9.3).

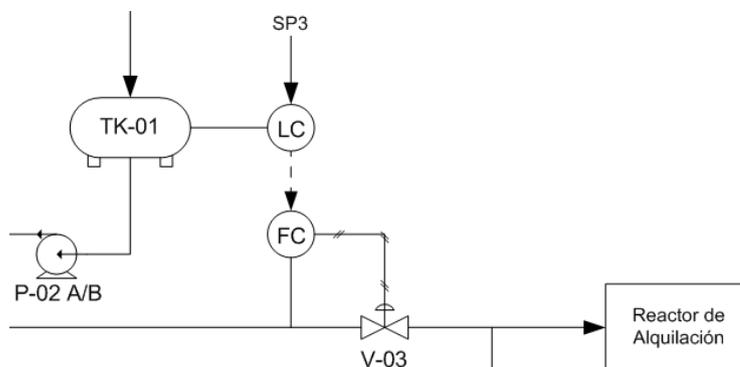


Figura 9.3. Lazo de control 3.

Lazo 4: Anticipativo.

Este lazo incluido en las Conducciones 6 y 7, obtiene el valor de la composición y lo emite, por medio de AT¹², hacia el controlador correspondiente AC¹³, en el cual se define una composición de consigna SP4, y envía el resultado hacia el controlador Reflujo/Alimentación.

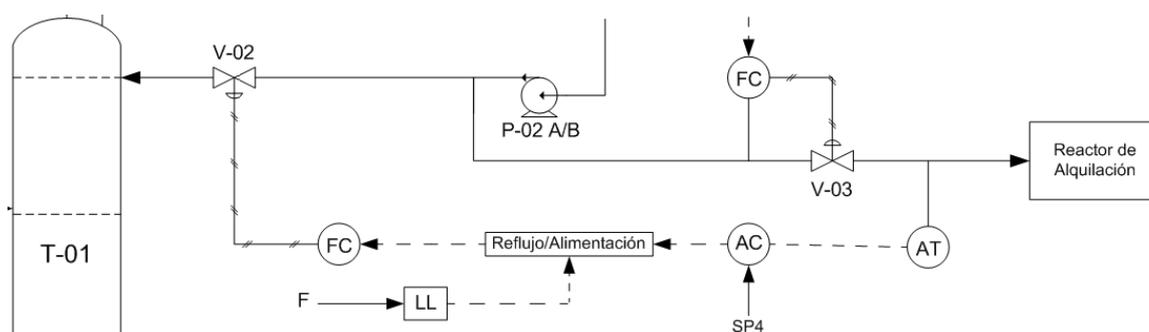


Figura 9.4. Lazo de control 4.

De manera anticipada, el dato de caudal de alimentación (F) ha sido enviado hacia este controlador Reflujo/Alimentación. Como consecuencia, este último controlador realizará las modificaciones pertinentes en la corriente de

¹² AT: Transmisor de composición.

¹³ AC: Controlador de composición.

reflujo influenciando directamente en caudal, mediante FC, que actúa sobre la válvula (V-02) de la conducción emitiendo el reflujo requerido (Figura 9.4)¹⁴.

9.4.3 Control de la Línea 3.

La línea 3 transfiere el líquido de fondo de columna (T-01) hacia el rehervidor (E-01) para cambiar su fase y bifurcar la corriente. Por un lado convierte una parte del líquido recibido en vapor, y lo retorna a columna. Por otro, envía la parte de líquido que no ha cambiado de fase, hacia la Columna de Parafinas como producto residuo.

Lazo 5: En cascada.

Este lazo está incluido en la Conducción 8. Se define un valor máximo de nivel de líquido (SP5) de forma que la columna no se inunde, y controlando el nivel mediante LC (lazo primario) que actúa sobre FC (lazo secundario) se regulará el caudal de salida mediante la válvula V-04 (Véase Figura 9.5).

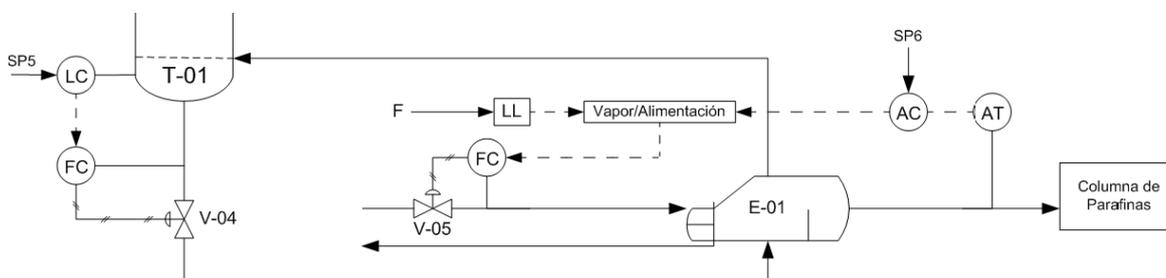


Figura 9.5. Lazo 5 y 6.

Lazo 6: Anticipativo.

Este lazo actúa de forma similar que el lazo 4 y se incluye en la Conducción 10. Se envía el valor de la composición de la corriente de residuo, tarea encargada por AT y controlada mediante AC, hacia el controlador Vapor/Alimentación, el cual recibe el valor del caudal de alimentación (F), y actúa sobre el flujo de vapor de agua mediante el controlador de caudal FC modificando la composición obtenida y por medio de la temperatura ejercida, alterando las corrientes de vapor y líquido (Véase Figura 9.5).

¹⁴ LL: Compensación dinámica. Es un elemento necesario para equilibrar la diferencia de respuestas.

CAPÍTULO 10: Mantenimiento y puesta en marcha.

10.1 Introducción

La recuperación de benceno realizada en la unidad, como actividad industrial, implica ciertos riesgos que pueden afectar al personal y al producto obtenido. Por esta razón, se elaboran acciones necesarias para conservar o restablecer un sistema con la finalidad de garantizar su funcionamiento a un coste razonable.

El mantenimiento de la instalación y el plan de puesta en marcha del proceso cumplen la función de control del estado de las instalaciones productivas, auxiliares y de servicios con el propósito de prevenir accidentes, prever y corregir averías, cuantificar y evaluar el estado de las instalaciones y minimizar los costes, garantizando así mismo la seguridad de los individuos como la calidad del producto.

10.2 Mantenimiento

Luego de analizar los tipos de mantenimiento que se realizan en una instalación, se procederá a la aplicación de éstos en la planta de recuperación de benceno.

10.2.1 Tipos de mantenimiento

Se definen a continuación los tipos de mantenimiento tradicionales: preventivo y correctivo. Éstas son técnicas que se encargan de conservar los equipos, herramientas, máquinas y procesos en constante y correcto funcionamiento.

10.2.1.1 Mantenimiento preventivo

El mantenimiento preventivo (MP) es una actividad destinada a impedir el estado de avería. Su principal ventaja es la reducción de las paradas eventuales del proceso mediante la periodicidad en la inspección y reparación del sistema.

La desventaja de este tipo de mantenimiento, es la dificultad que conlleva la estimación de forma correcta de los tiempos requeridos para realizar las intervenciones, teniendo en cuenta que si se interrumpe de forma innecesaria la operación, las actividades provocarían la reducción de su disponibilidad de producción y un aumento de gastos. Y en caso de retrasarse con respecto a la avería, el mantenimiento correctivo se impondría en su lugar transformándola en una tarea ineficaz.

Puede presentarse de dos formas, como mantenimiento condicional o predictivo y mantenimiento sistemático.

- **Mantenimiento predictivo**

Su función es subsanar el fallo cuando aún se encuentra en estado incipiente. Necesita de mayores inversiones iniciales así como de gran información para desarrollar las prevenciones, sin embargo, puede determinar el tiempo óptimo de mantenimiento preventivo, aprovecha al máximo los recursos y reduce al mínimo las emergencias correctivas.

- **Mantenimiento sistemático**

Es el que se efectúa a intervalos regulares de tiempo de acuerdo con un programa establecido teniendo en cuenta el estado crítico del equipo.

10.2.1.2 Mantenimiento correctivo

El mantenimiento correctivo o de mejoras (MM), se trata de la actividad encaminada a devolver el sistema a su estado normal cuando la avería ya se ha producido.

La ventaja que ofrece es el máximo aprovechamiento de la vida útil de los equipos, así como que no se necesita una gran infraestructura técnica ni elevada capacidad de análisis.

Y la desventaja, que las averías son un perjuicio en cuanto a la producción ya que las averías se producen de forma imprevista. Cabe mencionar que las reparaciones pueden adquirir una baja calidad debido tiempo disponible insuficiente.

10.2.2 Plan de mantenimiento

Se procede a realizar un plan de ejecución con el objetivo de proteger, lo máximo posible, al personal, a la instalación y a la economía del proceso.

10.2.2.1 Modelos de mantenimiento

Los siguientes modelos utilizan las tácticas de ambos tipos de mantenimiento tradicional y son aplicados actualmente en las industrias.

- **Mantenimiento Productivo Total o TPM (Total Productive Maintenance)**

Es un modelo enfocado hacia una mejora continua del proceso productivo y que involucra la participación de todos los trabajadores hacia la óptima disponibilidad de las máquinas. Se basa en la organización, orden, limpieza e inspección, estandarización y disciplina.

- **Mantenimiento Centrado en la Fiabilidad o RCM (Reliability Centered Maintenance)**

Este modelo analiza mediante una metodología rigurosa cada tipo de fallo o avería, el modo y forma en que se producen y cómo se traducen en costes y repercusiones.

En base al último modelo, se pueden clasificar en 3 los equipos atendiendo a su nivel de influencia en el proceso: Equipos críticos (A), importantes (B) y prescindibles (C) [32].

- **A: Equipos críticos**

Grado de relevancia

En cuanto a la seguridad y medio ambiente: Puede originar un accidente muy grave.

En cuanto al seguimiento: Necesita revisiones periódicas frecuentes (mensuales).

En cuanto a la calidad: Es clave para la calidad del producto o es el causante de un alto porcentaje de rechazo.

Repercusiones

Su parada supone una parada de planta, o bien afecta al rendimiento o a la capacidad de producción.

Coste mantenimiento

Alto coste de reparación del fallo principal y de las averías derivadas, o bien consumo de una parte importante de los recursos de mantenimiento o tiene averías muy frecuentes.

- **B: Equipos importantes**

Grado de relevancia

En cuanto a la seguridad y medio ambiente: Puede ocasionar un accidente grave, pero con baja posibilidad.

En cuanto al seguimiento: Necesita revisiones periódicas anuales.

En cuanto a la calidad: Afecta a la calidad, pero no suele ser problemático.

Repercusiones

Afecta a la producción pero es recuperable.

Mantenimiento

Coste medio en mantenimiento

- **C: Equipos prescindibles**

Grado de relevancia

En cuanto a la seguridad y medio ambiente: Poca influencia en la seguridad.

En cuanto a la calidad: No afecta a la calidad.

Repercusiones

Poca influencia en la producción.

Mantenimiento

Bajo coste de mantenimiento.

10.2.2.2 Mantenimiento de equipos

Para la clasificación de los equipos del proceso de recuperación de benceno, se debe encontrar cuáles aspectos se acercan más a sus características y se le asigna la letra del nivel de criticidad más alto que se haya obtenido.

A continuación se clasifica a los equipos y se procede a describir el plan de mantenimiento adecuado para cada uno [33].

Columna de rectificación: Clase A

- Inspección y limpieza anual del interior del equipo.
- Inspección semestral del efecto de corrosión, grietas y fugas.
- Inspección y limpieza del exterior del equipo.
- Inspección del sistema de tuberías.
- Inspección de conexiones entre equipos y elementos.
- Comprobación anual de sistemas de control de operación.
- Comprobación de sistema de seguridad y elementos auxiliares.
- Cambio o reparación de elementos deteriorados.
- Recubrimiento exterior con pintura cada 5 años.

Aerorrefrigerador y Rehervidor: Clase A

- Inspección y limpieza anual del interior del equipo.
- Inspección semestral del efecto de corrosión.
- Inspección y limpieza del exterior del equipo.
- Inspección anual de equipos adjuntos (ventiladores) y sistema eléctrico.
- Inspección de conexiones entre equipos y elementos.
- Inspección anual de sistemas de control de operación.
- Comprobación de sistema de seguridad y elementos auxiliares.
- Cambio o reparación de elementos deteriorados.
- Recubrimiento exterior con pintura cada 5 años.
- Inspección anual de válvulas de seguridad.

Acumulador de reflujo: Clase B

- Inspección y limpieza anual del interior del equipo.
- Inspección semestral del efecto de corrosión, grietas y fugas.
- Inspección y limpieza del exterior del equipo.
- Inspección de conexiones entre equipos y elementos.
- Comprobación de sistemas de control de operación.
- Comprobación de sistema de seguridad.
- Recubrimiento exterior con pintura cada 5 años.

Sistema de tuberías: Clase B

- Inspección de deformaciones y desviaciones.
- Inspección de sistemas de control y seguridad.
- Inspección de conexiones entre conducciones y accesorios.
- Inspección de corrosión, grietas y fugas.
- Inspección de recubrimientos de protección.

Bombas: Clase C

- Control de vibraciones y ruido.
- Control de arranque.
- Control de lubricación.
- Inspección de deterioro y posición adecuada de elementos internos.
- Limpieza externa e interna.
- Reparación y sustitución de elementos dañados.
- Inspección de obstrucciones.
- Inspección de sistema eléctrico y control.

Instrumentos de control: Clase C

- Inspección de conexiones con elementos.
- Inspección de obstrucciones.
- Inspección sistema eléctrico.
- Inspección de corrosión y fugas.
- Inspección de elementos internos.
- Calibrado y programación.
- Inspección periódica del sistema de disparo de las válvulas de seguridad.

10.3 Puesta en marcha

Se define como el acondicionamiento de la maquinaria industrial, después de la parada de la planta, para su funcionamiento y reanudación de la producción en condiciones de seguridad.

Luego de que la planta opere 330 días al año, se realiza el correspondiente mantenimiento, inspección y limpieza de los equipos que llevan consigo la detención de los procesos por un período de tiempo.

CAPÍTULO 11: Definiciones y abreviaturas.

- AC: Controlador de composición.
- ANSI: American National Standards Institute.
- API: American Petroleum Institute.
- ASME: American Society of Mechanical Engineers.
- AT: Transmisor de composición.
- B.O.E.: Boletín Oficial del Estado.
- BAS: Branched Alkylbenzene (Sulfonato de Alquilbenceno ramificado).
- BWG: Birmingham Wire Gage.
- CAPT: Capital de trabajo.
- CEPESA: Compañía Española de Petróleos Sociedad Anónima Unipersonal.
- CPM: Coste de puesta en marcha.
- CS: Carbon Steel (Acero al carbono).
- CTE: Códifo Técnico de la Edificación.
- FC: Flow Controller (Controlador de flujo).
- FT: Flow Transmitter (Transmisor de flujo).
- FUG: Método Fenske Underwood Gilliland.
- ICF: Inversión de capital fijo.
- INE: Instituto Nacional de Estadística.
- IPC: Índice de precios de consumo.
- ISO: International Organization for Standardization.
- IT: Inversión total.
- LAB: Linear Alkylbenzene (Alquilbenceno Lineal).
- LAS, LABS: Linear Alkylbenzene Sulphonate (Sulfonato de Alquilbenceno Lineal).
- LC: Level Controller (Controlador de nivel).
- LL: Compensación dinámica.
- MM: Mantenimiento correctivo o de mejoras.
- MMT: Millones de toneladas métricas.
- MP: Mantenimiento preventivo.
- MT: Toneladas métricas.
- PC: Pressure Controller (Controlador de presión).
- Ppm: Partes por millón.
- RCM: Reliability Centered Maintenance (Mantenimiento centrado en la fiabilidad).

- SP: Set Point (Punto de consigna).
- SS: Stainless Steel (Acero inoxidable).
- TEMA: Tubular Exchanger Manufacturers Association.
- TPM: Total productive maintenance (Mantenimiento productivo total).
- UNE: Una Norma Española.

CAPÍTULO 12: Normas y referencias.

12.1. Disposiciones legales y normas aplicadas.

- Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales.
- Real Decreto 374/2001, de 6 de abril, sobre la protección de la salud y seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con los agentes químicos durante el trabajo.
- Real Decreto 1124/2000, de 16 de junio, por el que se modifica el Real Decreto 665/1992, de 12 de mayo, sobre la protección de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición a agentes cancerígenos durante el trabajo (B.O.E. 145 de 17 de junio de 2000).
- Real Decreto 1299/2006, de 10 de noviembre, por el que se aprueba el cuadro de enfermedades profesionales en el sistema de la Seguridad Social y se establecen criterios para su notificación y registro (B.O.E. número 302 de 19 de diciembre).
- Real Decreto 681/2003, de 12 de junio, sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores expuestos a los riesgos derivados de atmósferas explosivas en el lugar de trabajo.
- Real Decreto de 286/2006, de 10 de marzo, sobre la protección de la salud y seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición al ruido.
- Reglamento (CE) 1907/2006, del Parlamento Europeo y el Consejo, de 18 de diciembre, relativo al registro, la evaluación, la autorización y la restricción de las sustancias y preparados químicos (REACH). Última modificación: Anexo XIV, por reglamento 895/2014, de 14 de agosto (Ref. DOUE-L-2014-81791).
- Real Decreto 1254/1999, de 16 de julio, por el que se aprueban las medidas de control de los riesgos inherentes a los accidentes. Última modificación: Anexo I, por Orden PRE/1206/2014, de 9 de julio (Ref. BOE-A-2014-7373).
- Real Decreto 773/1997, de 30 de mayo, sobre disposiciones mínimas sobre utilización por los trabajadores de equipos de protección individual.
- Real Decreto 485/1997, de 14 de abril, sobre disposiciones mínimas en materia de señalización de seguridad y salud en los lugares de trabajo.
- Real Decreto 1942/1993, de 5 de noviembre, por el que se aprueba el Reglamento de instalaciones de protección contra incendios. Se añaden las disposiciones adicionales 2 a 5, por Real Decreto 560/2010, de 7 de mayo (Ref. BOE-A-2010-8190).

- Real Decreto 2060/2008, de 12 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento de equipos a presión y sus instrucciones técnicas complementarias. Se añade la disposición adicional 6, por Real Decreto 1388/2011, de 14 de octubre (Ref. BOE-A-2011-16174).
- Real Decreto 2177/2004, de 12 de noviembre, por el que se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud para la utilización por los trabajadores de los equipos de trabajo, en materia de trabajos temporales en altura.
- Real Decreto 614/2001, de 8 de junio, sobre disposiciones mínimas para la protección de la seguridad y salud de los trabajadores frente a riesgo eléctrico.
- Real Decreto 842/2002, de 2 de agosto, por el que se aprueba el Reglamento electrotécnico para baja tensión. Se añaden las disposiciones adicionales 1 a 4, por Real Decreto 560/2010, de 7 de mayo (Ref. BOE-A-2010-8190).
- Real Decreto 223/2008, de 15 de febrero, por el que se aprueban el Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en líneas eléctricas de alta tensión y sus instrucciones técnicas complementarias. Se añaden las disposiciones adicionales 1 a 4, por Real Decreto 560/2010, de 7 de mayo (Ref. BOE-A-2010-8190).
- Real Decreto 2267/2004, de 3 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento de seguridad contra incendios en establecimientos industriales. Se modifican los artículos 4.2 y 5, por Real Decreto 560/2010, de 7 de mayo (Ref. BOE-A-2010-8190).
- Real Decreto 400/1996, de 1 de marzo, sobre aparatos y sistemas de protección para uso en atmósferas potencialmente explosivas.
- Real Decreto 379/2001, de 6 de abril, por el que se aprueba el Reglamento de almacenamiento de productos químicos y sus instrucciones técnicas complementarias. Se añade la MIE APQ-9, por Real Decreto 105/2010, de 5 de febrero (Ref. BOE-A-2010-4510).
- Ley 11/2014, de 3 de julio, por la que se modifica la ley 26/2007, de 23 de octubre, de responsabilidad medioambiental.
- Ley 21/2013, de 9 de diciembre, de evaluación ambiental.
- Código ASME (American Society of Mechanical Engineers), Sección VIII-División 1. Boiler and Pressure Vessel Code (2.004).
- Código ASME B31.3. Process Piping (2.004).
- Normas API (American Petroleum Institute) 610. Centrifugal Pumps for Petroleum, Petrochemical and Natural Gas Industries (2.003).

- Normas API 660. Shell and Tube Heat Exchangers for General Refinery Services (2.001).
- Normas API 661. Air Cooled Heat Exchangers for General Refinery Services (1.992).
- Normas TEMA (Tubular Exchanger Manufacturers Association).
- Normas ANSI (American National Standards Institute).
- Normas ASTM (American Society for Testing Materials)
- Reglamento Español de Recipientes a Presión, capítulo IV.
- Normas ISO (International Organization for Standardization).
- Normas UNE (Una Norma Española).

12.2. Referencias.

- [1] Kent, J. (2.007). *Kent and Riegel's Handbook of Industrial Chemistry and Biotechnology: Volume 1*. New York, USA: Springer. Chapter 36.
- [2] Roberts, D. (2.003). *Optimisation of the Linear Alkyl Benzene Sulfonation Process for Surfactant Manufacture*. Organic Process Research & Development 7, 172-194.
- [3] The Essential Chemical Industry online. Benzene and methylbenzenes.
Disponibile en:
<http://www.essentialchemicalindustry.org/chemicals/benzene.html>
- [4] HIS Chemical. Benzene. Disponible en:
<http://www.ihs.com/es/mx/products/chemical/planning/ceh/benzene.aspx#>
- [5] Página web ICIS: www.icis.com
- [6] Myers, D. (2.006) *Surfactant Science and Technology* (3^o Ed.). New Jersey, USA: John Wiley & Sons, Incorporation.
- [7] Singh, A. *The Future of LAB*. AOCS Your Global Fats and Oils Connection.
Disponibile en:
<http://www.aocs.org/Membership/FreeCover.cfm?itemnumber=18059>
- [8] *Global Linear Alkyl Benzene (LAB) Market 2.014-2.018*, July 2.014.
Disponibile en:
http://www.researchandmarkets.com/research/bjt2zz/global_linear
- [9] Página web CEPSA: www.cepsa.com

- [10] *Linear Alkylbenzene Sulfonate (LAS)*, August 2.005. Paris, France. UNEP Publications. Disponible en:
<http://www.chem.unep.ch/irptc/sids/oecd/sids/las.pdf>
- [11] *Atlas Climático Ibérico (1.971-2.000)*. Agencia Estatal de Meteorología. Ministerio del Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Gobierno de España.
- [12] Página web El Tiempo 24: www.eltiempo24.es
- [13] McCabe, W.L; Smith, J.C; & Harriot, P. (1.991) *Operaciones unitarias en Ingeniería Química* (4ª Ed.). Madrid, España: McGraw-Hill/Interamericana. Sección 2,3 y 4.
- [14] Perry, R. H. (1.997). *Manual del Ingeniero Químico* (6ª Ed.). McGraw-Hill, Tomo III, IV.
- [15] Márquez R., F. (2.003). *Síntesis de Procesos Químicos*. Departamento de Ingeniería Química. Universidad de Concepción.
- [16] Otero de la Gándara, J.L. (2.006). *Notas para la Historia de la Destilación*. Madrid: Editorial Tébar S.L.
- [17] Reyes Labarta, J.A. (1.998). *Diseño de Columnas de Rectificación y Extracción Multicomponente. Cálculo del Reflujo Mínimo*. Tesis de Doctorado. Universidad de Alicante.
- [18] Carrasco Jiménez, M.S., & De Paz Cruz, J.A. (2.000). *Tratado de emergencias médicas*. Madrid, España: Arán Ediciones S.A.
- [19] Ospino P. J., Aguirre C., A., Gonzalez, N., & Taborda, S. (2.010). *Asignación #4: Diseño de una torre de destilación multicomponente*. Universidad de Antioquía.
- [20] Górak, A., & Schoenmakers, H. (2.014). *Distillation: Operation and Applications*. Elsevier.
- [21] Treybal, R. E. (1.988). *Operaciones de Transferencia de Masa* (2ª Ed.). McGraw-Hill.
- [22] Bernal B, D. (2.011). *Análisis y diseño de platos y columnas de platos*. 1ª Edición. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- [23] Página web Aceros. CASIDER S.A.: www.casider.com

- [24] Página web Aceros FERCOM. Acero para recipientes a presión. Disponible en: http://www.acerosfercom.com/acero_recipientes.html
- [25] CALORCOL. Lana Mineral de Roca. Disponible en: www.calorcol.com
- [26] Petróleos de Venezuela. (1.995). *Manual de Ingeniería de Riesgos. Separación entre equipos e instalaciones*. PDVSA.
- [27] Kern, D.Q. (1965). *Process Heat Transfer*. McGraw-Hill.
- [28] Kilkovsky, B., Kohoutek, J., Jegla, Z., & Stehlik, P. (2.009). *Software application for supporting of CAE in process engineering: Automated choice of the suitable reboiler type*. Chemical Engineering Transactions. Volume 18.
- [29] Karassik, I., Messina, J.P., Cooper, P., & Heald, C.C. (2.001). *Pump Handbook* (3º Ed). McGraw-Hill.
- [30] Proveedores Industriales de la República Mexicana. *Tanques*. Disponible en: http://www.dirind.com/dim/monografia.php?cla_id=81
- [31] Dorf, R., Bishop, R.H. (2.005). *Sistemas de control moderno* (10º Ed.). Madrid: Pearson Educación S.A.
- [32] González Fernández, F.J. (2.005). *Teoría y práctica del mantenimiento industrial avanzado* (2º Ed.). FC Editorial.
- [33] *Mantenimiento General*. Disponible en: http://www.mantenimientogeneral.com/Manual/Recipientes_sujetos_a_presion.htm
- [34] ICARUS. (1998). Disponible en: <http://instruct.uwo.ca/engin-sc/cbe497/Doc/Icarus/ir08.pdf>
- [35] Megyesy, E. F. (1995). *Pressure Vessel Handbook* (10º Ed.). Tulsa, Oklahoma, USA: Pressure Vessel Publishing, Inc.
- [36] AEMET. Disponible en: http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/datosclimatologicos/efemerides_extremos?*w=0&k=and&l=6001&datos=det&x=6001&m=13&v=VMX
- [37] Coronel Toro, J. F. (2013). *Colección de Tablas, Gráficas y Ecuaciones de Transmisión de Calor*. Universidad de Sevilla, Ingeniería Energética. Grupo de Termotecnia.

- [38] Rase, H. F. (1977). *Chemical Reactor Design for Process Plants*. New York, USA: John Wiley & Sons.
- [39] *Derechos y deberes de los contratistas*. Cámara Colombiana de la Infraestructura. Disponible en:
http://www.infraestructura.org.co/juridica/contratacion/principal.php?cnc_id=8
- [40] CTE. Ministerio de Fomento. Gobierno de España. Disponible en:
<http://www.fomento.gob.es/NR/rdonlyres/7BD6D398-EE9B-40F5-86A9-D28C4A684444/95701/1.pdf>
- [41] Técnica constructiva. AIM-Andalucía. Disponible en:
<http://aim-andalucia.com/indexPCO.htm>
- [42] Pliego de condiciones Proyecto de urbanización:
<http://www.citma.gva.es/documents/20551182/101925986/TomoII/ce6295fa-a328-4190-990d-a9dae5e2b375>
- [43] Pliego de condiciones. Universidad Politécnica de Cartagena. Disponible en:
http://ocw.bib.upct.es/pluginfile.php/11573/mod_resource/content/1/Tema%2011.%20Pliegos.pdf
- [44] Página web AENOR: www.aenor.es
- [45] Ingeniería Rural. (2010). El Pliego de Condiciones. Disponible en:
http://www.uclm.es/area/ing_rural/AsignaturaProyectos/Tema%209.pdf
- [46] Márquez R., F. (2003). Síntesis de Procesos Químicos. Universidad de Concepción, Departamento de Ingeniería Química.
- [47] Página web INE España: www.ine.es
- [48] Chemical Engineering. (2009). Economic indicators. Disponible en:
http://tekim.undip.ac.id/v1/wp-content/uploads/pci_20012008.pdf
- [49] Página web Ebara España Bombas S.A.: www.ebara.es
- [50] Dirección General de Seguridad y Emergencias. (2001). Plan de Emergencia Exterior PEE-CEPSA refinería Tenerife. Gobierno de Canarias. Consejería de Presidencia e Innovación Tecnológica.
- [51] Página web Iturri Group: www.iturri.com

[52] Generation Industrial Group. Página web: <http://generation-ig.com/Produkcija/Neftehim/Teploobmennye-apparaty/Ispariteli.html>

[53] GEA Heat Exchangers. Página web: www.gearainey.com

REDISEÑO DE UNA LÍNEA DE
FRACCIONAMIENTO DE ALQUILACIÓN DE
PARAFINAS.

PARTE I: UNIDAD DE RECUPERACIÓN DE
BENCENO.

DOCUMENTO 2: ANEXOS

AUTORA: D^a. ROSA MARÍA BADANI PRADO

Índice Anexos

ANEXO A: DISEÑO DE LA COLUMNA DE RECTIFICACIÓN.....	136
A.1 INTRODUCCIÓN.....	136
A.2 DISEÑO DE LA COLUMNA DE DESTILACIÓN.....	136
A.2.1 <i>Caracterización de las corrientes.....</i>	136
A.2.2 <i>Balance de materia.....</i>	138
A.2.3 <i>Condición de alimentación.....</i>	140
A.2.4 <i>Determinación de etapas mínimas, relación de reflujo y número de etapas de equilibrio.....</i>	140
A.2.5 <i>Posición del plato de alimentación.....</i>	148
A.2.6 <i>Número de etapas reales.....</i>	149
A.3 DISEÑO HIDRÁULICO DE LA COLUMNA.....	152
A.3.1. <i>Cálculo de caudales molares internos.....</i>	152
A.3.2. <i>Diámetro de columna.....</i>	154
A.3.3. <i>Lloriqueo.....</i>	165
A.3.4. <i>Arrastre.....</i>	166
A.3.5. <i>Inundación.....</i>	167
A.3.6. <i>Descarga.....</i>	173
A.4 DISEÑO MECÁNICO DE LA COLUMNA.....	174
A.4.1. <i>Presión de diseño.....</i>	174
A.4.2. <i>Temperatura de diseño.....</i>	174
A.4.3. <i>Altura estimada de torre.....</i>	175
A.4.4. <i>Factor de corrosión.....</i>	176
A.4.5. <i>Material empleado.....</i>	177
A.4.6. <i>Fondos.....</i>	177
A.4.7. <i>Cálculo del espesor de la envolvente.....</i>	180
A.4.8. <i>Cálculo de la altura de faldilla.....</i>	186
A.4.9. <i>Altura de la columna y la unidad.....</i>	187
ANEXO B: DISEÑO DE LOS EQUIPOS DE TRANSMISIÓN DE CALOR.....	188
B.1. INTRODUCCIÓN.....	188
B.2. DISEÑO DEL CONDENSADOR.....	188
B.2.1. <i>Introducción.....</i>	188
B.2.2. <i>Caracterización de las corrientes.....</i>	188
B.2.3. <i>Requisitos de diseño.....</i>	189
B.2.4. <i>Selección del tipo de intercambiador.....</i>	190
B.2.5. <i>Selección de la trayectoria de flujo.....</i>	190
B.2.6. <i>Características del intercambiador.....</i>	190
B.2.7. <i>Cálculo del calor intercambiado.....</i>	191
B.2.8. <i>Cálculo del área del intercambiador.....</i>	193
B.2.9. <i>Diseño mecánico del intercambiador.....</i>	211
B.2.10. <i>Pérdida de carga en tubos.....</i>	214
B.2.11. <i>Sistema de impulsión.....</i>	217
B.3. DISEÑO DEL REHERVIDOR.....	221

B.3.1.	<i>Introducción.</i>	221
B.3.2.	<i>Caracterización de las corrientes.</i>	222
B.3.3.	<i>Requisitos de diseño y consideraciones.</i>	223
B.3.4.	<i>Selección del tipo de intercambiador.</i>	223
B.3.5.	<i>Selección de la trayectoria de flujo.</i>	223
B.3.6.	<i>Características del intercambiador.</i>	224
B.3.7.	<i>Cálculo del calor intercambiado.</i>	224
B.3.8.	<i>Cálculo del área del intercambiador.</i>	226
B.3.9.	<i>Características de carcasa y haz de tubos.</i>	239
B.3.10.	<i>Diseño mecánico del intercambiador.</i>	239
B.3.11.	<i>Pérdida de carga.</i>	245
ANEXO C: SISTEMA DE TUBERÍAS.		250
C.1.	INTRODUCCIÓN.	250
C.2.	DEFINICIÓN DE LAS LÍNEAS DE CONDUCCIONES.	250
C.3.	CARACTERIZACIÓN DE LAS CORRIENTES.	251
C.4.	DISEÑO DE CONDUCCIONES.	253
C.4.1.	<i>Diámetro interno.</i>	253
C.4.2.	<i>Espesor de tubería.</i>	254
ANEXO D: DISEÑO DEL SISTEMA DE IMPULSIÓN.		265
D.1.	INTRODUCCIÓN.	265
D.2.	LOCALIZACIÓN EN PLANTA.	265
D.3.	SELECCIÓN DEL TIPO DE BOMBA.	266
D.4.	PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS.	266
D.4.1.	<i>Caracterización de las corrientes.</i>	267
D.4.2.	<i>Altura efectiva.</i>	267
D.4.3.	<i>Potencia.</i>	268
D.4.4.	<i>Altura neta positiva de succión.</i>	269
D.4.5.	<i>Altura neta positiva de succión requerida.</i>	271
ANEXO E: DISEÑO DEL ACUMULADOR DE REFLUJO.		273
E.1.	INTRODUCCIÓN.	273
E.2.	CONDICIONES DE DISEÑO.	273
E.2.1.	<i>Presión de diseño.</i>	273
E.2.2.	<i>Temperatura de diseño.</i>	274
E.3.	PARÁMETROS DEL MATERIAL.	274
E.3.1.	<i>Máxima tensión admisible.</i>	274
E.3.2.	<i>Eficiencia de soldadura.</i>	274
E.3.3.	<i>Factor de corrosión.</i>	274
E.3.4.	<i>Tamaño óptimo.</i>	275
E.4.	DISEÑO MECÁNICO.	276
E.4.1.	<i>Fondos del recipiente.</i>	276
E.5.	DIMENSIONES.	279

ANEXO F: TABLAS Y FIGURAS. 280

ANEXO G: FICHAS DE SEGURIDAD Y CATÁLOGOS. 299

ANEXO A: Diseño de la columna de rectificación.

A.1 Introducción.

El propósito del presente Proyecto Fin de Carrera es el diseño de una torre de rectificación de benceno que se presentará formando parte de la Línea de fraccionamiento de Alquilación de parafinas como torre inicial de operación.

La columna debe ser capaz de operar con $220.350 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ de alimentación que se compone tanto de ácido fluorhídrico, como de diferentes hidrocarburos (n-C10 a n-C14+), alquilbencenos y benceno no reaccionado, con una composición del 11,98% en peso de benceno, de forma que sea posible obtener una corriente de fondo de columna que no sobrepase de 50 ppm de este compuesto.

A continuación se procederá al dimensionamiento de la columna de separación mediante la cual se realizará el proceso de recuperación de benceno, definiendo las características necesarias para la propia columna y para los equipos auxiliares requeridos en el funcionamiento de la operación.

A.2 Diseño de la columna de destilación.

Este apartado, se dedica a la determinación de las corrientes fluidas, que atraviesan la columna, de forma cualitativa y cuantitativa, con el propósito de definir las etapas de equilibrio necesarias para realizar la separación de componentes, así como el reflujo con el que se opera, la posición en la que se sitúa el plato de alimentación y la eficacia de la columna.

A.2.1 Caracterización de las corrientes

A.2.1.1. Alimentación (F)

Es la corriente que ingresa a la columna de separación proveniente de la Columna de ácido fluorhídrico.

La alimentación, es introducida a la columna de rectificación a razón de $220.350 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ como líquido saturado, a una presión de 2,47 atm y a su temperatura de ebullición de $172,28^\circ\text{C}$.

Dicha alimentación, se compone de un caudal másico de 26.400 kg·h⁻¹ de benceno, además de otros componentes en distintas proporciones como indica la Tabla A.1.

Tabla A. 1. Corriente de alimentación (F).

Compuesto	Caudal másico (kg·h ⁻¹)	Porcentaje en peso (%)	Peso molecular (kg·kmol ⁻¹)
Ácido fluorhídrico (HF)	22	0,01	20,01
Benceno (C ₆ H ₆)	26.400	11,98	78,11
n-decano (n-C10)	22.836	10,36	142,29
n-undecano (n-C11)	49.896	22,64	156,31
n-dodecano (n-C12)	50.424	22,88	170,34
n-tridecano (n-C13)	43.164	19,59	184,37
n-tetradecano (n-C14)	858	0,39	198,38
n-decil-benceno (n-Decil-BZ)	3.322	1,51	218,37
n-undecil-benceno (n-Undecil-BZ)	8.426	3,82	232,39
n-dodecil-benceno (n-Dodecil-BZ)	7.920	3,59	246,42
n-tridecil-benceno (n-Tridecil-BZ)	5.632	2,56	260,45
n-tetradecil-benceno (n-Tetradecil-BZ)	1.100	0,50	274,47
Alquilato pesado	350	0,16	275,00

A.2.1.2. Destilado (D)

Corriente obtenida por cabeza de columna¹⁵ que se envía hacia el Reactor de Alquilación.

Esta corriente es en sí, el benceno recuperado, y el que se transportará para su reutilización como reactivo principal en el proceso de alquilación de parafinas para la síntesis de LAB.

A.2.1.3. Residuo (W)

Corriente obtenida por fondo de columna¹⁶ que se envía hacia la Columna de Recuperación de Parafinas para su posterior tratamiento.

Esta corriente es alimentación de la segunda torre de la Línea de Fraccionamiento estudiada en la siguiente parte del proyecto: Parte II. Torre de Rectificación de Parafinas.

¹⁵ D es la corriente obtenida en cabeza de columna, sin embargo, cuando se encuentra como subíndice de algún parámetro se refiere a la zona: cabeza de columna.

¹⁶ W corriente de fondo o colas de columna, también llamado residuo, y como subíndice: fondo de columna.

A.2.2 Balance de materia

El objetivo del proyecto condiciona que la cantidad de benceno obtenida en fondo de columna sea menor a 50 ppm¹⁷, por lo que se debe determinar una pureza elevada del compuesto.

El proceso se desarrolla considerando estado estacionario sin reacción química en la columna, estableciendo una permanente equidad entre el ingreso de materia y egreso de la misma, para cada componente, como se describe en la siguiente ecuación:

$$F = D + W \quad [\text{Ecuación A. 1}]$$

Así como, si referimos el balance de materia teniendo en cuenta su composición, se tiene:

$$F * x_F = D * x_D + W * x_W \quad [\text{Ec. A. 2}]$$

Dónde:

- F: Caudal másico de alimentación (kg·h⁻¹).
- D: Caudal másico destilado (kg·h⁻¹).
- W: Caudal másico en fondo de columna (kg·h⁻¹).
- X_F, X_D, X_W: Fracción másica de cada componente en alimentación, destilado o fondo de columna, respectivamente.

En primer lugar, se realiza la combinación de las dos ecuaciones anteriores para cada componente, y se definen los valores de pureza del benceno en destilado, así como de n-C10 en el fondo de columna. Con el objetivo de conseguir una composición de benceno máxima de 50 ppm en la zona de agotamiento, se van cambiando los valores de pureza de ambos compuestos hasta obtener la cantidad deseada de benceno.

Los valores que posibilitan una cantidad de 41 ppm de benceno son: una pureza en el producto de fondo de columna referida al n-C10 de 99% y en el producto de cabeza de columna referida al benceno de 99,97%.

¹⁷ ppm: Partes por millón.

Con estos datos, se define lo siguiente en cuanto al benceno:

- $X_F=0,12$ (11,98%)
- $X_W=4 \cdot 10^{-5}$ (0,004% o 41 ppm)
- $X_D=8 \cdot 10^{-4}$ (0,08%)

Luego, se deben combinar la [Ecuación A.1] y [Ec.A.2] para cada elemento que constituye la alimentación, se reemplazan los datos, se realiza un sumatorio por separado de cada corriente y se obtienen los siguientes caudales globales:

Tabla A. 2. Caudales globales

	Alimentación (F)	Destilado (D)	Residuo (W)
Caudal másico ($\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$)	220.350	26.642	193.708
Caudal molar ($\text{kmol}\cdot\text{h}^{-1}$)	1.464	341	1.123

Mediante estos datos, es posible calcular los caudales y la fracción másica de cada componente en las 3 corrientes. Los resultados son los que indica la siguiente tabla:

Tabla A. 3. Caudal y composición de F, D y W.

Compuesto	Alimentación (F)		Destilado (D)		Residuo (W)	
	($\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$)	(% p/p)	($\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$)	(% p/p)	($\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$)	(% p/p)
HF	22	0,01	22	0,08	-	-
C_6H_6	26.400	11,98	26.392	99,06	8	0,00*
n-C10	22.836	10,36	228	0,86	22.608	11,67
n-C11	49.896	22,64	-	-	49.896	25,76
n-C12	50.424	22,88	-	-	50.424	26,03
n-C13	43.164	19,59	-	-	43.164	22,28
n-C14	858	0,39	-	-	858	0,44
n-Decil-BZ	3.322	1,51	-	-	3.322	1,71
n-Undecil-BZ	8.426	3,82	-	-	8.426	4,35
n-Dodecil-BZ	7.920	3,59	-	-	7.920	4,09
n-Tridecil-BZ	5.632	2,56	-	-	5.632	2,91
n-Tetradecil-BZ	1.100	0,50	-	-	1.100	0,57
Alquilato pesado	350	0,16	-	-	350	0,18

(*) El Benceno presenta 41 ppm en la corriente o una composición de 0,0041% en peso.

Es necesario aclarar, que los caudales molares recogidos en la Tabla A.2 referido a cada corriente, se calcula mediante el sumatorio del resultado de la relación del peso molecular de cada componente indicado en la Tabla A.1 y el caudal másico de cada uno de éstos en la corriente correspondiente.

Los pesos moleculares de las corrientes, calculados mediante la fracción molar y el peso molecular de cada compuesto, son los siguientes:

Alimentación (PM_F): $150,54 \text{ kg}\cdot\text{kmol}^{-1}$.

Destilado (PM_D): $78,22 \text{ kg}\cdot\text{kmol}^{-1}$.

Residuo (PM_W): $172,46 \text{ kg}\cdot\text{kmol}^{-1}$.

A.2.3 Condición de alimentación

El valor que toma la condición de alimentación (ϕ) será imprescindible para definir el número de platos o etapas de equilibrio necesarias para la separación de los componentes en la columna, e igual de importante para determinar los caudales de las corrientes que circulan durante el proceso.

La condición de alimentación puede encontrarse como:

- Líquido subenfriado: $\phi > 1$
- Líquido saturado: $\phi = 1$
- Mezcla líquido-vapor: $0 < \phi < 1$
- Vapor saturado: $\phi = 0$
- Vapor subenfriado: $\phi < 0$

La columna diseñada, opera con una alimentación que entra como líquido saturado y por tanto, este factor tiene un valor de $\phi = 1$.

A.2.4 Determinación de etapas mínimas, relación de reflujo y número de etapas de equilibrio.

En la columna se realiza una destilación multicomponente, por lo que se hará uso del método de cálculo aproximado propuesto por Fenske, Underwood y Gilliland (Método FUG) para la obtención del número de platos teóricos mínimos, relación de reflujo mínima y número de platos teóricos.

En primer lugar deben definirse los componentes clave del proceso, tratándolo como si solamente tuviera dos compuestos para la separación. Éstos dos compuestos se determinan mediante la visualización de aquellos que presentan una cantidad apreciable, bien en cabeza, o bien en fondo de columna;

mientras que los demás componentes (no claves) del proceso, solamente estarán presentes en una de las dos corrientes.

El Benceno será el componente clave ligero (LK: Light Key) en la rectificación, el cual es el más pesado de los ligeros; y el n-Decano será el clave pesado (HK: Heavy Key), o componente más ligero de los pesados.

A.2.4.1. Número de etapas mínimas

El número mínimo de etapas viene definido como la cantidad de platos que se requieren si la columna trabajase a reflujo máximo. Esto indica que todo el vapor que salga de cabeza retornará a la columna como líquido después de haber circulado por el condensador, razón por la cual, no se genera destilado.

Se determina este valor mediante la siguiente expresión propuesta por Fenske:

$$N_{min} + 1 = \frac{\log \left[\left(\frac{x_{D(LK)}}{x_{D(HK)}} \right) * \left(\frac{x_{W(HK)}}{x_{W(LK)}} \right) \right]}{\log a_m} \quad [Ec. A. 3]$$

Siendo:

- N_{min} : Número mínimo de etapas.
- $x_{D(LK)}$: Fracción molar en destilado del componente clave ligero.
- $x_{D(HK)}$: Fracción molar en destilado del componente clave pesado.
- $x_{W(HK)}$: Fracción molar en fondo del componente clave pesado.
- $x_{W(LK)}$: Fracción molar en fondo del componente clave ligero.
- a_m : media geométrica entre las volatilidades relativas de cabeza y fondo de columna.

En ésta expresión, se hace uso de las composiciones que figuran en la Tabla A.4.

Tabla A. 4. Fracción molar componentes Clave Ligero y Clave Pesado.

	Clave Ligero (LK)	Clave Pesado (HK)
Cabeza, D (%)	99,21	0,47
Fondo, W (%)	0,01	14,15

Adicionalmente, es necesario calcular la media geométrica de volatilidades, la cual, puede determinarse mediante la ecuación siguiente:

$$a_m = \sqrt{\left(a_{\left(\frac{LK}{HK}\right)_D}\right) \left(a_{\left(\frac{LK}{HK}\right)_W}\right)} \quad [\text{Ec. A. 4}]$$

A la vez, se emplea la definición de volatilidad relativa como la relación de volatilidades, o constantes K, de los compuestos clave como se muestra:

$$a_{\left(\frac{LK}{HK}\right)_i} = \left(\frac{K_{LK}}{K_{HK}}\right)_i \quad [\text{Ec. A. 5}]$$

Dónde $a_{\left(\frac{LK}{HK}\right)_i}$ es la volatilidad relativa del compuesto en cabeza (D) o en fondo de columna (W).

Los valores de las constantes K de los compuestos en las diferentes zonas de la columna, como la alimentación, cabeza y fondo de columna, se obtienen a partir del simulador Aspen HYSYS y son los que se muestran en la Tabla A.5.

Tabla A. 5. Constantes K.

Compuesto	Destilado	Alimentación	Residuo
Ácido Fluorhídrico	5,403	12,717	-
Benceno (LK)	0,990	3,665	8,591
Decano (HK)	0,156	0,421	1,860
Undecano	-	0,246	1,280
Dodecano	-	0,149	0,888
Tridecano	-	0,085	0,607
Tetradecano	-	0,047	0,402
n-Decil-Benceno	-	0,015	0,179
n-Undecil-Benceno	-	0,009	0,122
n-Dodecil-Benceno	-	0,005	0,087
n-Tridecil-Benceno	-	0,003	0,062
n-Tetradecil-Benceno	-	0,002	0,044
Alquilato pesado	-	0,001	0,030

Al sustituir los valores necesarios en [Ec.A.5], [Ec.A.4] y [Ec.A.3], se obtienen los siguientes resultados:

$$a_{\left(\frac{LK}{HK}\right)_D} = \left(\frac{0,990}{0,156}\right)_D = 6,329$$

$$a_{\left(\frac{LK}{HK}\right)_W} = \left(\frac{8,591}{1,860}\right)_W = 4,620$$

$$a_m = \sqrt{6,329 \cdot 4,620} = 5,407$$

$$N_{min} + 1 = \frac{\log \left[\left(\frac{0,9921}{0,0047} \right) \cdot \left(\frac{0,1415}{0,0001} \right) \right]}{\log 5,407} = 7,53 \approx 8$$

El valor obtenido es 8, sin embargo puesto que se debe quitar una etapa de equilibrio correspondiente con el calderín, como muestra la ecuación, se observa que el número mínimo de etapas de equilibrio son 7.

A.2.4.2. Relación de reflujo.

La columna debe operar con una relación de reflujo externo (R) que sea intermedia entre la mínima y el reflujo total. El factor económico es el determinante de la relación de reflujo elegida, que se encuentra en torno a 1,1 y 1,5 veces el reflujo mínimo (Rmin).

Se considera que el valor del factor es 1,3 para la obtención de un número intermedio de etapas, de manera que:

$$R = 1,3 \cdot R_{min} \quad [Ec. A. 6]$$

Relación de reflujo mínima.

Se trata de la relación de reflujo externo que requiere un número infinito de platos para separar los componentes clave del proceso. Este valor de reflujo, permitirá retirar del destilado todos los componentes más pesados que el Clave Pesado, y de la misma forma, extraer todos los componentes más ligeros que el Clave Ligero del fondo de columna.

Para la resolución de este tipo de separaciones, las cuales implican un elevado número de compuestos, se considera que pueden ocurrir dos situaciones y por tanto dos clases de reparto de componentes:

- CLASE 1: todos los componentes se distribuyen en destilado como en residuo¹⁸.

¹⁸ Residuo: es también llamado corriente de fondo o colas de columna.

- CLASE 2: uno o más componentes solamente aparece en destilado o en el residuo.

Al definir la separación de componentes de la columna estudiada como de CLASE 2, se utilizará el método aproximado propuesto por Underwood. Éste, considera lo que se indica a continuación:

- Primero, que la volatilidad relativa para cada componente es la misma en las zonas invariantes superior e inferior, o zonas de contacto que se encuentran a ambos lados de la etapa de alimentación.
- Segundo: que la composición entre platos adyacentes en estas zonas no varía.

La primera ecuación sugerida para la estimación del reflujo mínimo [Ec.A.7] expresa la volatilidad relativa de cada compuesto respecto a uno de referencia, generalmente, el clave pesado (n-decano), en relación con las composiciones y condición de alimentación, mediante las cuales se obtiene el valor de θ :

$$\sum \frac{(a_{i,ref})_{\infty} x_{Fi}}{(a_{i,ref})_{\infty} - \theta} = 1 - \phi \quad [Ec. A. 7]$$

Dónde:

- $(a_{i,ref})_{\infty}$: Volatilidad relativa de cada componente respecto al compuesto de referencia (n-decano) en alimentación.
- x_{Fi} : Fracción molar de cada componente en alimentación.
- θ : Constante buscada, que presenta un valor comprendido entre 1 y $\alpha_{LK,HK}$.
- ϕ : Condición de alimentación (Por ser líquido saturado, presenta un valor igual a 1).

Expresión que hace uso de datos de alimentación de la Tabla A.5 y la expresión [Ec.A.5], mediante las cuales se obtienen los resultados que se recogen en la Tabla A.6 referida a la alimentación (F).

Tabla A. 6. Volatilidades relativas y fracciones molares en alimentación y destilado.

Compuesto	$(\alpha_{i,c-10})_F$	$(\alpha_{i,c-10})_D$	X_F	X_D
Ácido Fluorhídrico	30,206	34,541	0,001	0,003
Benceno (LK)	8,705	6,329	0,231	0,992
Decano (HK)	1,000	1,000	0,110	0,005
Undecano	0,584	-	0,218	-
Dodecano	0,354	-	0,202	-
Tridecano	0,202	-	0,160	-
Tetradecano	0,111	-	0,003	-
n-Decil-Benceno	0,035	-	0,010	-
n-Undecil-Benceno	0,020	-	0,025	-
n-Dodecil-Benceno	0,012	-	0,022	-
n-Tridecil-Benceno	0,008	-	0,015	-
n-Tetradecil-Benceno	0,005	-	0,003	-
Alquilato pesado	0,003	-	0,001	-

Considerando que la solución de la constante, θ , satisface tanto a cabeza como a fondo de columna, se realiza el cálculo definido por la ecuación [Ec.A.7] mediante iteraciones o, como se ha realizado en el presente proyecto, con la Función SOLVER del programa Excel.

Se tiene en cuenta que debe presentar un valor comprendido en entre 1 y 8,705 así como, que el cálculo finaliza cuando los términos de la ecuación de iteración sean muy próximos entre sí. Concretamente, el sumatorio de la ecuación ofrece un valor de $2,88 \cdot 10^{-12}$ y la resta del término de la derecha es igual a cero por la condición de alimentación. Considerando que los dos anteriores resultados son cercanos entre si, se obtiene:

$$\theta = 1,863$$

A continuación se utiliza el valor de θ para resolver la expresión [Ec.A.8], mediante la cual, se realiza el cálculo del reflujo mínimo:

$$\sum \frac{(\alpha_{i,ref})_{\infty} X_{Di}}{(\alpha_{i,ref})_{\infty} - \theta} = 1 + R_{min} \quad [Ec. A. 8]$$

Siendo:

- $(\alpha_{i,ref})_{\infty}$: Volatilidad relativa de cada componente respecto al compuesto de referencia (n-Decano) en destilado.
- X_{Fi} : Fracción molar de cada componente en destilado.
- θ : Constante calculada anteriormente
- R_{min} : Reflujo mínimo

Expresión en la que se utilizan datos de Cabeza de columna (D) de la Tabla A.5 y la expresión de volatilidad relativa [Ec.A.5], resultando las cifras de la Tabla A.6 para cabeza. Mediante la solución de [Ec.A.8] con estos datos, se consigue la cifra correspondiente al reflujo externo mínimo:

$$R_{min} = 0,404$$

Relación de reflujo.

Como consecuencia, al recurrir a la ecuación de reflujo [Ec.A.6], el valor de la relación de reflujo externo (L/D) es:

$$R = 1,3 \cdot 0,404$$

$$R = 0,525$$

La relación de reflujo interna (L/V) requiere de la corriente de reflujo (L) y la corriente de vapor (V). Éstas se determinan posteriormente, y definen que la relación de reflujo interno es:

$$\frac{L}{V} = 0,344$$

A.2.4.3. Número de etapas de equilibrio.

En la estimación del número de etapas de equilibrio, o etapas necesarias para la separación impuesta de los componentes, se utilizará la correlación propuesta por Gilliland. Se trata de un método empírico sencillo que relaciona los valores de reflujo total, reflujo mínimo, etapas mínimas de equilibrio y etapas totales, mediante una gráfica:

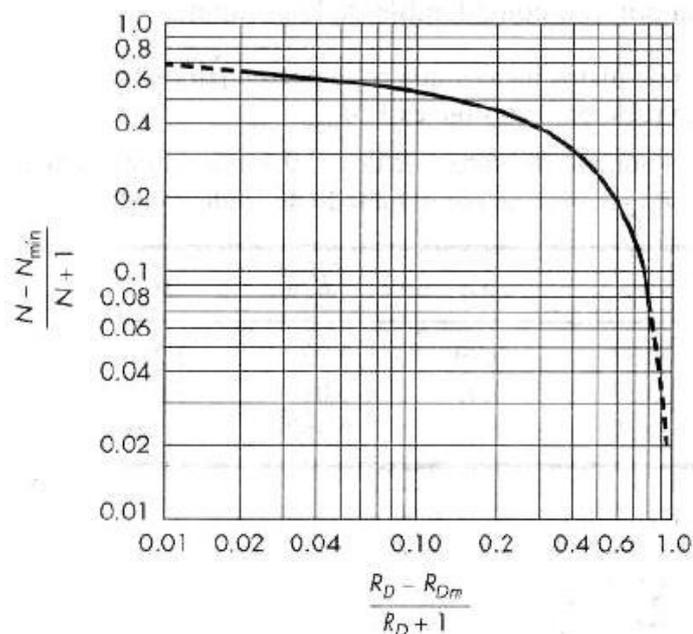


Figura A.1. Correlación de Gilliland [13].

En la cual, se realiza el cálculo del eje de abscisas mediante la relación:

$$\frac{R - R_{min}}{R + 1}$$

Teniendo en cuenta que el valor del reflujo total $R=0,525$ y sustituyendo los valores obtenidos en la anterior relación, se tiene:

$$\text{Eje de abscisas} = \frac{R - R_{min}}{R + 1} = \frac{0,525 - 0,404}{0,525 + 1} = 0,08$$

Valor con el que, según la gráfica, se consigue el número de etapas de equilibrio mediante el eje de coordenadas al emplear la definición siguiente:

$$\text{Eje de coordenadas} = 0,56 = \frac{N - N_{min}}{N + 1}$$

Despejando de la anterior expresión, se tiene que $N = 16,11 \approx 17$ platos.

Ecuación de Molokanov

La relación propuesta por Molokanov se trata de la representación de la gráfica de Gilliland por medio de una ecuación que se indica a continuación:

$$\frac{N - N_{min}}{N + 1} = 1 - \exp \left[\left(\frac{1 + 54,4X}{11 + 117,2X} \right) \left(\frac{X - 1}{X^{0,5}} \right) \right] \quad [Ec. A. 9]$$

En la que X se define como:

$$X = \frac{R - R_{min}}{R + 1}$$

Al contar con los datos solicitados, simplemente se sustituyen en la anterior relación, obteniendo $X=0,079$.

Valor con el cual, al remplazarlo en la ecuación de Molokanov [Ec.A.9], y despejar el parámetro requerido se consigue:

Número de etapas de equilibrio: $N=16,72 \approx 17$ platos.

Se comprueba por tanto, que los cálculos realizados mediante los dos métodos alcanzan resultados coincidentes.

A.2.5 Posición del plato de alimentación.

La posición del plato de alimentación se define mediante la ecuación propuesta por Kirkbride [Ec. A.10], la cual relaciona el número de platos teóricos existentes en la zona de rectificación y en la zona de agotamiento.

$$\frac{(NPT)_R}{(NPT) - (NPT)_R} = \left[\left(\frac{x_{F,HK}}{x_{F,LK}} \right) \cdot \left(\frac{x_{W,LK}}{x_{D,HK}} \right)^2 \cdot \frac{W}{D} \right]^{0,206} \quad [Ec. A. 10]$$

Dónde:

- $(NPT)_R$: Número de platos teóricos de la zona de rectificación.
- (NPT) : Número de platos teóricos en toda la columna. Anteriormente calculado e igual a 17.
- $X_{F,HK}$: Fracción molar en alimentación del componente clave pesado.

- $X_{F,LK}$: Fracción molar en alimentación del componente clave ligero.
- $X_{W,LK}$: Fracción molar en fondo del componente clave ligero.
- $X_{D,HK}$: Fracción molar en destilado del componente clave pesado.
- W : Caudal molar de la corriente de fondo de columna ($\text{kmol}\cdot\text{h}^{-1}$).
- D : Caudal molar de la corriente de destilado de columna ($\text{kmol}\cdot\text{h}^{-1}$).

Empleando los datos de la Tabla A.4 y Tabla A.6 se sustituyen datos en la ecuación y se tiene:

$$\frac{(NPT)_R}{(NPT) - (NPT)_R} = \left[\left(\frac{0,110}{0,231} \right) \cdot \left(\frac{1 \cdot 10^{-4}}{0,005} \right)^2 \cdot \frac{1,123}{341} \right]^{0,206} = 0,215$$

Despejando el número de platos en la zona de rectificación, se conocen todas las variables:

$(NPT)_R$: Número de platos teóricos de la zona de rectificación igual a 3.

(NPT) : Número de platos teóricos en toda la columna igual a 17.

$(NPT)_A$: Número de platos teóricos de la zona de agotamiento igual a 14.

Por tanto, la corriente de alimentación ingresa a la columna entre los platos de equilibrio 3 y 4, al tratarse de un líquido, cae directamente al plato 4.

A.2.6 Número de etapas reales.

La eficacia global de columna (E_G) permite calcular el valor de platos reales (NPR) mediante el número de platos teóricos (NPT) siguiendo la relación:

$$E_G = \frac{NPT}{NPR} \cdot 100 \quad [Ec. A. 11]$$

En el caso de eficacia de platos que operan con mezclas de hidrocarburos, la viscosidad de los compuestos tiene una gran influencia sobre el recorrido del fluido por los platos, es por eso que se va a emplear la correlación empírica propuesta por Drickamer y Bradford descrita a continuación:

$$E_G = 0,17 - 0,616 \cdot \log \sum_i \left(x_{Fi} \cdot \frac{\mu_{Li}}{\mu_{Agua}} \right) \quad [Ec. A. 12]$$

Y es aplicable al proceso, ya que cumple los siguientes requisitos:

- Temperatura media de operación entre 157°C y 420°F.
- Presión de la columna entre 14,7 y 366 psia.
- Viscosidad del líquido entre 0,066 y 0,355 cP.
- Para una eficacia de entre 41% y 88%.

La presión media en columna:

Considerando una caída de presión en el condensador de 0,34 atm y una caída de presión de 0,010 atm por metro o 0,006 atm por plato para una separación entre platos inicial de 0,61 m. Se tiene como resultado una presión en cabeza de columna de 2,11 atm y en el fondo de 2,56 atm.

$$P_{media} = \frac{P_{cabeza} + P_{fondos}}{2} = \frac{2,11 \text{ atm} + 2,56 \text{ atm}}{2} = 2,33 \text{ atm} = 34,29 \text{ psia}$$

Temperatura media en columna:

Los datos de temperatura de cabeza y fondo de columna se obtienen mediante el simulador Aspen HYSYS. Sin embargo, se pueden obtener mediante las fracciones de los compuestos y las temperaturas de ebullición para las corrientes a las presiones correspondientes.

$$T_{media} = \frac{T_{cabeza} + T_{fondos}}{2} = \frac{106,39^{\circ}\text{C} + 252,15^{\circ}\text{C}}{2} = 179,27^{\circ}\text{C} = 354,69^{\circ}\text{F}$$

La viscosidad del líquido:

Se realiza el sumatorio de la multiplicación de la viscosidad de cada compuesto (μ_{Fi}) a las condiciones medias de columna con la fracción molar (x_{Fi}) que cada uno presenta en la corriente de alimentación. Mediante los datos de la Tabla A.7, el sumatorio resulta 0,220.

Tabla A. 7. Datos del cálculo de eficacia de columna.

Compuesto	x_{Fi}	μ_{Fi} (cP)
Ácido Fluorhídrico	0,001	0,008
Benceno	0,231	0,011
Decano	0,110	0,197
Undecano	0,218	0,226
Dodecano	0,202	0,253
Tridecano	0,160	0,298
Tetradecano	0,003	0,336
n-Decil-Benceno	0,010	0,505
n-Undecil-Benceno	0,025	0,560
n-Dodecil-Benceno	0,022	0,637
n-Tridecil-Benceno	0,015	0,730
n-Tetradecil-Benceno	0,003	0,798
Alquilato pesado	0,001	0,917

μ_{Agua} : Viscosidad de referencia a 20°C (cP). Tiene un valor de 1cP.

Por tanto, la eficacia es:

$$E_G = 0,17 - 0,616 \cdot \log 0,220 = 0,5749$$

$$E_G = 57,49 \%$$

Despejando de la ecuación [Ec.A.11] el número de platos reales, y sustituyendo valores para la zona de rectificación y de agotamiento, se llega a:

$$NPR = \frac{NPT}{E_G} \cdot 100 = \frac{17}{57,49} \cdot 100 = 29,57 \approx 30 \text{ platos}$$

Para conocer el número de platos teóricos en la zona de rectificación y agotamiento, se recurre nuevamente a la ecuación de Kirkbride [Ec.A.10], con los mismos datos de fracciones y caudales molares, pero cambiando o actualizando el número de platos totales (30 platos teóricos en lugar de 17).

Por consiguiente, se tienen un total de 30 platos reales en la columna, contando con 6 platos en la zona de rectificación y 24 platos en la zona de agotamiento. La corriente de alimentación ingresa a la columna entre los platos 6 y 7, cayendo directamente al plato 7 pues se trata de un líquido.

A.3 Diseño hidráulico de la columna.

Este apartado, es dirigido hacia la determinación de las dimensiones, de columna y platos, que hacen posible el correcto funcionamiento de la unidad de separación, verificando que no se produzcan los fenómenos de lloriqueo, arrastre, inundación y descarga.

El diseño hidráulico de la columna va a realizarse tomando como plato de referencia al último de la zona de agotamiento, que es el número 30, debido a que es esta la etapa en la que se dan las condiciones de operación más desfavorables. Mediante este análisis, se consiguen mayores dimensiones de columna y menores riesgos a la hora de realizar la separación. Sin embargo, se tiene en cuenta también el diámetro requerido por el último plato de la zona de rectificación, plato número 6, al tratarse de la etapa de esta zona que cuenta con las condiciones de operación más desfavorables; si los diámetros obtenidos en las dos zonas tienen más de un 20% de diferencia entre ellos, entonces dos diámetros diferentes de torre tendrían un costo menor en su construcción [21].

A.3.1. Cálculo de caudales molares internos

Primero es necesario conocer los caudales molares internos, de líquido y vapor circulante por las zonas de rectificación y agotamiento, por tanto se realiza un balance de materia tanto al condensador como al plato de alimentación.

A.3.1.1. Balance de materia al condensador

Conviene destacar que el condensador es total, y por ende, todo el vapor que es introducido en él (V) se convierte al estado líquido. El condensado obtenido se divide en dos corrientes según la siguiente ecuación:

$$V = L + D$$

Dónde:

- V : Vapor introducido en el condensador ($\text{kmol}\cdot\text{h}^{-1}$).
- L : Líquido que retorna a columna como reflujo ($\text{kmol}\cdot\text{h}^{-1}$).
- D : Líquido que sale de columna como producto destilado ($\text{kmol}\cdot\text{h}^{-1}$).

Como se mencionó en el apartado A.2.4, es hasta este punto cuando se realiza la determinación del reflujo interno a modo de seguir un orden de resolución. Por tanto, se sabe que $R=L/D$ es 0,525 y que $D=341 \text{ kmol}\cdot\text{h}^{-1}$, con lo cual, es posible obtener L y V como sigue:

$$L = R \cdot D = 0,525 * 341 \frac{\text{kmol}}{\text{h}} = 179 \frac{\text{kmol}}{\text{h}}$$

$$V = L + D = 179 \frac{\text{kmol}}{\text{h}} + 341 \frac{\text{kmol}}{\text{h}} = 519 \frac{\text{kmol}}{\text{h}}$$

La relación de reflujo interna (L/V) es entonces:

$$\frac{L}{V} = \frac{179 \frac{\text{kmol}}{\text{h}}}{519 \frac{\text{kmol}}{\text{h}}} = 0,344$$

A.3.1.2. Balance de materia al plato de alimentación

Mediante el balance de materia al plato de alimentación (plato f) se obtendrán los caudales internos de la zona de agotamiento de la torre, L' y V' , o caudal de líquido y vapor que atraviesa el plato, a partir de las expresiones:

$$L' = L + \phi F$$

$$V' = V - (1 - \phi) \cdot F$$

Siendo:

- L' : Caudal de líquido que abandona el plato de alimentación hacia la zona de agotamiento ($\text{kmol}\cdot\text{h}^{-1}$).
- L : Caudal de líquido que cae al plato de alimentación desde la zona de rectificación ($\text{kmol}\cdot\text{h}^{-1}$).
- ϕ : Condición de alimentación.
- F : Caudal de alimentación ($\text{kmol}\cdot\text{h}^{-1}$).
- V' : Caudal de vapor que llega al plato de alimentación proveniente de zona de agotamiento ($\text{kmol}\cdot\text{h}^{-1}$).
- V : Caudal de vapor que abandona el plato de alimentación hacia la zona de rectificación ($\text{kmol}\cdot\text{h}^{-1}$).

Sustituyendo datos se tiene:

$$L' = 179 \frac{\text{kmol}}{\text{h}} + 1 \cdot 1.464 \frac{\text{kmol}}{\text{h}} = 1.643 \frac{\text{kmol}}{\text{h}}$$

$$V' = 519 \frac{\text{kmol}}{\text{h}} - (1 - 1) \cdot 1.464 \frac{\text{kmol}}{\text{h}} = 519 \frac{\text{kmol}}{\text{h}}$$

Tabla A. 8. Corrientes de entrada y salida del plato de alimentación.

	Ingreso al plato f	Salida del plato f
Caudal de Líquido (kmol·h⁻¹)	179	1.643
Caudal de Vapor (kmol·h⁻¹)	519	519

A.3.2. Diámetro de columna

A.3.2.1. Cálculo de caudales máscicos y volumétricos

Para la determinación de algunos parámetros en el cálculo del diámetro de columna es necesario conocer los caudales máscicos y volumétricos en la zona más desfavorable de columna, el último plato de la zona de agotamiento.

El vapor y el líquido que circulan en la torre presentan las propiedades recogidas en la Tabla A.9.

Tabla A. 9. Propiedades de las corrientes del último plato de la zona de agotamiento.

Propiedad	Vapor (V')	Líquido (L')
Presión (atm)	2,61	2,61
Temperatura (°C)	253,21	253,21
Caudal molar, V' o L' (kmol·h ⁻¹)	519	1.643
Peso molecular, PM _i (kg·kmol ⁻¹)	160,39	172,46
Densidad, ρ _i (kg·m ⁻³)	10,92	565,22
Viscosidad, μ _i (kg·m ⁻¹ ·s ⁻¹)	0,79·10 ⁻⁵	16,29·10 ⁻⁵
Tensión superficial, σ (N·m ⁻¹)	-	7,42·10 ⁻³

La densidad del vapor (ρ_v), se puede calcular siguiendo la ley de los gases ideales, en las condiciones a las que se encuentra la corriente, de la siguiente forma:

$$\rho_V = \frac{P \cdot PM}{R \cdot T}$$

Siendo:

- P: Presión de operación (atm).
- PM: Peso molecular (kg·kmol).
- R: Constante de los gases ideales (atm·m³·kmol⁻¹·K⁻¹). Igual a 0,082 atm·m³·kmol⁻¹·K⁻¹.
- T: Temperatura de operación (K).

Sustituyendo los datos conocidos se tiene:

$$\rho_V = 10,44 \frac{kg}{m^3}$$

Y para obtener la viscosidad, se relaciona la viscosidad de cada componente a las condiciones de operación con su fracción molar correspondiente a cada corriente.

Sin embargo, al emplear relaciones de gases ideales, se diferencian con las propiedades de los fluidos obtenidas mediante el simulador, el cual utiliza las ecuaciones de Peng-Robinson para estimarlas. Es por esta razón, que se emplean estas últimas para el diseño de la columna, así se puede obtener resultados más cercanos a la realidad. Dichas propiedades se encuentran recogidas en la Tabla A.9.

- **Cálculo de caudales másicos**

Para la determinación del caudal másico del líquido se sigue la expresión:

$$Q_{m,L'} = L' \cdot PM_{L'}$$

Reemplazando datos, se tiene:

$$Q_{m,L'} = 1.643 \frac{kmol}{h} \cdot 172,46 \frac{kg}{kmol} = 283.291 \frac{kg}{h}$$

De la misma forma se prosigue con el vapor:

$$Q_{m,V'} = V' \cdot PM_{V'}$$

$$Q_{m,V'} = 519 \frac{kmol}{h} \cdot 160,39 \frac{kg}{kmol} = 83.313 \frac{kg}{h}$$

- **Cálculo de caudales volumétricos**

En el cálculo del caudal volumétrico correspondiente al líquido se hace uso de la ecuación:

$$Q_{L'} = \frac{Q_{m,L'}}{\rho_{L'}}$$

En la que se sustituyen datos:

$$Q_{L'} = \frac{283.291 \frac{kg}{h}}{564,22 \frac{kg}{m^3}} = 502 \frac{m^3}{h} = 0,14 \frac{m^3}{s}$$

De la misma forma para el vapor:

$$Q_{V'} = \frac{83.313 \frac{kg}{h}}{10,92 \frac{kg}{m^3}} = 7627 \frac{m^3}{h} = 2,12 \frac{m^3}{s}$$

Datos que se recogen en la Tabla A.10.

Tabla A. 10. Caudales de diseño o de zona de agotamiento.

	Vapor	Líquido
Caudal másico (kg·h⁻¹)	83,313	283.291
Caudal volumétrico (m³·s⁻¹)	2,12	0,14

A.3.2.2. Dimensiones del plato.

Se han escogido platos perforados para realizar la separación de componentes en la columna diseñada en el presente proyecto, y deben considerarse varios factores para definirlos completamente, como son: el diámetro de orificio, pitch o distancia entre orificios y distancia de separación entre platos.

Tabla A. 11. Dimensiones de plato.

do: Diámetro de orificio (mm)	9
p': Pitch (mm)	27
t: Espaciamento entre platos (mm)	610

Se escogen estos valores debido al material utilizado y la relación entre el diámetro de orificio y espesor de plato según la siguiente tabla obtenida de la bibliografía:

Relaciones entre el diámetro de orificio y el espesor de plato [21].

Diámetro de orificio		Espesor de plato/diámetro de orificio	
mm	in	Acero inoxidable	Acero al carbono
3,0	1/8	0,65	-
4,5	3/16	0,43	-
6,0	1/4	0,32	-
9,0	3/8	0,22	0,50
12,0	1/2	0,16	0,38
15,0	5/8	0,17	0,30
18,0	3/4	0,11	0,25

Al emplear platos de acero al carbono (la justificación del material se detalla en la memoria descriptiva, apartados referentes a la columna de destilación), la relación espesor de plato-diámetro de orificio es 0,50 y si el diámetro del orificio es 9 mm, entonces el espesor de plato es 5 mm.

Las perforaciones se colocarán, en general, en los vértices de un triángulo equilátero a una distancia o "pitch" (p'), entre los centros de 2,5 a 5 veces el diámetro del orificio; en este diseño se considera un pitch 3 veces el diámetro del orificio, es decir, 27 mm.

A.3.2.3. Parámetro de flujo.

Se utiliza el número adimensional denominado Parámetro de flujo (PF) para el diseño de los platos y la verificación de los fenómenos de arrastre, inundación, lloriqueo y bloqueo por vapor en la columna, que queda definido como:

$$PF = \frac{L'}{V'} \left(\frac{\rho_V}{\rho_L} \right)^{1/2}$$

Dónde:

- L': Caudal másico de líquido en la zona de agotamiento (kg·h⁻¹).
- V': Caudal másico de vapor en la zona de agotamiento (kg·h⁻¹).
- ρ_v: Densidad del vapor (kg·m⁻³).
- ρ_L: Densidad del líquido (kg·m⁻³).

Sustituyendo datos se obtiene:

$$PF = \frac{283.291 \frac{kg}{h}}{83.313 \frac{kg}{h}} \cdot \left(\frac{10,92 \frac{kg}{m^3}}{564,22 \frac{kg}{m^3}} \right)^{1/2} = 0,47$$

Debe tenerse en cuenta que se toma como valor de PF igual a 0,1 (situación más desfavorable) en caso de que la cifra calculada sea menor a 0,1. No obstante, el número adimensional calculado es 0,47, que es mayor al mencionado anteriormente, por lo que se realizarán los cálculos siguientes con éste valor.

A.3.2.4. Velocidad de ascensión del vapor.

La determinación de la velocidad de ascensión del vapor (v) requiere del conocimiento de la velocidad de inundación (v_F), la cual depende del coeficiente de inundación (C_F) y que a la vez éste se acata al valor de la relación entre el área de orificios (A₀) y el área activa (A_a) de plato. Por tanto, se inicia el cálculo mediante la definición de estos parámetros.

El coeficiente de inundación (C_F), se determina mediante la siguiente ecuación:

$$C_F = \left[\alpha \cdot \log \left(\frac{1}{PF} \right) + \beta \right] \left[\frac{\sigma}{0,020} \right]^{0,2} \quad [Ec. A. 13]$$

Con lo cual es necesario definir:

$$\alpha = 0,0744 \cdot t + 0,01173 \quad [Ec. A. 14a]$$

$$\beta = 0,0304 \cdot t + 0,015 \quad [Ec. A. 14b]$$

Se debe conocer primero la relación entre el área de orificios y el área activa de los platos perforados que se calcula a través de una expresión que

contempla tanto el diámetro de orificios (d_0) como el pitch (p') del plato de la siguiente forma:

$$\frac{A_0}{A_a} = 0,907 \left(\frac{d_0}{p'} \right)^2$$

Sustituyendo datos se obtiene:

$$\frac{A_0}{A_a} = 0,907 \left(\frac{9 \text{ mm}}{27 \text{ mm}} \right)^2 = 0,101$$

Al ser esta relación mayor a 0,1 los valores de α y β para el cálculo de C_F , que dependen del espaciamiento entre platos ($t=0,61\text{m}$), se determinan mediante las ecuaciones [Ec.A.14a] y [Ec.A.14b], ya que, en caso de ser menor el valor de la relación, se deben multiplicar estos factores por: $5 \cdot A_0 / A_a + 0,5$.

$$\alpha = 0,0744 \cdot 0,61\text{m} + 0,01173 = 0,057$$

$$\beta = 0,0304 \cdot 0,61\text{m} + 0,015 = 0,034$$

Datos con los cuales se podrá calcular el coeficiente de inundación (C_F) con la expresión [Ec.I.13] que tiene en cuenta la tensión superficial (σ):

$$C_F = \left[0,057 \cdot \log \left(\frac{1}{0,47} \right) + 0,034 \right] \left[\frac{7,42 \cdot 10^{-3}}{0,020} \right]^{0,2} = 0,043$$

Con respecto a la velocidad de ascensión del vapor, normalmente se toma un valor del 80% de la velocidad de inundación cuando se opera con fluidos no espumantes, siendo éste el caso de los fluidos implicados en este proyecto en concreto. Para conocer el valor de la velocidad de inundación se hace uso de la correlación empírica:

$$v_F = C_F \left(\frac{\rho_L - \rho_V}{\rho_V} \right)^{0,5}$$

Expresión en la cual se reemplazan los datos obtenidos anteriormente:

$$v_F = 0,043 \left(\frac{564,22 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} - 10,92 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{10,92 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} \right)^{0,5} = 0,30 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Por tanto, la velocidad de ascensión del vapor será:

$$v = 0,8 \cdot v_F = 0,8 \cdot 0,30 \frac{m}{s} = 0,24 \frac{m}{s}$$

A.3.2.5. Área neta.

La sección neta transversal se calcula en base al flujo de vapor que circula a través de ésta mediante la siguiente expresión:

$$Q_{V'} = A_n \cdot v$$

Siendo:

- $Q_{V'}$: Caudal volumétrico de vapor ($m^3 \cdot s^{-1}$)
- A_n : Área neta (m^2)
- v = Velocidad de ascensión del vapor ($m \cdot s^{-1}$)

Despejando de la anterior ecuación, se tiene que el valor del área neta es:

$$A_n = \frac{Q_{V'}}{v} = \frac{2,12 \frac{m^3}{s}}{0,24 \frac{m}{s}} = 8,71 m^2$$

A.3.2.6. Área transversal.

Respecto al valor del área de vertedero (A_v), para el caso de derramaderos rectangulares rectos en platos de flujo transversal, se recomienda una longitud de vertedero (W) entre 0,6 y 0,8 veces el diámetro de la torre (T) según la tabla adjunta:

Tabla A. 12. Relaciones entre longitud de derramadero y diámetro de torre [21].

Longitud del derramadero	Distancia desde el centro de la torre	Porcentaje de área utilizado
W	x	%
0,55·T	0,4181·T	3,877
0,60·T	0,3993·T	5,257
0,64·T	0,2516·T	6,899
0,70·T	0,3562·T	8,808
0,75·T	0,3296·T	11,255
0,80·T	0,1991·T	14,145

La relación elegida, para el diseño de la columna, entre T y W es 0,7 con lo cual, la distancia desde el centro de la torre será 0,3562 veces T, y el porcentaje de área utilizado (A_v/A_t)= 8,808, que se tratan de los valores típicos empleados en el diseño de este tipo de columnas.

Al combinar la relación (A_v/A_t) con la que sostiene el área transversal con el área neta (A_n) y con la del vertedero (A_v), se puede determinar el área A_t .

$$A_t = A_n + A_v \quad [Ec. A. 15]$$

Se despeja A_t luego de sustituir A_v/A_t en la anterior ecuación, obteniendo:

$$A_t = \frac{A_n}{1 - \frac{A_v}{A_t}} \quad [Ec. A. 16]$$

Y sustituyendo datos:

$$A_t = \frac{8,71 \text{ m}^2}{1 - 0,088} = 9,55 \text{ m}^2$$

A.3.2.7. Diámetro de columna.

Finalmente, al tratarse la columna de un elemento cilíndrico, se sabe que el vínculo entre el área transversal y el diámetro de la torre es:

$$A_t = \pi \cdot \frac{T^2}{4} \quad [Ec. A. 17]$$

Relación con la que se puede obtener T:

$$T = \sqrt{A_t \cdot \frac{4}{\pi}} = \sqrt{9,55 \text{ m}^2 \cdot \frac{4}{\pi}} = 3,49 \text{ m} = 11,44 \text{ ft} = 137,30 \text{ in}$$

Para definir las dimensiones de la columna deben cumplirse dos situaciones:

Primero: El diámetro de la torre se debe aproximar a un valor comercial.

Segundo: Con el valor del diámetro comercial se recalculan las áreas y se prosigue a verificar los fenómenos de lloriqueo, arrastre, inundación y descarga en la columna.

Adicionalmente, como se ha comentado al inicio, se deben realizar los mismos cálculos para la etapa más desfavorable en la zona de rectificación, el plato número 6. Los datos y resultados son los que se indican a continuación, teniendo en cuenta que los caudales molares de líquido y vapor, y las dimensiones de plato son las mismas que las utilizadas para la zona de agotamiento:

Datos:

- Presión: 2,47 atm.
- Temperatura: 172,28°C (445,43 K).
- Peso molecular: 150,54 kg·kmol⁻¹.
- Densidad líquido: 652,00 kg·m⁻³.
- Densidad vapor: 10,17 kg·m⁻³.
- Viscosidad líquido: 27,38·10⁻⁵ kg·m⁻³.
- Viscosidad vapor: 0,25·10⁻⁵ kg·m⁻³.
- Tensión superficial líquido: 12,5·10⁻³ N·m⁻¹.

Resultados:

Diámetro de columna: 3,02 m (9,91 ft o 118,88 in).

Diferencia de diámetros

Los diámetros obtenidos se diferencian en un 15,49% y a pesar de que es un valor cercano al 20%, no se va a considerar el diseño de dos diámetros distintos en la torre, pues el uso del material de menor coste y el ahorro económico que se genera en la totalidad del proyecto lo permiten.

A.3.2.8. Diámetro y cálculo definitivo de áreas.

Luego de elegir el diámetro de la columna requerido, existente en el comercio, para que no se produzca ninguno de los fenómenos mencionados anteriormente (lloriqueo, arrastre, inundación y descarga), se procede a recalcular las áreas de plato.

Adicionalmente, el flujo del líquido no debe ser superior a $0,015 \text{ m}^3$ por metro de diámetro de columna y segundo, para platos de flujo transversal de un solo paso [21].

El diámetro que satisface todos estos requerimientos es:

$$\text{Diámetro de columna: } T = 9,35 \text{ m} = 30,67 \text{ ft} = 368 \text{ in}$$

Seguidamente, utilizando la Tabla A.12, puede estimarse el valor tanto de la longitud del vertedero (W), como de la distancia de éste al centro de columna (x) y la longitud entre ambos vertederos (Z) de la siguiente forma:

$$W = 0,7 \cdot T = 0,7 \cdot 9,35 \text{ m} = 6,54 \text{ m}$$

$$x = 0,3562 \cdot T = 0,3562 \cdot 9,35 \text{ m} = 3,33 \text{ m}$$

$$Z = 2 \cdot x = 2 \cdot 3,33 \text{ m} = 6,66 \text{ m}$$

Verificando que cumple con la solicitud del flujo de líquido comentado:

$$\frac{L'}{T} = \frac{0,14 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{9,35 \text{ m}} = 0,014 \frac{\text{m}^3}{\text{m} \cdot \text{s}} < 0,015 \frac{\text{m}^3}{\text{m} \cdot \text{s}}$$

- **Área transversal**

Se introduce el nuevo dato de diámetro de columna en la ecuación [Ec.I.17] para la obtención de A_t :

$$A_t = \pi \cdot \frac{9,35^2}{4} = 68,62 \text{ m}^2$$

- **Área neta**

Con el valor de A_t y la ecuación [Ec.A.16], se despeja y se consigue el área neta del plato:

$$A_n = 68,62 \cdot (1 - 0,088) = 62,58 \text{ m}^2$$

- **Área del vertedero**

Mediante el porcentaje de área utilizado, según la Tabla A.12, se obtiene el valor del área de vertedero.

$$A_v = A_t \cdot \frac{A_v}{A_t} = 68,62 \text{ m}^2 \cdot 0,088 = 6,04 \text{ m}^2$$

Al operar con una presión elevada en la columna y una separación de 0,61 m entre platos, se recomienda que el faldón del vertedero tenga una longitud menor al espaciamiento entre platos en 0,05 m, es decir, una altura de 0,56 m [22].

- **Área y espesor de las vigas**

Cada plato estará soportado por vigas, las secundarias o menores situadas paralelas al largo del vertedero y una principal o mayor perpendicular atravesando el diámetro de la torre, ocupando un área determinada. Suelen tomar incluso más de un 15% del área transversal del plato, por tanto se considera que el área de las vigas en este diseño, por ser un diámetro considerable de columna, es un 18% del área transversal:

$$A_{vig} = 0,18 \cdot A_t = 0,18 \cdot 68,62 \text{ m}^2 = 12,35 \text{ m}^2$$

El ancho de las vigas se determina mediante la división del área total de vigas en 7 partes iguales, con lo que se tiene que el área por viga es igual a 1,76 m².

La viga secundaria de diámetro igual al de la torre 9,35 m, tiene como consecuencia un ancho de 189 mm, considerando vigas rectangulares.

La viga principal, tendrá el doble del ancho de las vigas secundarias, es decir 378 mm, y cuenta con una longitud de 8,00 m.

La viga que rodea el plato, de diámetro 9,35 m, presenta un ancho igual a 180 mm. Y tendrán el mismo ancho las dos vigas secundarias de longitud 6,54 m.

Al ser una torre de diámetro mayor a 4,60 m, el espesor de las vigas de acero al carbono es de 13 mm [22].

- **Área activa**

El área activa o área de burbujeo (A_a) se define como el área transversal menos el área de vertederos y vigas según la ecuación siguiente:

$$A_a = A_t - 2 \cdot A_V - A_{vig}$$

Sustituyendo datos:

$$A_a = 68,62 \text{ m}^2 - 2 \cdot 6,04 \text{ m}^2 - 12,35 \text{ m}^2 = 44,18 \text{ m}^2$$

A.3.3. Lloriqueo.

El fenómeno de lloriqueo ocurre cuando la velocidad de vapor ascendente es muy baja y el líquido que proviene del plato superior "gotea" a través de los orificios por donde debería fluir el vapor.

Dicho de otro modo, para evitar que se produzca lloriqueo en columna debe verificarse que la velocidad del vapor sea mayor que la de lloriqueo (V_{vm}).

Siguiendo la siguiente expresión, se puede calcular la velocidad de lloriqueo:

$$\frac{V_{vm} \cdot \mu_V}{\sigma} = 0,0229 \left[\frac{\mu_V^2 \rho_L}{\rho_V \cdot \sigma \cdot d_o \rho_V} \right]^{0,379} \left(\frac{e}{d_o} \right)^{0,293} \left(\frac{2 \cdot A_a \cdot d_o}{\sqrt{3} \cdot p'^3} \right) \left(\frac{Z}{d_o} \right)^{\frac{2,8}{0,724}} \quad [Ec. A. 18]$$

Dónde:

- V_{vm} : Velocidad de lloriqueo ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$).
- μ_V : Viscosidad del vapor ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$). Igual a $0,79 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$.
- σ : Tensión superficial ($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$). Igual a $7,42 \cdot 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$.
- ρ_V : Densidad del vapor ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$). Igual a $10,92 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.
- ρ_L : Densidad del líquido ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$). Igual a $564,22 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.
- d_o : Diámetro de orificios (m). Igual a 9 mm o 0,009 m.
- e/d_o : Relación espesor del plato-diámetro de orificios. Igual a 0,5.
- A_a : Área activa (m^2). Igual a $44,18 \text{ m}^2$.
- p' : Pitch (m). Igual a 27 mm o 0,027 m.
- Z : Distancia entre los dos vertederos (m). Igual a 6,66 m.

Sustituyendo datos en [Ec.A.18] se estima la velocidad de lloriqueo, y se tiene que:

$$V_{Vm} = 0,21 \frac{m}{s}$$

Dado que la velocidad del vapor es $0,24 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, calculada en el Apartado A.3.2., y que es mayor a la velocidad de lloriqueo, se puede garantizar que en la columna no se produce tal fenómeno.

A.3.4. Arrastre.

Éste parámetro es de vital importancia en el posterior cálculo de la eficacia del plato. La forma más común de estimarlo es gráficamente (Figura A.2).

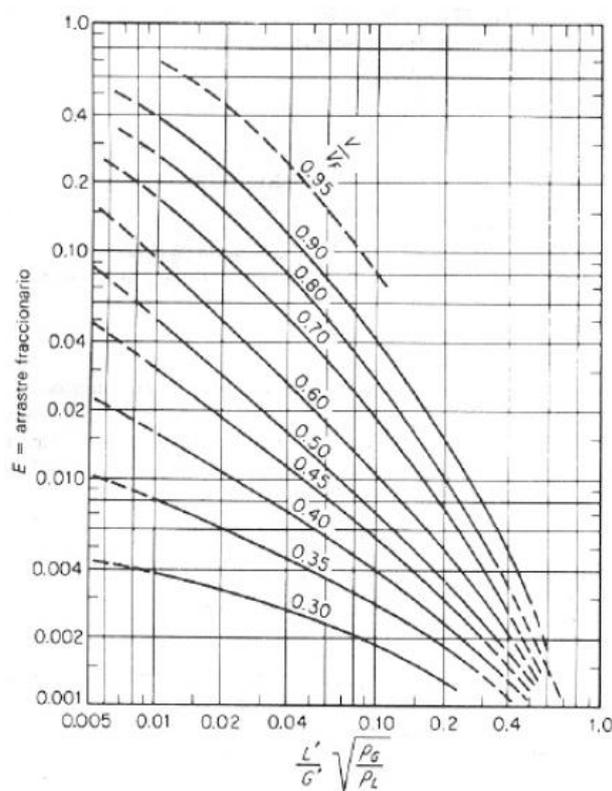


Figura A.2. Arrastre, platos perforados [21].

Si V/V_F es 0,8 y el parámetro de flujo (PF) o coordenada x de la gráfica es 0,47 el arrastre fraccional será 0,003 que se considera despreciable al ser menor a 0,1. Por tanto, no se produce arrastre en la columna.

A.3.5. Inundación.

Para verificar la ausencia de inundación, se debe cumplir que la altura de líquido en el vertedero sea menor que la mitad del espaciamiento entre platos. Esta condición viene dada por:

$$h_W + h_C + \Delta + h_B < \frac{t}{2} \quad [\text{Ec. A. 19}]$$

Expresión que relaciona la altura del vertedero (h_W), altura de la cresta de líquido sobre el vertedero (h_C), el gradiente de nivel de líquido del plato desde el punto de entrada al de salida (Δ) que se considera despreciable para el diseño de platos perforados ($\Delta \approx 0$), altura en el vertedero (h_B) y el espaciamiento entre platos (t). Por lo que se prosigue a la determinación de dichas pérdidas de carga en el plato.

A.3.5.1. Altura de rebosadero, h_W .

De forma genérica, la altura de rebosadero, derramadero o presa, suele tomar el valor de la décima parte de la separación entre platos:

$$h_W = \frac{t}{10} = \frac{0,61 \text{ m}}{10} = 0,061 \text{ m} = 61 \text{ mm}$$

A.3.5.2. Altura de la cresta de líquido, h_C .

La altura de la cresta del líquido sobre el vertedero puede calcularse mediante dos ecuaciones, la primera de ellas se trata de la Ecuación de Francis [Ec.A.20] a la cual debe modificarse despejando la altura e introduciendo el término de ancho de vertedero (W), ecuación [Ec.A.21]. La segunda ecuación, a partir de consideraciones geométricas, permite relacionar el ancho de vertedero con el ancho efectivo de vertedero (W_{ef}) y h_C , expresión [Ec.A.22].

Con esto, se debe realizar un cálculo iterativo, con el objetivo de calcular tanto el valor de W_{ef} como de h_c .

$$\frac{Q_{L'}}{W_{ef}} = 1,839 \cdot h_c^{3/2} \quad [Ec. A. 20]$$

$$h_c = 0,666 \left(\frac{Q_{L'}}{W_{ef}} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot \left(\frac{W_{ef}}{W} \right)^{\frac{2}{3}} \quad [Ec. A. 21]$$

$$\left(\frac{W_{ef}}{W} \right)^2 = \left(\frac{T}{W} \right)^2 - \left[\left(\frac{T^2}{W^2} - 1 \right)^{\frac{1}{2}} + \frac{2 \cdot h_c}{T} \left(\frac{T}{W} \right) \right]^2 \quad [Ec. A. 22]$$

Siendo:

- $Q_{L'}$: Caudal volumétrico de líquido ($m^3 \cdot s^{-1}$). Igual a $0,14 m^3 \cdot s^{-1}$.
- W_{ef} : Ancho efectivo de vertedero (m).
- T : Diámetro de columna (m). Igual a $9,35 m$.

Sustituyendo datos, y realizando las iteraciones mediante SOLVER del programa Excel, el cual nos permite operar hasta el momento en que en ambas ecuaciones se obtengan valores muy similares de h_c , concretamente con una diferencia entre ellos de $1,02 \cdot 10^{-14}$ unidades. Se consiguen los siguientes resultados:

$$W_{ef} = 6,44 m$$

$$h_c = 0,051 m = 51 mm$$

A.3.5.3. Altura de retroceso de líquido, h_B .

La altura que alcanza el líquido en el vertedero (h_B) se define como la suma de la diferencia de presiones del líquido al acceder al plato (h_E) definida por la expresión [Ec.A.24] y la del vapor entre plato y plato (h_{VAP}) expresión [Ec.A.25].

$$h_B = h_E + h_{VAP} \quad [Ec. A. 23]$$

- **Pérdida de carga del líquido al acceder al plato, h_E**

Se define mediante la siguiente ecuación:

$$h_E = \frac{3}{2g} \left(\frac{Q_{Ll}}{A_{da}} \right)^2 \quad [Ec. A. 24]$$

Para la que:

- g : Aceleración de la gravedad ($m \cdot s^{-2}$). Igual a $9,81 m \cdot s^{-2}$.
- Q_{Ll} : Caudal volumétrico de líquido ($m^3 \cdot s^{-1}$). Igual a $0,14 m^3 \cdot s^{-1}$.
- A_{da} : será la menor de dos áreas, la del vertedero A_v y el área libre entre el vertedero y el plato A_L (m^2). Donde A_L relaciona la altura del rebosadero (h_w) con la longitud del vertedero (W) como sigue:

$$A_L = (h_w - 0,025) \cdot W$$

$$A_L = (0,061 m - 0,025) \cdot 6,54 m = 0,235 m^2$$

Al ser el valor del área del vertedero igual a $6,04 m^2$, A_{da} es igual a $0,235 m^2$.

Con lo cual, sustituyendo valores en la ecuación [Ec.A.24]:

$$h_E = \frac{3}{2 \cdot 9,81 \frac{m}{s^2}} \left(\frac{0,14 \frac{m^3}{s}}{0,235 m^2} \right)^2 = 0,054 m = 54 mm$$

- **Pérdida de carga del vapor entre plato y plato, h_{VAP}**

Expresión que relaciona 3 pérdidas de carga:

$$h_{VAP} = h_D + h_L + h_R \quad [Ec. A. 25]$$

Éstas se definen como sigue:

h_D : Pérdida de carga en plato seco (m).

$$h_D = \left(\frac{v_o^2}{C'_o} \right) \left(\frac{\rho_V}{2g\rho_L} \right) \quad [Ec. A. 26]$$

Expresión que contiene:

- v_o : Velocidad del vapor a través de las perforaciones ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$).

Se define como la relación entre el caudal volumétrico del vapor ($V'=2,12 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$) y el área de orificios relacionada con el diámetro de orificios ($A_o=4,45 \text{ m}^2$) resultando $0,48 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Teniendo en cuenta que el área de orificios (A_o) se determina al multiplicar la relación $A_o/A_a=0,101$ por el área activa (A_a) igual a $44,18 \text{ m}^2$ y que por tanto $A_o=4,45 \text{ m}^2$.

- C'_o : Coeficiente de orificio que depende del área abierta y de la relación entre el espesor del plato y el diámetro de la perforación según la gráfica A.3.

Sabiendo que la relación entre el espesor del plato y el diámetro de la perforación es igual a $e/d_o=0,5$ y que el área abierta o Área de orificios/Área transversal: $A_o/At=0,06$.

Mediante la gráfica se tiene un valor del coeficiente de orificio igual a $0,71$.

- ρ_V : Densidad del vapor ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$). Igual a $10,92 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.
- g : Constante de gravedad ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$). Igual a $9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$.
- ρ_L : Densidad del líquido ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$). Igual a $564,22 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

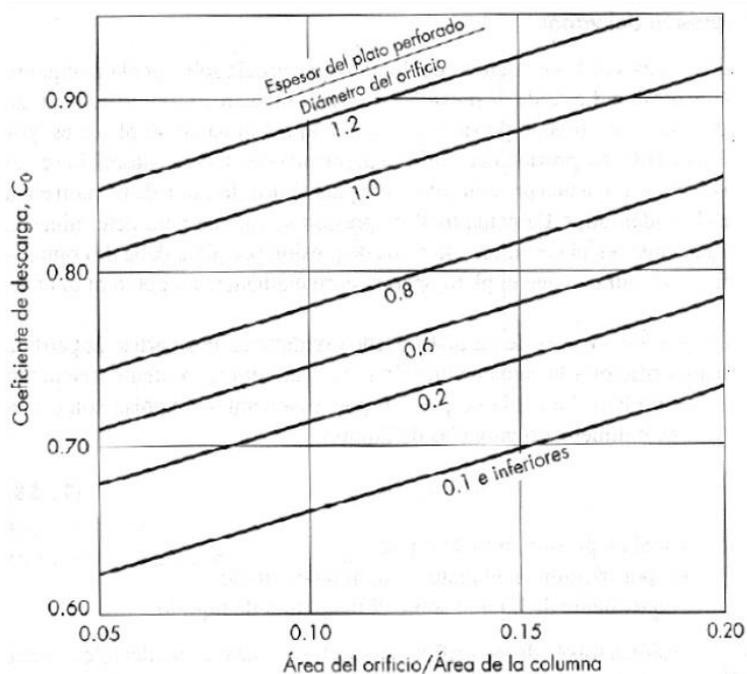


Figura A.3. Coeficientes de descarga para el flujo de vapor en platos perforados [13].

Se procede a la sustitución de datos en la ecuación [Ec.A.26]:

$$h_D = \frac{\left(0,48 \frac{m}{s}\right)^2}{0,71} \cdot \left(\frac{10,92 \frac{kg}{m^3}}{2 \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} 564,22 \frac{kg}{m^3}}\right) = 3 \cdot 10^{-4} m = 0,3 mm$$

h_L: Pérdida de carga ocasionada en el vapor al atravesar el líquido y la espuma (m).

Que puede determinarse mediante la ecuación [Ec.A.27] y [Ec.A.28], tomándose la cifra de mayor valor entre las calculadas.

$$h_L = \beta(h_W + h_C) \quad [Ec. A. 27]$$

Expresión que relaciona la altura del vertedero (h_W), la altura de la cresta de líquido (h_C) y el factor empírico de correlación β , que toma un valor dentro del intervalo 0,4 a 0,7.

Se elige el factor considerado usualmente para este tipo de diseño de columnas de destilación, igual a 0,6 y se sustituyen datos en la anterior ecuación:

$$h_L = 0,6 \cdot (0,061 m + 0,052 m) = 0,068 m$$

Otra ecuación que incluye el efecto de la espuma, relaciona tanto la altura del vertedero (h_W en m), como la velocidad que toma el vapor en el área activa (V_a igual a Q_V/A_a en $m \cdot s^{-1}$), la densidad del vapor (ρ_V en $kg \cdot m^{-3}$), el caudal volumétrico de líquido (Q_L en $m^3 \cdot s^{-1}$) y el ancho de flujo promedio (z igual a $(T+W)/2$ en m):

$$h_L = 6,1 \cdot 10^{-3} + 0,725 \cdot h_W - 0,238 \cdot h_W \cdot V_a \cdot \rho_V^{0,5} + 1,225 \frac{Q_L}{z} \quad [Ec. A. 28]$$

Para la que se reemplazan valores:

$$h_L = 6,1 \cdot 10^{-3} + 0,725 \cdot 0,061 m - 0,238 \cdot 0,061 m \cdot \left(\frac{2,12 \frac{m^3}{s}}{44,18 \frac{m^2}}\right) \cdot \left(10,92 \frac{kg}{m^3}\right)^{0,5} + 1,225 \frac{0,14 \frac{m^3}{s}}{\frac{9,35 + 6,54}{2} m} = 0,068 m$$

Se elige el mayor valor de los dos calculados, no obstante, al obtener el mismo valor: $h_L=0,068$ m ó 68 mm.

h_R : Pérdida de carga residual (m).

La expresión propuesta se obtiene a partir de un balance de la fuerza necesaria para vencer la tensión superficial, y viene dada por:

$$h_R = \frac{6 \cdot \sigma \cdot g_c}{\rho_L \cdot d_o \cdot g}$$

Dónde:

- σ : Tensión superficial ($N \cdot m^{-1}$). Igual a $7,42 \cdot 10^{-3} N \cdot m^{-1}$.
- ρ_L : Densidad del líquido ($kg \cdot m^{-3}$). Igual a $564,22 kg \cdot m^{-3}$.
- d_o : Diámetro de orificios (m). Igual a $9 \cdot 10^{-3} m$.
- g : Constante de gravedad ($m \cdot s^{-2}$). Igual a $9,81 m \cdot s^{-2}$.

Y sustituyendo los datos:

$$h_R = \frac{6 \cdot 7,42 \cdot 10^{-3} \frac{N}{m}}{564,22 \frac{kg}{m^3} \cdot 9 \cdot 10^{-3} m \cdot 9,81 \frac{m}{s^2}} = 0,001 m = 1 mm$$

Por tanto, h_{VAP} , definido por la ecuación [Ec.A.25] es:

$$h_{VAP} = 3 \cdot 10^{-4} m + 0,068 m + 0,001 m = 0,069 m = 69 mm$$

Y con ello obtenemos h_B con la expresión [Ec.A.23]:

$$h_B = 0,054 m + 0,069 m = 0,123 m = 123 mm$$

Finalmente al haber determinado los valores necesarios, se los reemplaza en la expresión [Ec.A.19]:

$$61 \text{ mm} + 52 \text{ mm} + 123 \text{ mm} \leq \frac{610 \text{ mm}}{2}$$

El término de la izquierda resulta igual a 235 mm siendo menor a la cifra obtenida al lado derecho de la expresión 305 mm, por lo que en la columna no se produce inundación.

Tabla A. 13. Alturas de líquido y pérdidas de carga en el plato.

Descripción				Valor (mm)
Altura de rebosadero (h_w)				61
Altura de la cresta de líquido (h_c)				51
Retroceso de nivel de líquido (h_B)	Pérdida de carga del líquido al acceder al plato (h_E)		54	123
	Pérdida de carga del vapor entre plato y plato (h_{VAP})	Caída de presión en plato seco (h_D)	0,3	
		Caída de presión generada al circular el vapor a través del líquido y la espuma (h_L)	68	
		Caída de presión residual (h_R)	1	
Total				235

A.3.6. Descarga

Se produce el problema de descarga en columna a partir de que la velocidad de líquido (V_L) a través del vertedero supere $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

$$V_L = \frac{Q_L}{A_V} < 0,3 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Si el valor del caudal volumétrico de líquido (Q_L) es $0,14 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ y el área del vertedero es $6,04 \text{ m}^2$, la velocidad V_L resultará como $0,023 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ que al no sobrepasar la velocidad mencionada, no se produce el fenómeno de descarga.

Por otro lado, la carga que soporta el vertedero no debe sobrepasar de $32\cdot 10^{-3} \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ de líquido por metro de vertedero [21].

$$\frac{Q_{L'}}{W} = \frac{0,14 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{6,54 \text{ m}} = 21,31 \cdot 10^{-3} \neq 32 \cdot 10^{-3}$$

Verificando el anterior requisito.

A.4 Diseño mecánico de la columna.

En el diseño mecánico de la unidad de destilación se incluyen las especificaciones tanto de material empleado, como de las dimensiones y tipo de fondos, el espesor de la envolvente y altura final de columna.

Inicialmente, se van a determinar las condiciones de diseño como la presión y la temperatura, así como algunos coeficientes necesarios para definir las tensiones y una altura estimada de columna para poder resolver el diseño mecánico.

A.4.1. Presión de diseño.

Van a evaluarse tres presiones distintas y elegirse la mayor para tener un margen de seguridad en el diseño de la columna. Conociendo la presión de operación más desfavorable en la columna, la correspondiente a la zona de agotamiento, de 2,61 atm ($2,70 \text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$) se tiene:

$$P_{d,1} = 1,1 \cdot P = 1,1 \cdot 2,70 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} = 2,97 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$P_{d,2} = P + 2 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} = 2,70 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} + 2 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} = 4,70 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$P_{d,3} = 3,5 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

Dónde:

- $P_{d,1}$: Presión máxima de operación con un aumento del 10% ($\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$).
- $P_{d,2}$: Presión máxima de diseño con un incremento de $2 \text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$.
- $P_{d,3}$: Presión establecida como referencia por el código $3,5 \text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$.

Entonces, como presión de diseño se fija $4,70 \text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$ ($4,55 \text{ atm}$ ó $66,83 \text{ psi}$).

A.4.2. Temperatura de diseño.

En cuanto a la temperatura, deben añadirse 20°C a la temperatura máxima de operación, ésta se corresponde con la alcanzada en fondo de

columna y tiene un valor de 253,21 °C. Entonces resulta que la temperatura de diseño es 273,21 °C (523,78 °F).

A.4.3. Altura estimada de torre.

La determinación de la altura de la columna aproximada (H_0) considera tanto la altura del cilindro principal ($H_{Cilindro}$), como una estimación de la altura de los fondos (H_{Fondos}).

$$H_0 = H_{Cilindro} + H_{Fondos}$$

Entendiendo como altura del cilindro principal a la adición de la distancia requerida por los 30 platos (H_{Platos}) y su espesor ($H_{Espesor}$):

$$H_{Cilindro} = H_{Platos} + H_{Espesor}$$

$$H_{Cilindro} = (NPR \cdot t) + (NPR \cdot e)$$

Así mismo, se tiene en cuenta que la altura de cada fondo es igual a la distancia necesaria para un contacto ideal entre corrientes, es decir, igual al espaciamiento entre platos. Para ambos fondos:

$$H_{Fondos} = 2 \cdot t$$

Siendo el número de platos $NPR=30$, el espaciamiento entre éstos $t=0,61$ m y el espesor de plato igual a $e=0,005$ m.

$$H_{Cilindro} = (30 \cdot 0,61m + 30 \cdot 0,005m) = 18,42 m$$

$$H_{Fondos} = (2 \cdot 0,61m) = 1,22 m$$

Resulta como altura de columna aproximada:

$$H_0 = 18,42 m + 1,22m = 19,64 m$$

- **Soporte de la torre**

Existen varios tipos de soportes para recipientes a presión como las patas, silletas, consolas o faldones. Sin embargo, los faldones son aconsejados cuando se da alguna de las condiciones siguientes:

- a) El diámetro de la envolvente es superior a 1,50 m.
- b) La relación altura/diámetro del recipiente es mayor que 5.
- c) Pueden esperarse vibraciones.
- d) El peso del recipiente lleno de agua es superior a 15.000 kg.

Conociendo el valor de la altura (H_0) y del diámetro (T):

$$\frac{H_0}{T} = \frac{19,64 \text{ m}}{9,35 \text{ m}} = 2,10$$

Al cumplirse inicialmente las dos primeras condiciones, el uso del faldón queda justificado. Éste irá soldado al fondo inferior, de forma que los diámetros medios del faldón y de la envolvente coincidan, es decir, el $D_{\text{Faldón}}$ es igual a 9,35 m.

Se recomienda una altura de faldón 1,5 veces mayor que su diámetro [34], por tanto:

$$H_{\text{Faldón}} = 1,5 \cdot D_{\text{Faldón}} = 1,5 \cdot 9,35 \text{ m} = 14,02 \text{ m}$$

Para diámetros de faldón igual o menor a 2,50 m se utiliza una abertura, consecuentemente al sobrepasar la columna dicha condición, ésta utilizará dos aberturas de acceso, cada una con 0,51 m (20 in) de diámetro.

En la altura estimada de torre (H_1) se incluye la altura de columna aproximada (H_0) y el soporte requerido por ésta ($H_{\text{Faldón}}$).

$$H_1 = H_0 + H_{\text{Faldón}}$$

$$H_1 = 19,64 \text{ m} + 14,02 \text{ m} = 33,66 \text{ m}$$

A.4.4. Factor de corrosión.

Este factor es determinante en el diseño de la unidad de rectificación ya que afecta la integridad del material y reduce la vida útil de la columna.

En este procedimiento se ha considerado al ácido fluorhídrico como el único componente corrosivo posible, sabiendo que es el ácido más potente a menores concentraciones. Sin embargo, al encontrarse con una concentración del 0,01% en peso en la corriente de alimentación, la posibilidad de dañar los materiales es despreciable.

Para la determinación del factor de corrosión se deben considerar dos aspectos:

Por un lado, se toma en cuenta que la velocidad de corrosión tomará un valor de $5,00 \cdot 10^{-3}$ pulgadas por año.

Por otro lado, el tiempo de vida para equipos principales se considera entre 15 y 20 años y el tiempo de vida para equipos secundarios entre 8 y 10 años [35].

La columna estudiada se trata de un recipiente principal a presión para el que se estima un tiempo de vida de 20 años, de manera que el factor de corrosión o espesor debido a corrosión es:

$$C = 5,00 \cdot 10^{-3} \frac{in}{año} \cdot 20 \text{ años} = 0,10 \text{ in} = 3 \text{ mm}$$

A.4.5. Material empleado.

El material empleado más adecuado para la envolvente de la columna y para los platos perforados, es el acero al carbono SA-285 C, por las condiciones de operación y el carácter no corrosivo de los fluidos que circulan durante el proceso para el recipiente. Dichos requisitos pueden verificarse en este mismo documento Anexo F: Tabla F.1a, Tabla F.1b y Tabla F.2.

A.4.6. Fondos.

La elección de los fondos sigue las normas establecidas por el Código ASME. Dichos fondos, denominados así tanto para cabeza como para fondo de columna, pueden ser a su vez de dos tipos: Klopper o Korbogen. Sin embargo, se emplean los de tipo Korbogen cuando se cumple una de las siguientes condiciones:

1º Condición: Presión de diseño igual o superior a 6,77 atm ($7 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$).

2º Condición: Temperatura de diseño superior a 350°C.

3º Fondos inferiores de recipientes verticales cuya relación altura-diámetro sea superior a 10.

A.4.6.1. Fondo superior.

La temperatura de diseño, calculada anteriormente, es 273,21°C y la presión de diseño 4,70 kg·cm⁻², por tanto, no se cumplen los primeros dos requisitos. Para verificar la 3º condición se recurre a la relación entre la altura de columna aproximada (H_0) y el diámetro de la misma (T o De), calculada en el apartado A.4.3, igual a 2,10, menor a 10.

Por lo cual, se procede al dimensionamiento del fondo tipo Klopper:

$$R_f = T \quad [Ec. A. 29]$$

$$r = \frac{T}{10} \quad [Ec. A. 30]$$

$$H = 0,2 \cdot T \quad [Ec. A. 31]$$

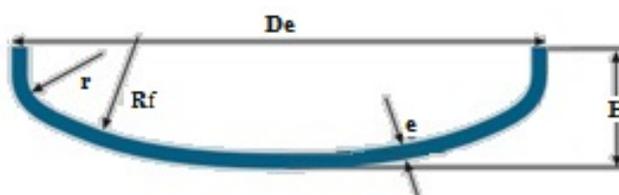
Conociendo el valor del diámetro de la columna, T igual a 9,35 m, se obtiene:

$$R_f = 9,35 \text{ m}$$

$$r = \frac{9,35 \text{ m}}{10} = 0,93 \text{ m}$$

$$H_{\text{Fondo-superior}} = 0,2 \cdot 9,35 \text{ m} = 1,87 \text{ m}$$

Siguiendo la siguiente figura:



A.4.6.2. Fondo inferior

Las condiciones de diseño descartan los dos primeros requisitos, como se demuestra en el cálculo del fondo superior. Para poder descartar la 3º Condición de tipo de fondo, se calcula la relación altura-diámetro de columna obtenida

hasta este apartado corrigiendo el valor de los fondos con: dos fondos iguales, de las dimensiones que el fondo superior.

$$\frac{\text{Altura}}{\text{Diámetro}} = \frac{H_{\text{cilindro}} + 2 \cdot H_{\text{Fondo-superior}}}{T} = \frac{18,42 \text{ m} + 2 \cdot 1,87 \text{ m}}{9,35 \text{ m}} = 2,37$$

Como consecuencia, el fondo inferior es de tipo Klopper al no cumplir tampoco con la 3ª Condición de relación altura-diámetro de columna, de modo que sus dimensiones son las mismas que para el fondo superior: $H_f=1,87 \text{ m}$.

A.4.6.3. Espesor y altura de fondos.

Las cifras calculadas permiten la determinación del espesor requerido por los fondos mediante la expresión [Ec.A.32], la cual es válida para una relación $R_f/r=(9,35\text{m}/0,93\text{m})=10$ menor a $16 \frac{2}{3}$:

$$t_{\text{Fondo}} = \frac{P_d \cdot R_f \cdot M}{2 \cdot S \cdot E - 0,2 \cdot P_d} \quad [\text{Ec. A. 32}]$$

Dónde:

- P_d : Presión de diseño (psi). Definida en A.4.1 como 66,83 psi (4,55 atm).
- R_f : Radio interno del fondo (in). Igual a 368 in (9,35 m).
- M : Factor que depende de la relación R_f/r .

Se calcula mediante la expresión siguiente:

$$M = \frac{1}{4} \cdot \left(3 + \sqrt{\frac{R_f}{r}} \right) \quad [\text{Ec. A. 33}]$$

$$M = \frac{1}{4} \cdot \left(3 + \sqrt{\frac{9,35 \text{ m}}{0,93 \text{ m}}} \right) = 1,54$$

- S : Tensión máxima permisible (psi). Atendiendo a una temperatura de diseño igual a 273,21 °C (523,78 F) y material de la columna acero al carbono SA-285 C, se define como máxima tensión permisible 15.867 psi o 1.080 atm (Véase Anexo F: Tabla F.3a y Tabla F.3b.)
- E : Coeficiente de soldadura. Toma un valor de 0,85 (conforme al apartado UW-12) para una soldadura de doble cordón de uniones a tope y examinada por puntos o zonas (Véase Anexo F: Tabla F.4).

Sustituyendo datos se tiene:

$$t_{Fondo} = \frac{66,83 \text{ psi} \cdot 368 \text{ in} \cdot 1,54}{2 \cdot 15.867 \text{ psi} \cdot 0,85 - 0,2 \cdot 66,83 \text{ psi}} = 1,41 \text{ in} = 35,69 \text{ mm}$$

A este espesor se debe añadir el debido a la corrosión, resultando un valor final de 1,51 in (38 mm).

El espesor comercial más próximo es de 1,63 in o 41 mm.

A.4.6.4. Altura provisional de la columna.

En la determinación de la altura de la columna ($H_{Columna}$), van a tomarse en cuenta los fondos ($2 \cdot H_F$) y espesor ($2 \cdot t_{Fondo}$) calculados, así como la altura del cilindro principal ($H_{Cilindro}$):

$$H_{Columna} = H_{Cilindro} + 2 \cdot H_F + 2 \cdot t_{Fondo}$$

$$H_{Columna} = 18,42 \text{ m} + 2 \cdot 1,87 \text{ m} + 2 \cdot 41 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 22,24 \text{ m} = 72,98 \text{ ft}$$

A.4.7. Cálculo del espesor de la envolvente.

Este tipo de recipientes se ven sometidos a tensiones como las de tracción por presión interna, tracción y compresión debidas al viento y a seísmos, o compresión debido al peso de la misma columna. Por consiguiente, el espesor debe calcularse tomando en cuenta todas estas situaciones descritas.

No obstante, en el área geográfica de localización de la columna, la tensión que corresponde a seísmos se considera despreciable frente a la tensión originada por la presión interna, adicionalmente, conforme a la norma consultada no deben considerarse simultáneamente viento y seísmo. En cuanto a la tensión debida al peso de la columna, ésta va a considerarse insignificante en relación con las tensiones restantes.

Por ende, únicamente se van a realizar los cálculos correspondientes a la presión interna y al viento, acorde con el código ASME VII División 1 apartados UG y UW para equipos a presión.

A.4.7.1. Espesor debido a la presión interna

La tensión debida a la presión interna puede ser de dos tipos:

Tensión circunferencial

$$t_{circ} = \frac{P_d \cdot R}{S \cdot E - 0,6 \cdot P_d} \quad [Ec. A. 34]$$

Tensión longitudinal

$$t_{long} = \frac{P_d \cdot R}{2 \cdot S \cdot E + 0,4 \cdot P_d} \quad [Ec. A. 35]$$

Siendo:

- t_{circ} : espesor debido a tensión circunferencial en uniones longitudinales (in).
- t_{long} : espesor debido a tensión longitudinal en uniones circunferenciales (in).
- P_d : Presión de diseño (psi). Igual a 66,83 psi.
- R : Radio de la columna (in). Sabiendo que el diámetro de columna es 9,35 m (368 in), y que de forma geométrica el radio representa la mitad del diámetro, se tiene que R es 4,67 m (184 in).
- S : Tensión máxima permisible, con valor de 15.867 psi correspondiente con la temperatura de diseño.
- E : Coeficiente de soldadura. Toma un valor de 0,85.

Quedando como espesor debido a tensión circunferencial según la expresión [Ec.A.34]:

$$t_{circ} = \frac{66,83 \text{ psi} \cdot 184 \text{ in}}{15.867 \text{ psi} \cdot 0,85 - 0,6 \cdot 66,83 \text{ psi}} = 0,914 \text{ in}$$

Asi mismo, el espesor debido a tensión longitudinal según la expresión [Ec.A.35] es:

$$t_{long} = \frac{66,83 \text{ psi} \cdot 184 \text{ in}}{2 \cdot 15.867 \text{ psi} \cdot 0,85 + 0,4 \cdot 66,83 \text{ psi}} = 0,455 \text{ in}$$

El espesor máximo requerido, debido a la presión interna, será la suma del mayor espesor calculado con el factor de corrosión. Se tiene por tanto:

$$t_{PI} = 0,914 \text{ in} + 0,100 \text{ in} = 1,014 \text{ in} = 25,77 \text{ mm}$$

A.4.7.2. Espesor debido a la carga del viento.

El viento de la zona de Puente Mayorga, San Roque (Cádiz), tiene una velocidad media de $50 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, sin embargo, las ráfagas de viento pueden alcanzar hasta los $166 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ (103,15 mph) [36]. El espesor de la envolvente se determina mediante la siguiente ecuación:

$$t_{\text{viento}} = \frac{12 \cdot M_{\text{exp}}}{ra^2 \cdot \pi \cdot S \cdot E} \quad [\text{Ec. A. 36}]$$

Siendo:

- t_{viento} : Espesor debido al viento (in).
- M_{exp} : Momento de la altura de columna expuesta al viento (lb·ft).
- ra : Radio de columna incluyendo el aislante (in). Definido como la mitad del diámetro D_o , incluyendo el aislante.
- S : Tensión máxima permisible (psi). Toma un valor igual a 15.867 psi.
- E : Coeficiente de soldadura. Toma un valor de 0,85.

Cálculo de M_{exp}

Para la determinación del momento de la altura de columna expuesta el viento se va a emplear la ecuación siguiente:

$$M_{\text{exp}} = M - h_{\text{exp}}(V - 0,5 \cdot P_W \cdot D_o \cdot h_{\text{exp}}) \quad [\text{Ec. A. 37}]$$

Siendo:

- M : Momento máximo (lb·ft)
- V : Esfuerzo cortante (lb).
- h_{exp} : altura de columna estudiada expuesta a la tensión de viento (ft). Distancia desde la base hasta la unión del fondo de columna con la torre, altura del faldón, igual a 46 ft (14,02 m).
- P_W : Presión de diseño del viento ($\text{lb}\cdot\text{ft}^{-2}$).
- D_o : Diámetro de columna incluyendo aislante (ft).

Teniendo en cuenta que el espesor del aislante toma un valor de 80 mm (0,26 ft) y una densidad de $100 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, determinado mediante el programa de cálculo de aislantes térmicos Insulan de la compañía CALORCOL S.A. [25] para una velocidad del aire en el ambiente de $50 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ con una temperatura media de 25°C .

$$D_o = 30,67 \text{ ft} + 2 \cdot 0,26 \text{ ft} = 31,19 \text{ ft} = 9,51 \text{ m} = 374,30 \text{ in}$$

Cálculo de M

El momento máximo se define mediante:

$$M = V \cdot h_1 \quad [\text{Ec. A. 38}]$$

- V: Esfuerzo cortante (lb).
- h_1 : Definida como la mitad de la altura de columna incluyendo el faldón (ft). Mitad de H' .

Cálculo de V

El Esfuerzo cortante se determina según la ecuación siguiente:

$$V = P_w \cdot D_o \cdot H' \quad [\text{Ec. A. 39}]$$

- D_o : Diámetro de columna incluyendo aislante (ft).
- H' : Altura de columna (ft).
Altura de la columna incluyendo el faldón, pero excluyendo el fondo superior, tomando un valor de 112,83 ft (34,39 m).
- P_w : Presión de diseño del viento ($\text{lb} \cdot \text{ft}^{-2}$) regida por:

$$P_w = C_e \cdot C_q \cdot q_s \quad [\text{Ec. A. 40}]$$

Dónde:

- C_e : Factor de respuesta de ráfaga de viento.
Con un valor de 1,66 correspondiente a una torre de 112,83 ft (34,39 m) de altura y tipo de exposición C (lugar donde se sitúa la torre): terrenos abiertos con obstrucciones dispersas, según la siguiente tabla:

Tabla A. 14. Coeficiente C_e . Cálculo de carga de viento [35].

Altura sobre el suelo (ft)	Exposición B ¹⁹	Exposición C	Exposición D ²⁰
0-15	0,6	1,1	1,4
20	0,7	1,2	1,5
40	0,8	1,3	1,6
60	0,9	1,4	1,7
80	1,0	1,5	1,8
100	1,1	1,6	1,9
140	1,2	1,7	2,0
200	1,4	1,9	2,1

- C_q : Factor de forma.
Con un valor de 0,85 para torres con equipos conectados [35].
- q_s : Presión de estancamiento debido a la velocidad del viento.
Una velocidad de viento de 103,15 mph (166 km·h⁻¹) se corresponde con un valor de 27,57 lb·ft⁻² según la tabla siguiente:

Tabla A.15. Presión de estancamiento [35].

Veloc. Viento (mph)	70	80	90	100	110	120	130
q_s	13	17	21	26	31	37	44

Reemplazando datos en [Ec.A.40]:

$$P_w = 1,66 \cdot 0,85 \cdot 27,57 \frac{lb}{ft} = 39,00 \frac{lb}{ft^2}$$

Mediante la ecuación [Ec.A.39] se tiene:

$$V = 39,00 \frac{lb}{ft^2} \cdot 31,19 ft \cdot 112,83 ft = 137.263,66 lb$$

¹⁹ Exposición B: Áreas urbanas, suburbanas.

²⁰ Exposición D: Áreas planas, sin obstrucciones.

Con lo que el momento máximo [Ec.A.38] es:

$$M = 137.263,66 \text{ lb} \cdot \left(\frac{118,96}{2}\right) \text{ ft} = 8.164.474,19 \text{ lb} \cdot \text{ft}$$

Sustituyendo datos en la ecuación [Ec.A.37] para el cálculo del momento:

$$M_{exp} = 8.164.474,19 \text{ lb} \cdot \text{ft} - 46 \text{ ft} \cdot \left(137.263,66 \text{ lb} - 0,5 \cdot 39,00 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^2} \cdot 31,19 \text{ ft} \cdot 46 \text{ ft}\right)$$

$$M_{exp} = 3.137.491,39 \text{ lb} \cdot \text{ft}$$

Concluyendo que el espesor debido al viento es:

$$t_{viento} = \frac{12 \cdot 3.137.491,39 \text{ lb} \cdot \text{ft}}{\left(\frac{374,30}{2} \text{ in}\right)^2 \cdot \pi \cdot 15.867 \text{ psi} \cdot 0,85} = 0,025 \text{ in} = 0,64 \text{ mm}$$

A.4.7.3. Cálculo del espesor final de columna.

La unidad diseñada debe presentar un espesor uniforme en todo el recipiente. Éste espesor se determina mediante la comparación del valor máximo obtenido del cálculo de las tensiones y por otra parte, del cálculo que a continuación se detalla.

Se deben tomar en cuenta 4 factores:

- Espesor mínimo exigido por el código ASME (t_{ASME})
- Espesor exigido por el material ($t_{Material}$)
- Espesor requerido debido a las tensiones a las que la columna se somete ($t_{Tensiones}$).
- Espesor obtenido en fondos (t_{Fondos}).

Determinados a continuación:

$$t_{ASME} \text{ (mm)} = 2,5 \text{ mm} + C = 2,5 \text{ mm} + 2,540 \text{ mm} = 5,040 \text{ mm} = 0,198 \text{ in}$$

$$t_{Material} \text{ (mm)} = 5 \text{ mm} + C = 5 \text{ mm} + 2,540 \text{ mm} = 7,540 \text{ mm} = 0,297 \text{ in}$$

El espesor debido a las tensiones será el resultado de la suma del factor de corrosión y el mayor obtenido de la comparación de dos valores:

El primero, se trata del espesor debido a la presión interna de tensión circunferencial:

$$t_{circ} = 0,914 \text{ in}$$

El segundo, es el resultado de la suma del espesor debido a la presión interna de tensión longitudinal con el espesor debido al viento:

$$t_{long} + t_{viento} = 0,455 \text{ in} + 0,025 \text{ in} = 0,481 \text{ in}$$

Por tanto, por una parte se tiene que el espesor requerido por las tensiones producidas en la columna es:

$$t_{Tensiones} = t_{Mayor} + C = 0,914 \text{ in} + 0,100 \text{ in} = 1,014 \text{ in}$$

Por otra parte, el espesor demandado por los fondos es $t_{Fondos} = 1,50$ in que incluye el factor de corrosión.

Concluyendo que el espesor mínimo requerido por la columna es 1,50 in (38 mm), por ser el mayor obtenido, siendo el espesor comercial disponible inmediatamente superior al determinado 1,63 in (41 mm).

A.4.8. Cálculo de la altura de faldilla.

La faldilla se define como el elemento de conexión entre los fondos y el cilindro que compone la columna, el cual se considera como el punto más débil del recipiente puesto que está sometido a grandes tensiones.

Su acoplamiento en la estructura evita que la soldadura se realice por línea de transición de la zona bombeada de los fondos a la carcasa.

Su altura toma el mayor valor de los calculados a continuación:

$$H_{Faldilla} \geq 0,3 \cdot \sqrt{D_0 \cdot t_{Fondo}}$$

$$H_{Faldilla} \geq 3 \cdot t_{Fondo}$$

$$H_{Faldilla} \geq 25 \text{ mm}$$

Siendo:

- Do: Diámetro de columna incluyendo aislante (mm). Igual a 9,51 m ($9,51 \cdot 10^3$ mm)
- t_{Fondo} : Espesor de fondos mínimo (mm). Igual a 38 mm.

Se procede a sustituir valores:

$$H_{\text{Faldilla}} \geq 0,3 \cdot \sqrt{9,51 \cdot 10^3 \text{ mm} \cdot 38 \text{ mm}} = 180 \text{ mm}$$

$$H_{\text{Faldilla}} \geq 3 \cdot 38 \text{ mm} = 115 \text{ mm}$$

$$H_{\text{Faldilla}} \geq 25 \text{ mm}$$

Concluyendo que la altura cada faldilla, tanto para la parte superior como para la inferior de columna, es de $H_{\text{Faldilla}}=180$ mm.

A.4.9. Altura de la columna y la unidad.

En la determinación de la altura real de la columna (H) va a tenerse en cuenta los valores del cilindro principal, de los dos fondos con su espesor y de las dos faldillas de la siguiente manera:

$$H = H_{\text{Cilindro}} + H_{\text{Fondo-superior}} + H_{\text{Fondo-inferior}} + H_{\text{Faldilla-superior}} + H_{\text{Faldilla-inferior}}$$

$$H = 18,42 \text{ m} + (1,87 + 0,041) \text{ m} + (1,87 + 0,041) \text{ m} + 0,18 \text{ m} + 0,18 \text{ m} = 22,60 \text{ m}$$

Y finalmente la altura de la unidad (H_U), es decir, la columna incluyendo el faldón es:

$$H_U = H + H_{\text{Faldón}}$$

$$H_U = 22,60 \text{ m} + 14,02 \text{ m} = 34,71 \text{ m} = 113,89 \text{ ft} = 1366,71 \text{ in}$$

ANEXO B: Diseño de los equipos de transmisión de calor.

B.1. Introducción.

El correcto funcionamiento de la columna requiere de equipos que bien cedan calor a la corriente, como el calderín, o bien que lo retiren, como es el caso del condensador. A continuación se realiza el diseño de estos equipos.

B.2. Diseño del condensador.

B.2.1. Introducción.

Este equipo de transmisión de calor, consigue retirar el calor necesario para disminuir la temperatura del vapor recibido de cabeza de columna, hasta una temperatura tal, que todo el vapor condense a líquido, pues se trata de un condensador total.

La corriente resultante en forma de líquido, va a separarse en dos corrientes distintas. La primera corriente vuelve a introducirse a la columna en forma de reflujo, y la segunda corriente va a formar el producto destilado con un 99,06 % en peso de benceno en su composición.

B.2.2. Caracterización de las corrientes.

En la siguiente tabla, se mencionan las características de las corrientes de entrada y salida del condensador total. Tanto el vapor de admisión, como el reflujo y el destilado o corrientes de salida, han sido denominados y calculados los caudales molares en apartados anteriores como V, L y D respectivamente.

Tabla B.1. Características de las corrientes del condensador.

Propiedad	Vapor (V)	Reflujo (L)	Destilado (D)
Temperatura (°C)	113,51	106,03	106,03
Densidad (kg·m ⁻³)*	6,36	779,55	779,55
Viscosidad (kg·m ⁻¹ ·s ⁻¹)*	0,94·10 ⁻⁵	23,91·10 ⁻⁵	23,91·10 ⁻⁵
Conductividad térmica (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)*	0,017	0,110	0,110
Peso molecular (kg·mol ⁻¹)	78,22	78,22	78,22
Caudal molar (kmol·h ⁻¹)	519	341	179
Caudal másico (kg·h ⁻¹)	40.632	26.642	13.989
Caudal volumétrico (m ³ ·h ⁻¹)	6.386	34	18
Entalpía (kJ·kmol ⁻¹)*	88.204,20	58.199,96	58.199,96
Entalpía (kJ·kg ⁻¹)	1.127,57	744,01	744,01

(*) Propiedades obtenidas mediante el simulador Aspen HYSYS.

Se considera que si la presión del producto líquido es de 2,09 atm y la caída de presión supuesta es de 0,34 atm, como se menciona en los requisitos de diseño, entonces el vapor porta una presión de 2,43 atm.

Así mismo, se definen las características del fluido de servicio, el aire ambiente:

Tabla B.2. Propiedades fluido de servicio del condensador.

Propiedad	Valor
Temperatura entrada (°C)	27
Temperatura salida (°C)	51,90
Temperatura media (°C)	39,45
Presión (atm)	1
Densidad media (kg·m ⁻³)	1,13
Viscosidad media (kg·m ⁻¹ ·s ⁻¹)	1,92·10 ⁻⁵
Calor específico (kJ·kg ⁻¹ ·°C ⁻¹)	1,01
Conductividad térmica (W·m ⁻¹ ·°C ⁻¹)	0,027

B.2.3. Requisitos de diseño.

Requisitos

- El producto condensado debe presentar una elevada pureza de benceno para su utilización como reactivo en el proceso de producción de LAB.
- El área de intercambio de energía debe tener un tamaño considerable ya que presenta una elevada temperatura y gran caudal.
- El fluido de servicio debe ser eficaz, pero a su vez económico y respetuoso con el medio ambiente.

Consideraciones

- La pérdida de carga del fluido en el condensador tiene un valor máximo de 5 psi (0,34 atm) [19].

B.2.4. Selección del tipo de intercambiador.

La corriente saliente de cabeza de columna en forma de vapor produce un salto térmico de 7,48°C para su condensación, es por esta razón que el intercambiador seleccionado es un aerorrefrigerador de tiro forzado que puede proporcionar un salto térmico de 10°C a 15°C.

Este equipo está formado por ventiladores encargados de impulsar el aire ambiente externo y de tubos provistos de aletas que aumentan la superficie de transmisión de calor compensando la baja eficacia que presenta el aire respecto a otros refrigerantes.

Puesto que la temperatura inicial del vapor admitido es de 113,51°C y la final debe ser 106,03°C, el cambio de vapor a líquido solamente va a requerir de una sola unidad de este tipo de intercambiador.

B.2.5. Selección de la trayectoria de flujo.

La trayectoria de flujo para los fluidos implicados se elige dependiendo de varios criterios definidos por las propiedades tanto físicas como químicas, y condiciones en las que se encuentren.

Teniendo en cuenta lo anterior, el vapor de elevada presión y temperatura, proveniente de cabeza de columna, va a circular por el interior de los tubos aleteados de manera que el refrigerante tenga contacto con tubos y aletas por la parte externa y se realice el intercambio de calor entre corrientes.

B.2.6. Características del intercambiador.

El intercambiador es de tipo 1-2 de carcasa y tubos, ofreciendo un paso del aire por el aparato y dos pasos del fluido por los tubos.

Presenta una disposición triangular de tubos con un pitch (p') de 2 ½ in o 64 mm, un diámetro externo (D_o) de 1 in ó 25 mm, un diámetro interno (D_i) de 0,782 in ó 20 mm y una longitud (L) de 336 in ó 8,53 m.

El material de los cabezales es acero al carbono SA-285 C, el de los tubos acero al carbono SA-106 B y el de las aletas aluminio.

Todas estas características de los materiales son fundamentadas y justificadas en la memoria descriptiva, y las dimensiones en los siguientes apartados.

B.2.7. Cálculo del calor intercambiado.

El calor intercambiado en el condensador es determinado mediante un balance energético, el cual se reduce a un balance de entalpía puesto que no se realiza trabajo externo, no se transfiere calor al sistema si el intercambiador está bien aislado, y los cambios en la energía cinética y en la energía potencial suelen ser insignificantes.

Resulta entonces, que si el calor que entra al sistemas es igual al que sale, el calor producido por la corriente de vapor (Q_V), será igual a la suma del calor que de las corrientes de salida liquidas de reflujo (Q_L) y de producto destilado (Q_D) y el calor que es necesario retirar ($Q_{Retirar}$).

$$Q_V = Q_L + Q_D + Q_{Retirar}$$

Definiendo el calor, en la siguiente expresión, como la relación entre el caudal másico (\dot{m}) de cada corriente y su entalpía (H), cuyos valores se muestran en la Tabla B.1.

$$\dot{m}_V \cdot H_V = \dot{m}_L \cdot H_L + \dot{m}_D \cdot H_D + Q_{Retirar}$$

Sustituyendo los datos requeridos y despejando el calor que es necesario retirar, se tiene:

$$Q_{Retirar} = \dot{m}_V \cdot H_V - \dot{m}_L \cdot H_L - \dot{m}_D \cdot H_D$$

Dónde:

- \dot{m}_V : Caudal másico del vapor ($\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$). Igual a $40.632\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$.
- \dot{m}_V : Caudal másico del líquido, reflujo ($\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$). Igual a $26.642 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$.

- \dot{m}_V : Caudal másico del producto líquido, destilado ($\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$). Igual a $13.989 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$.
- H_V : Entalpía del vapor ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$). Igual a $1.127,57 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$.
- H_L : Entalpía del reflujo ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$). Igual a $744,01 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$.
- H_D : Entalpía del destilado ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$). Igual a $744,01 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$.

Reemplazando datos se tiene:

$$Q_{Retirar} = 40.632 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot 1.127,57 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 26.642 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot 744,01 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 13.989 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot 744,01 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$Q_{Retirar} = 1,56 \cdot 10^7 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}$$

Sabiendo que el calor que es necesario retirar se define como la relación entre el caudal másico de aire necesario y la variación de entalpía que se produce si el aire en la zona en la que se encuentra la columna entra a una temperatura media ($T_{E, \text{Aire}}$) de 25°C , no obstante para el diseño se consideran dos grados más según la bibliografía resultando 27°C , y sale a una temperatura ($T_{S, \text{Aire}}$) obtenida mediante el simulador de $51,90^\circ\text{C}$ (Tabla.B.2) y cuyas propiedades se han calculado según datos que se indican en la siguiente tabla:

Propiedades del aire seco a presión atmosférica [37].

T (°C)	ρ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	C_p ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	μ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)	k ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
25	1,18	1,01	$1,85\cdot 10^{-5}$	0,026
30	1,16	1,01	$1,87\cdot 10^{-5}$	0,026
35	1,15	1,01	$1,90\cdot 10^{-5}$	0,026
40	1,12	1,01	$1,92\cdot 10^{-5}$	0,027
45	1,11	1,01	$1,94\cdot 10^{-5}$	0,027
50	1,09	1,01	$1,96\cdot 10^{-5}$	0,027
55	1,08	1,01	$1,99\cdot 10^{-5}$	0,028
60	1,06	1,01	$2,01\cdot 10^{-5}$	0,028
65	1,04	1,01	$2,03\cdot 10^{-5}$	0,028
70	1,03	1,01	$2,05\cdot 10^{-5}$	0,029
75	1,01	1,01	$2,07\cdot 10^{-5}$	0,029
80	1,00	1,01	$2,10\cdot 10^{-5}$	0,030

$$Q_{Retirar} = \dot{m}_{Aire} \cdot \Delta H_{Aire}$$

En la que se introduce la fórmula de la entalpía:

$$Q_{Retirar} = \dot{m}_{Aire} \cdot C_{p,Aire} \cdot (T_{S,Aire} - T_{E,Aire})$$

Despejando el caudal másico:

$$\dot{m}_{Aire} = \frac{Q_{Retirar}}{C_{p,Aire} \cdot (T_{S,Aire} - T_{E,Aire})} \quad [Ecuación B. 2.1]$$

Dónde:

- \dot{m}_{Aire} : Caudal másico de aire ($\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$).
- $C_{p,Aire}$: Calor específico del aire a temperatura media ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$).
Con un valor de $1,01 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$.

Reemplazando valores en la ecuación [Ecuación B.2.1] se obtiene el caudal másico necesario para conseguir la condensación del vapor:

$$\dot{m}_{Aire} = \frac{1,56 \cdot 10^7 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}}{1,01 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot (51,90^\circ\text{C} - 27^\circ\text{C})} = 621.547,49 \frac{\text{kg}}{\text{h}} = 172,65 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

B.2.8. Cálculo del área del intercambiador.

El área necesaria del intercambiador se determina mediante la siguiente ecuación, análoga a la Ley de enfriamiento de Newton:

$$Q = U \cdot A_S \cdot \Delta T_m \quad [Ec. B. 2.2]$$

Dónde:

- Q : Calor intercambiado entre fluidos ($\text{J} \cdot \text{s}^{-1}$).
- U : Coeficiente global de transferencia de materia ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$).
- A_S : Área de transferencia de calor (m^2).
- ΔT_m : Incremento de temperatura media entre los dos fluidos ($^\circ\text{C}$).

B.2.8.1. Diferencia de Temperatura media

El tipo de intercambiador de calor presenta tanto un flujo en cruzado como en paralelo de las corrientes, por tanto la diferencia de temperatura media (ΔT_m) se trata de la corrección de la diferencia de temperatura media logarítmica (ΔT_{mL}) mediante el factor F_G . Este factor, depende de la configuración geométrica del intercambiador y de las temperaturas de entrada y de salida de las corrientes implicadas, realizando las suposiciones de que el coeficiente global de transmisión de calor es constante y de que todos los elementos de una determinada corriente de fluido tienen la misma historia térmica al pasar a través del intercambiador.

$$\Delta T_m = \Delta T_{mL} \cdot F_G \quad [Ec. B. 2.3]$$

La diferencia de temperaturas media logarítmica (ΔT_{mL}) se calcula mediante:

$$\Delta T_{mL} = \frac{(T_C - T_F) - (T_{C0} - T_{F0})}{\ln\left(\frac{T_C - T_F}{T_{C0} - T_{F0}}\right)} \quad [Ec. B. 2.4]$$

Siendo:

- T_C : Temperatura final del fluido caliente (°C).
- T_{C0} : Temperatura inicial del fluido caliente (°C).
- T_F : Temperatura final del fluido frío (°C).
- T_{F0} : Temperatura inicial del fluido frío (°C).

Teniendo en cuenta que el fluido frío en el condensador se trata del aire que entra a una temperatura (T_{F0}) de 27°C y alcanza una temperatura (T_F) de 51,90°C y que el vapor saliente de cabeza de columna será el fluido caliente con una temperatura inicial (T_{C0}) de 113,51°C y una temperatura de salida (T_C) de 106,03°C.

Sustituyendo valores en la anterior ecuación se tiene:

$$\Delta T_{mL} = \frac{(106,03 \text{ } ^\circ\text{C} - 51,90 \text{ } ^\circ\text{C}) - (113,51 \text{ } ^\circ\text{C} - 27 \text{ } ^\circ\text{C})}{\ln\left(\frac{106,03 \text{ } ^\circ\text{C} - 51,90 \text{ } ^\circ\text{C}}{113,51 \text{ } ^\circ\text{C} - 27 \text{ } ^\circ\text{C}}\right)} = 69,06 \text{ } ^\circ\text{C}$$

El cálculo del factor F_G se realiza a partir de la determinación de Z y η_H según la gráfica para intercambiadores de tipo 1-2:

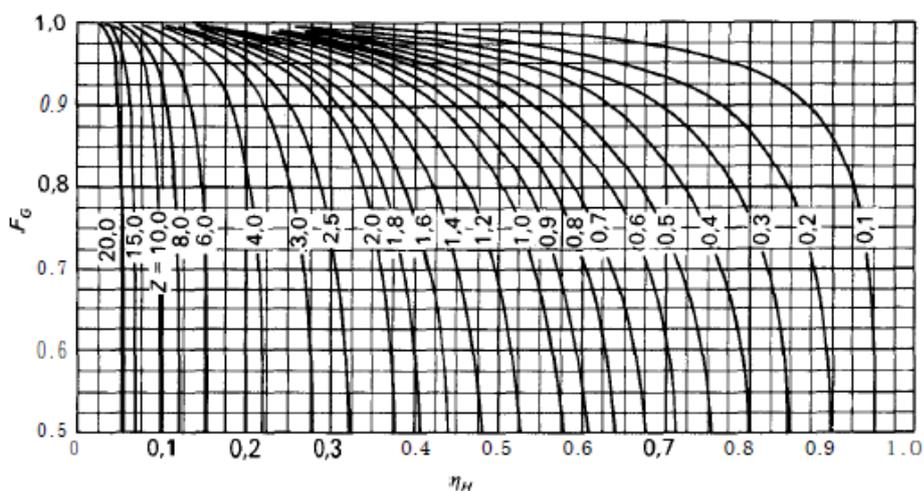


Figura B.1. Corrección de la temperatura media logarítmica [13].

Dónde:

- η_H : Toma valores entre 0 y 1.
- Z : Toma valores entre 0, que correspondería al cambio de fase del fluido del lado de la carcasa, hasta infinito, que correspondería con el cambio de fase del fluido de los tubos.

$$\eta_H = \frac{T_F - T_{Fo}}{T_{Co} - T_{Fo}} \quad [Ec. B. 2.5]$$

$$Z = \frac{T_{Co} - T_C}{T_F - T_{Fo}} \quad [Ec. B. 2.6]$$

Reemplazando datos en ambas ecuaciones se tiene:

$$\eta_H = \frac{51,90 \text{ }^\circ\text{C} - 27 \text{ }^\circ\text{C}}{113,51 \text{ }^\circ\text{C} - 27 \text{ }^\circ\text{C}} = 0,29$$

$$Z = \frac{113,51 \text{ }^\circ\text{C} - 106,03 \text{ }^\circ\text{C}}{51,90 \text{ }^\circ\text{C} - 27 \text{ }^\circ\text{C}} = 0,30$$

Y con ello, se tiene un valor del factor de corrección (F_G) igual a 0,98.

Al aplicar este valor a la temperatura media logarítmica tendremos un valor igual a $\Delta T_m = 67,68^\circ\text{C}$.

B.2.8.2. Coeficiente global de transferencia de calor

El rendimiento de los intercambiadores que transmiten calor por convección, radiación y conducción, suele deteriorarse con el paso del tiempo como resultado de la acumulación de depósitos sobre las superficies de transferencia. Es por eso, que el coeficiente global de transferencia se modifica teniendo en cuenta los efectos de incrustación como sigue:

$$\frac{1}{UA} = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{R''_{f,i}}{A_i} + \frac{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{2\pi k L} + \frac{R''_{f,o}}{A_o} + \frac{1}{h_o A_o}$$

Dónde:

- U: Coeficiente global de transferencia ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$).
- h_i : Coeficiente de convección interno ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$).
- A_i : Área interna tubos (m^2).
- $R''_{f,i}$: Factor de incrustación interno ($\text{m}^2\cdot^\circ\text{C}\cdot\text{W}^{-1}$).
- r_o : Radio externo tubos (m).
- r_i : Radio interno tubos (m).
- k: Conductividad térmica del material del tubo ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$).
- L: longitud tubos (m).
- $R''_{f,o}$: Factor de incrustación externo ($\text{m}^2\cdot^\circ\text{C}\cdot\text{W}^{-1}$).
- A_o : Área externa tubos (m^2).
- h_o : Coeficiente de convección externa ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$).

El coeficiente de transferencia de calor total U de un intercambiador de calor, no tiene significado a menos que se especifique el área a la que está referido. Dicha área será la exterior (A_o) y por tanto se realizará el cálculo del coeficiente de transferencia de calor total exterior U_o al despejarlo de la anterior ecuación, quedando:

$$\frac{1}{U_o} = \frac{A_o}{h_i A_i} + \frac{A_o \cdot R''_{f,i}}{A_i} + \frac{A_o \cdot \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{2\pi k L} + R''_{f,o} + \frac{1}{h_o}$$

Que al aplicar la fórmula de área la expresión se simplifica:

$$\frac{1}{U_o} = \frac{D_o}{h_i D_i} + \frac{D_o \cdot R''_{f,i}}{D_i} + \frac{D_o \cdot \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{2k} + R''_{f,o} + \frac{1}{h_o} \quad [Ec. B. 2.7]$$

- **Cálculo del área inicial**

Previamente se debe tomar un valor de coeficiente global inicial para poder resolver las ecuaciones y obtener el área de transferencia de calor requerido. Según datos bibliográficos, para este tipo de intercambiadores, el valor del coeficiente es de $40 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{°C}^{-1}$.

A continuación es posible realizar el cálculo del área inicial de transferencia (A_s) mediante la ecuación [Ec.B.2.2], para el calor intercambiado $Q = 1,56 \cdot 10^7 \text{ kJ}\cdot\text{h}^{-1}$:

$$A_s = \frac{Q}{U \cdot \Delta T_m} = \frac{1,56 \cdot 10^7 \frac{\text{kJ}}{\text{h}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \cdot \frac{1000 \text{ J}}{1 \text{ kJ}}}{40 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{°C}} \cdot 67,68 \text{ °C}} = 1599,12 \text{ m}^2$$

- **Coefficientes de ensuciamiento interno y externo**

Se trata de factores bibliográficos que presentan unidades de $\text{h}\cdot\text{ft}^2\cdot\text{F}\cdot\text{Btu}^{-1}$, con un valor igual a $R_{f,o}''=0,002$ ($35,22 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$) para el aire, y de $R_{f,i}''=0,001$ ($17,61 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$) para compuestos en condensadores, así como de vapores de cabeza en unidades de alquilación en la industria [27].

- **Coefficiente individual de convección**

El coeficiente individual de convección se determina mediante el número adimensional Nusselt que se define como:

$$Nu = \frac{h \cdot D}{k} \quad [Ec. B. 2.8]$$

Así mismo, se tiene una correlación que determina el valor de Nu, dependiendo de la superficie en consideración y el fluido que circula por ésta,

que contiene los números adimensionales de Reynolds (Re) y Prandtl (Pr) que se definen como:

$$Re = \frac{v \cdot D \cdot \rho}{\mu} \quad [Ec. B. 2.9]$$

$$Pr = \frac{C_p \cdot \mu}{k} \quad [Ec. B. 2.10]$$

Dónde:

- v: Velocidad del fluido considerado ($m \cdot s^{-1}$).
- D: Diámetro de la conducción en consideración (m).
- ρ : Densidad del fluido en consideración ($kg \cdot m^{-3}$).
- μ : Viscosidad del fluido en consideración ($kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$).
- C_p : Capacidad calorífica del fluido en consideración ($J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$).
- k: Conductividad térmica fluido en consideración ($W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$).

Para ello, se recogen en la Tabla B.3 las propiedades necesarias para el cálculo de los coeficientes de convección.

Tabla B.3. Datos cálculo coeficientes individuales de convección.

	Flujo interno (i)	Flujo externo (o)
Caudal másico ($kg \cdot h^{-1}$)	40.632	621.547,49
Temperatura media fluido ($^\circ C$)	109,77	39,45
Temperatura superficie tubular ($^\circ C$)	74,61	74,61
Diámetro referido (m)	$20 \cdot 10^{-3}$	$25 \cdot 10^{-3}$
Densidad del fluido ($kg \cdot m^{-3}$)	392,96	1,13
Conductividad térmica fluido ($W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$)	0,063	0,027
Calor específico ($kJ \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$)	1,66	1,01
Viscosidad fluido ($kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$)	$12,42 \cdot 10^{-5}$	$1,92 \cdot 10^{-5}$
Longitud tubo (m)	8,53	8,53

Coefficiente individual de convección interna

Para el cálculo del coeficiente individual de convección interna (h_i), el fluido que circula por el interior de los tubos es el vapor que sale de cabeza de columna y la dimensión a la que hace referencia el número de Nusselt será el diámetro interno (D_i) de los tubos.

Al no conocer el número de tubos necesarios para el intercambio de calor, se debe tomar un valor inicial de velocidad del fluido que pasa por los tubos.

Para evitar una pérdida de carga muy alta o un sobredimensionamiento del equipo Se sabe que los tubos deben llevar una velocidad entre 1 y $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ y un Re mayor a 10^4 , por lo que se tomará un valor inicial igual a $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, así como los valores de las propiedades de flujo interno de la Tabla B.3 para la determinación de los números adimensionales.

Se procede al cálculo del Reynolds mediante [Ec.B.2.9]:

$$Re_i = \frac{1 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 20 \cdot 10^{-3} \text{m} \cdot 392,96 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{12,42 \cdot 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}} = 6,28 \cdot 10^4$$

Así como el número Prandtl mediante [Ec.B.2.10]:

$$Pr_i = \frac{1,66 \cdot 10^3 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 12,42 \cdot 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}}{0,063 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot ^\circ\text{C}}} = 3,25$$

Al verificarse el flujo turbulento, Re mayor a 10^4 , obtener un número de Prandtl entre 0,6 y 160 y una relación L/D_i mayor a 10 ($L/D_i \approx 430$), se utiliza la correlación de Dittus-Boelter [Ec.B.2.11] correspondiente a convección forzada para flujo interno en conducto circular y una temperatura media del fluido mayor a la temperatura de la superficie tubular, esta última calculada como la temperatura media entre el fluido interno y el externo.

$$Nu_i = 0,027 \cdot Re_i^{\frac{4}{5}} \cdot Pr_i^{0,3} \quad [\text{Ec. B. 2.11}]$$

Reemplazando datos se tiene:

$$Nu_i = 0,027 \cdot (6,28 \cdot 10^4)^{\frac{4}{5}} \cdot (3,25)^{0,3} = 225,90$$

Y despejando el coeficiente de convección de la ecuación [Ec.B.2.8] para flujo interno:

$$h_i = \frac{Nu_i \cdot k_i}{D_i} = \frac{225,90 \cdot 0,063 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}}{20 \cdot 10^{-3} \text{m}} = 722,15 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$$

Coefficiente individual de convección externa

Para el cálculo del coeficiente individual de convección externa (h_o), el fluido que circula por el exterior como medio de refrigeración de los tubos es aire y la dimensión a la que hace referencia la ecuación, será el diámetro externo de los tubos. Se toman los valores de las propiedades de flujo externo de la Tabla B.3 y se procede de la misma manera que en el cálculo del coeficiente de convección interna.

El valor de la velocidad que debe tener el aire debe estar entre 1,5 y 3,6 $m \cdot s^{-1}$, con un Reynolds entre $2 \cdot 10^3$ y $2 \cdot 10^6$ y un número de Prandtl mayor a 0,7 según la bibliografía [14]. Por lo que se toma un valor inicial del aire igual a 3,6 $m \cdot s^{-1}$ obteniendo mediante [Ec.B.2.9] y [Ec.B.2.10]:

$$Re_o = \frac{3,6 \frac{m}{s} \cdot 25 \cdot 10^{-3} m \cdot 1,13 \frac{kg}{m^3}}{1,92 \cdot 10^{-5} \frac{kg}{m \cdot s}} = 5,37 \cdot 10^3$$

$$Pr_o = \frac{1,01 \frac{J}{kg \cdot ^\circ C} \cdot 1,92 \cdot 10^{-5} \frac{kg}{m \cdot s}}{0,027 \frac{W}{m \cdot ^\circ C}} = 0,73$$

Al presentar un Re entre 10^3 y $2 \cdot 10^6$ y un número de Prandtl entre 0,7 y 500, se utiliza la correlación correspondiente a convección forzada en flujo externo de un banco de tubos y flujo perpendicular de Zhukauskas:

$$Nu_o = C_1 \cdot C_2 \cdot Re_o^m \cdot Pr_o^{0,36} \left(\frac{Pr_o}{Pr_s} \right)^{0,25} \quad [Ec. B. 2.12]$$

Siendo:

- C_1 : Coeficiente dependiente tanto del número de Re como de las dimensiones de tubos.

Para un valor de $S_T (p')=64$ mm y S_L (altura del triángulo que forma la disposición de tubos)=55 mm, según la tabla siguiente, para una relación $S_T/S_L=1,15$ y un valor de $Re_o=5,37 \cdot 10^3$ el valor de C_1 es 0,36.

Tabla B.4. Coeficientes de la correlación de Zhukauskas [37].

Configuración	Re	C ₁	m
En línea/Cruzada	10 ² -10 ³	Considerar como tubos aislados	
En línea (S _T /S _L >0,7)	10 ³ -2·10 ⁵	0,27	0,63
Cruzada (S _T /S _L <2)	10 ³ -2·10 ⁵	0,35(S _T /S _L) ^{1/5}	0,6
Cruzada (S _T /S _L >2)	10 ³ -2·10 ⁵	0,4	0,6

- C₂: Coeficiente dependiente de la configuración y del número de filas de tubos. Para un número de filas igual a 6 y configuración cruzada, según la tabla indicada a continuación, C₂ es 0,935. Considerando que en la industria generalmente se emplean de 4 a 6 filas de tubos en los intercambiadores, y que la configuración cruzada permite un número mayor de tubos en el aparato que en configuración cuadrada.

Tabla B.5. Coeficiente C2 de la correlación de Zhukauskas [37].

Nº filas	1	2	3	4	5	7	10	13	16
En línea	0,70	0,80	0,86	0,90	0,92	0,95	0,97	0,98	0,99
Cruzada	0,64	0,76	0,84	0,89	0,92	0,95	0,97	0,98	0,99

- m: Coeficiente dependiente del número de Reynolds y dimensiones de tubos. Según la Tabla B.4, el valor de m es igual a 0.6.
- Pr_s: Número de Prandtl evaluado a temperatura superficial de la conducción externa. Ts igual a 74,61°C.

Presenta el fluido a esta temperatura los valores de las propiedades siguientes:

$$k=0,029 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$$

$$C_{p,S}=1,01\cdot 10^3 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\text{C}^{-1}$$

$$\mu_{F,S}=2,08\cdot 10^{-5} \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}.$$

Obteniendo un número de Prandtl mediante la ecuación igual a 0,72.

Reemplazando datos para obtener Nu externo:

$$Nu_o = 0,36 \cdot 0,935 \cdot (5,37 \cdot 10^3)^{0,6} \cdot (0,73)^{0,36} \left(\frac{0,73}{0,72}\right)^{0,25} = 52,12$$

Y despejando de la ecuación [Ec.B.2.8], se obtiene el coeficiente externo h_o' que debe corregirse en coordinación con el coeficiente de ensuciamiento:

$$h_o' = \frac{Nu_o \cdot k_o}{D_o} = \frac{52,12 \cdot 0,027 \frac{W}{m \cdot K}}{25 \cdot 10^{-3} m} = 54,50 \frac{W}{m^2 K}$$

- **Conductividad del material**

La conductividad del material de los tubos que se trata de acero SA-106 B como la de las aletas que se trata de aluminio, se determinan para una temperatura media entre los dos fluidos que participan del intercambio de calor.

La temperatura media del fluido que pasa por el interior de los tubos es de 109,77°C y la del fluido externo es de 39,45°C por lo que la temperatura en consideración será de 74,61°C.

Para esta temperatura el acero presenta una conductividad térmica de 61,47 W·m⁻¹·°C⁻¹ y el aluminio de 205,07 W·m⁻¹·°C⁻¹ según la siguiente tabla:

Tabla B.6. Conductividad térmica de materiales [27].

	Temperatura (°C)	Conductividad (W·m⁻¹·°C⁻¹)
Acero al carbono	0	65,2
	100	60,2
	200	55,5
	300	49,0
	Temperatura (°C)	Conductividad (W·m⁻¹·°C⁻¹)
Aluminio	0	202,5
	100	206,0
	500	268,3

- **Aletas**

Las dimensiones seleccionadas para las aletas se muestran en la tabla siguiente:

Tabla B.7. Dimensiones aletas del condensador.

Dimensión	Valor (mm)
Altura aleta (h_a)	13
Espesor aleta (e_a)	1
Espaciamiento entre aletas (E_a)	2

Con una densidad (d_a) de 10 aletas por in (394 aletas por metro) que para una longitud de tubos (L) conocida e igual a 336 in (8,53 m) se tiene un total de 3.360 aletas en cada tubo.

Área específica de tubo sin aletas

El área específica sin aletas (A_{mo}) se define como la superficie específica total de tubo menos el área que ocupa la base de las aletas, y requiere tanto del diámetro exterior de tubo (D_o) como de la densidad de aletas (d_a) y su espesor (e_a):

$$A_{mo} = \pi \cdot D_o - \pi \cdot D_o \cdot e_a \cdot d_a \quad [Ec. B. 2.13]$$

Reemplazando valores se tiene:

$$A_{mo} = \pi \cdot 25 \cdot 10^{-3}m - \pi \cdot 25 \cdot 10^{-3}m \cdot 10^{-3}m \cdot 394 \cdot m^{-1}$$

$$A_{mo} = 0,063 \frac{m^2}{m}$$

Área de una aleta

Se define como el resultado de añadir a la superficie radial de cada aleta, el área que ocupa su extremo de la siguiente forma:

$$A_a = A_{base} + A_{extremo} \quad [Ec. B. 2.14]$$

$$A_{base} = \frac{2 \cdot \pi \cdot [(2 \cdot h_a + D_o)^2 - D_o^2]}{4}$$

$$A_{extremo} = \pi \cdot (2 \cdot h_a + D_o) \cdot e_a$$

Sustituyendo valores:

$$A_{base} = \frac{2 \cdot \pi \cdot [(2 \cdot 13 \cdot 10^{-3} m + 25 \cdot 10^{-3} m)^2 - (25 \cdot 10^{-3} m)^2]}{4} = 0,003$$

$$A_{extremo} = \pi \cdot (2 \cdot 13 \cdot 10^{-3} m + 25 \cdot 10^{-3} m) \cdot 10^{-3} m = 10^{-4}$$

$$A_a = 0,003 m^2$$

Área específica de aletas

Su determinación de esta área (A_f) depende tanto del área de cada aleta (A_a) como de la densidad de aletas (d_a):

$$A_f = A_a \cdot d_a \quad [Ec. B. 2.15]$$

$$A_f = 0,003 m^2 \cdot 394 \cdot m^{-1} = 1,231 \frac{m^2}{m}$$

Área específica de tubo con aletas

Se define como la adición de la superficie específica de aletas (A_f) a la superficie específica de tubo desnudo o sin aletas (A_{mo}):

$$A_{ta} = A_f + A_{mo} \quad [Ec. B. 2.16]$$

$$A_{ta} = 1,231 \frac{m^2}{m} + 0,063 \frac{m^2}{m} = 1,294 \frac{m^2}{m}$$

Eficiencia aletas

En la determinación de la eficiencia de las aletas transversales de tipo circulares rectangulares, se hace uso de la gráfica de eficiencia (Anexo F: Figura F.1), para la que se debe determinar tres parámetros que dependen de la geometría seleccionada:

$$r_{2c} = r_2 + \frac{t}{2} \quad [Ec. B. 2.17]$$

$$L_c = L + \frac{t}{2} \quad [Ec. B. 2.18]$$

$$A_p = L_c \cdot t \quad [Ec. B. 2.19]$$

Donde t es el espesor de aleta e_a , L la longitud de la aleta (h_a) y r_2 el radio de tubo exterior ($D_o/2$) tomando en cuenta la altura de la aleta. Todas las dimensiones se encuentran en metros.

Sustituyendo valores se tiene:

$$r_{2c} = \left(\frac{25 \cdot 10^{-3} m}{2} + 13 \cdot 10^{-3} m \right) + \frac{10^{-3} m}{2} = 0,026 m$$

$$L_c = 13 \cdot 10^{-3} m + \frac{10^{-3} m}{2} = 0,013 m$$

$$A_p = 0,013 m \cdot 10^{-3} m = 7 \cdot 10^{-6} m^2$$

Con estos parámetros se puede definir los datos necesarios para la utilización de la gráfica:

$$\frac{r_{2c}}{r_1} \quad [Ec. B. 2.20]$$

$$L_c^{\frac{3}{2}} \left(\frac{h}{k \cdot A_p} \right)^{\frac{1}{2}} \quad [Ec. B. 2.21]$$

Donde r_1 es el radio exterior de tubo ($D_o/2$), h es el coeficiente de convección exterior h_o en $W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$ y k la conductividad térmica del material (aluminio) en $W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$.

$$\frac{r_{2c}}{r_1} = \frac{0,026 m}{\frac{25 \cdot 10^{-3} m}{2}} = 2,02$$

$$L_c^{\frac{3}{2}} \left(\frac{h'}{k \cdot A_p} \right)^{\frac{1}{2}} = (0,013 m)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{51,87 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}}{205,07 \frac{W}{m \cdot ^\circ C} \cdot 7 \cdot 10^{-6} m^2} \right)^{\frac{1}{2}} = 0,29$$

Se tiene por tanto una eficacia de aleta igual al 94%.

- **Área tubos**

- **Área externa tubos**

Se define como el área de tubo exterior relacionada con el diámetro externo (D_o) y la longitud de tubo (L):

$$A_o = \pi \cdot D_o \cdot L \quad [Ec. B. 2.22]$$

$$A_o = \pi \cdot 25 \cdot 10^{-3} m \cdot 8,35 m = 0,681 m^2$$

Área interna tubos

Se define como el área de tubo interior relacionada con el diámetro interno (Di) y la longitud de tubo (L):

$$A_i = \pi \cdot D_i \cdot L \quad [Ec. B. 2.23]$$

$$A_i = \pi \cdot 20 \cdot 10^{-3} m \cdot 8,53 m = 0,533 m^2$$

Área libre de paso de aire

El área libre de paso de aire (A_{paso}) se trata de la superficie libre existente entre dos tubos que comprende tanto el área libre transversal entre ellos, como del área libre longitudinal o entre la zona aleteada de tubos, multiplicada por la cantidad de filas de tubos menos una unidad:

$$\begin{aligned} A_{\text{libre entre tubos}} &= L_t \cdot d_a \cdot E_a \cdot (p' - D_o) \\ A_{\text{libre entre aletas}} &= L_t \cdot d_a \cdot e_a \cdot [p' - (2 \cdot h_a + D_o)] \\ A_{paso} &= (n_{\text{filas}} - 1) \cdot (A_{\text{libre entre tubos}} + A_{\text{libre entre aletas}}) \quad [Ec. B. 2.24] \end{aligned}$$

Como se ha mencionado en el cálculo del coeficiente de convección externa, se asignan 6 filas de tubos, y se sustituyen valores:

$$A_{\text{libre entre tubos}} = 8,53 m \cdot 394 \cdot m^{-1} \cdot 25 \cdot 10^{-3} m \cdot 0,002 m \cdot (64 \cdot 10^{-3} m - 25 \cdot 10^{-3} m)$$

$$A_{\text{libre entre tubos}} = 0,256 m^2$$

$$A_{\text{libre entre aletas}}$$

$$\begin{aligned} &= 8,53 m \cdot 394 \cdot m^{-1} \cdot 25 \cdot 10^{-3} m \cdot 10^{-3} m \\ &\cdot [(64 \cdot 10^{-3} m - (2 \cdot 13 \cdot 10^{-3} m + 25 \cdot 10^{-3} m))] \end{aligned}$$

$$A_{\text{libre entre aletas}} = 0,023 m^2$$

$$A_{paso} = (6 - 1) \cdot (0,256 m^2 + 0,023 m^2) = 1,395 m^2$$

- **Número de tubos**

Para el cálculo del número de tubos presentes en el intercambiador de calor se hace uso de dos ecuaciones que relacionan la cantidad de aire total necesaria para el intercambio de calor (A_{aire}) con la cantidad de paso de aire entre tubos (A_{paso}) y el número de tubos ($n^{\circ}tubos/fila$, $n^{\circ}tubos$) y filas de tubos ($n^{\circ}filas$) de la siguiente manera:

$$n^{\circ} \frac{tubos}{fila} = \frac{A_{aire}}{A_{paso}} \quad [Ec. B. 2.25]$$

$$n^{\circ} tubos = n^{\circ} \frac{tubos}{fila} \cdot n^{\circ} filas \quad [Ec. B. 2.26]$$

Donde A_{aire} , se determina mediante el caudal volumétrico de aire ($Q_{v,aire}$) y de su velocidad (v_{aire}):

$$A_{aire} = \frac{Q_{v,aire}}{v_{aire}} \quad [Ec. B. 2.27]$$

$$A_{aire} = \frac{\frac{172,65 \frac{kg}{s}}{1,13 \frac{kg}{m^3}}}{3,6 \frac{m}{s}} = 42,60 m^2$$

Por tanto, al sustituir los datos en las ecuaciones [Ec.B.2.25] y [Ec.B.26] sabiendo que se ha tomado un valor de filas igual a 6:

$$n^{\circ} \frac{tubos}{fila} = \frac{42,60 m^2}{1,395 m^2} \approx 31 \frac{tubos}{fila}$$

$$n^{\circ} tubos = 31 \cdot 6 = 186 tubos$$

- **Determinación del coeficiente global de transmisión de calor**

Con todos los datos necesarios según la ecuación [Ec.B.2.7], se procede a la determinación del coeficiente global de transmisión de calor:

Definiendo previamente que el coeficiente de convección externa. Al conocer el valor del coeficiente de ensuciamiento del aire ($R_{f,o}''$) y tomando en cuenta la resistencia producida por las aletas, la resistencia externa corregida viene definida por:

$$\frac{1}{h_o} = \left(\frac{1}{h_o'} + R_{f,o}'' \right) \cdot \frac{A_{ta}}{\Omega \cdot A_f + A_{mo}} \quad [\text{Ec. B. 2.28}]$$

Y sustituyendo datos:

$$\frac{1}{h_o} = \left(\frac{1}{54,50 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}} + 35,22 \cdot 10^{-5} \frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W} \right) \cdot \frac{1,294 \frac{m^2}{m}}{0,94 \cdot 1,231 \frac{m^2}{m} + 0,063 \frac{m^2}{m}}$$

$$\frac{1}{h_o} = 0,020 \frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W}$$

Por consiguiente, el coeficiente de convección externa es $h_o = 50,42 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ \text{C}^{-1}$. Y el coeficiente global:

$$\begin{aligned} \frac{1}{U_o} = & \frac{25 \cdot 10^{-3} m}{722,15 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \cdot 20 \cdot 10^{-3} m} + \frac{25 \cdot 10^{-3} m \cdot 17,61 \cdot 10^{-5} \frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W}}{20 \cdot 10^{-3} m} \\ & + \frac{25 \cdot 10^{-3} m \cdot \ln \left(\frac{25 \cdot 10^{-3} m / 2}{20 \cdot 10^{-3} m / 2} \right)}{2 \cdot 61,47 \frac{W}{m \cdot ^\circ C}} + 35,22 \cdot 10^{-5} \frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W} + \frac{1}{50,42 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}} \end{aligned}$$

$$\frac{1}{U_o} = 0,022 \frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W}$$

Resultado que al realizar la inversa se obtiene:

$$U_o = 44,98 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

El valor calculado es muy próximo al supuesto inicialmente que tenía un valor de $40,00 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ \text{C}^{-1}$.

A continuación es posible realizar la verificación del área requerida para el intercambio de calor y de la velocidad del fluido en los tubos.

- **Area intercambiador**

Para el valor de coeficiente de transmisión de calor global calculado, el área necesaria (A_s') según la ecuación [Ec.B.2.2], es:

$$A_s' = \frac{1,56 \cdot 10^7 \frac{kJ}{h} \cdot \frac{1 h}{3.600 s} \cdot \frac{1.000 J}{1 kJ}}{44,98 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \cdot 67,68 ^\circ C} = 1.422,13 m^2$$

Él área considerada inicialmente tenía un valor de 1.599,12 m², por tanto, se dan como válidos todos los cálculos realizados anteriormente, pues el sobredimensionamiento es solo de un 11,07 %, que se trata de una cifra menor al 20% permitido por razones de error cometido, razones económicas y de funcionamiento.

Concluyendo que el área de intercambio es A_s=1.422,13 m².

B.2.8.3. Tubos del intercambiador.

- **Velocidad del fluido**

La velocidad (v_F) del fluido que circula por los tubos puede determinarse mediante la relación que mantiene con el número de Reynolds modificada para varios tubos.

$$Re = \frac{4 \cdot Q_{m,fluido} \cdot n_p}{\pi \cdot D_i \cdot \mu \cdot n^{tubos}} = \frac{4 \cdot 40.632 \frac{kg}{h} \cdot \frac{1h}{3600 s} \cdot 2}{\pi \cdot 20 \cdot 10^{-3} m \cdot 12,42 \cdot 10^{-5} \frac{kg}{m \cdot s} \cdot 186} = 6,26 \cdot 10^4$$

$$v_F = \frac{Re \cdot \mu}{D_i \cdot \rho} = \frac{6,26 \cdot 10^4 \cdot 12,42 \cdot 10^{-5}}{20 \cdot 10^{-3} \cdot 392,96 \frac{kg}{m^3}} = 0,997 \frac{m}{s}$$

Cifra que se aproxima a la velocidad inicial supuesta de fluido de 1 m·s⁻¹.

- **Haz de tubos**

Los 186 tubos se disponen en 6 filas de 31 tubos por fila y van a presentarse como agrupaciones de tubos, o haces de tubos. Por esta razón va a definirse el ancho mínimo del haz tubular (W_{m-haz}) y el número de haces necesarios (Nhaz) relacionados con la longitud (L) que tiene un valor de 8,53 m y la disposición de tubos mediante el pitch (p') con un valor de 64 mm.

Iniciando el cálculo mediante el ancho mínimo por la ecuación [Ec.B.2.29] en metros.

$$W_{m-haz} = \frac{L}{4} \quad [Ec. B. 2.29]$$

$$W_{m-haz} = \frac{8,53 \text{ m}}{4} = 2,13 \text{ m}$$

El número de tubos por ancho de haz mínimo se determina mediante la ecuación [Ec.B.2.30] en metros.

$$\frac{N_{\text{tubos}}}{Am-haz} = \frac{W_{m-haz} - 0,2}{p'} - 0,5 \quad [Ec. B. 2.30]$$

$$\frac{N_{\text{tubos}}}{Am-haz} = \frac{2,13 \text{ m} - 0,2}{64 \cdot 10^{-3} \text{ m}} - 0,5 \approx 30$$

Por tanto, el número de haces viene definido como:

$$Nhaz = \frac{n^{\circ} \text{tubos}}{\text{fila}} \quad [Ec. B. 2.31]$$

$$Nhaz = \frac{31}{30} \approx 1$$

La agrupación de los tubos, o haz de tubos, se define mediante las ecuaciones indicadas a continuación en mm:

$$W_{\text{cabezal}} = \left(n^{\circ} \frac{\text{tubos}}{\text{fila}} - 1 \right) \cdot p' + D_a + 200 \quad [Ec. B. 2.32]$$

$$W_{\text{haz}} = W_{\text{cabezal}} + 200 \quad [Ec. B. 2.33]$$

$$W_s = (W_{\text{haz}} + 40) \cdot Nhaz + 60 \quad [Ec. B. 2.34]$$

Dónde:

- W_{cabezal} : Ancho mínimo del cabezal de los tubos (mm).
- p' : Pitch (mm). Igual a 64 mm.
- D_a : Diámetro de aleta (mm). Con un valor de 51 mm.
- W_{haz} : Ancho del banco de tubos o haz de tubos (mm).
- W_s : Ancho total de sección de banco de tubos (mm).
- $Nhaz$: Número de haces.

Sustituyendo datos se tiene:

$$W_{\text{cabezal}} = (31 - 1) \cdot 64 \text{ mm} + 51 \text{ mm} + 200 \text{ mm} = 2.156 \text{ mm} = 2,16 \text{ m}$$

$$W_{\text{haz}} = 2.156 \text{ mm} + 200 \text{ mm} = 2.356 \text{ mm} = 2,36 \text{ m}$$

$$W_s = (2.356\text{mm} + 40\text{mm}) \cdot 1 + 60\text{mm} = 2.456\text{ mm} = 2,46\text{ m}$$

Se obtiene un ancho total de haz de tubos igual a 2,46 m presentando un haz de tubos con un total de 186 tubos, ó 93 tubos en forma de "U", dispuestos en 6 filas.

B.2.9. Diseño mecánico del intercambiador.

En el diseño mecánico de la unidad de intercambio de calor se realiza el cálculo de espesor de los tubos, para lo cual, previamente van a determinarse las condiciones de diseño como la presión y la temperatura, así como algunos coeficientes necesarios de diseño.

B.2.9.1. Presión de diseño

Van a evaluarse tres presiones distintas y elegirse la mayor para tener un margen de seguridad en el diseño. Conociendo la presión en el condensador 2,09 atm ($2,51\text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$) se tiene:

$$P_{d,1} = 1,1 \cdot P = 1,1 \cdot 2,51 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} = 2,76 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$P_{d,2} = P + 2 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} = 2,51 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} + 2 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} = 4,51 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$P_{d,3} = 3,5 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

Dónde:

- Pd,1: Presión máxima de operación con un aumento del 10% ($\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$).
- Pd,2: Presión máxima de diseño con un incremento de 2 $\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$ ($\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$).
- Pd,3: Presión establecida como referencia por el código 3,5 $\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$.

Entonces, como presión de diseño se fija 4,51 $\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$ (4,37 atm ó 64,18 psi).

B.2.9.2. Temperatura de diseño

En cuanto a la temperatura, deben añadirse 20°C a la temperatura máxima alcanzada por las corrientes implicadas, ésta se corresponde con la temperatura a la que accede el vapor de cabeza de columna al condensador, con un valor de 113,51°C. Por consiguiente, la temperatura de diseño es 133,51 °C (406,66 K ó 272,32 F).

B.2.9.3. Máxima tensión admisible

La tensión máxima permisible (S) depende tanto de la temperatura de diseño como del material de construcción. Se define como máxima tensión permisible 1.361 atm (20.000 psi) según el código ASME para una temperatura de 272,32°F y acero SA-106 B (Véase Anexo F: Tabla F.3c y Tabla F.3d).

B.2.9.4. Eficiencia de soldadura

El coeficiente de soldadura (E) toma un valor de 1 para tuberías sin soldadura correspondiente a la temperatura de diseño y material utilizado (Véase Anexo F: Tabla F.5).

B.2.9.5. Factor de corrosión

En la determinación de este factor (C) debe tenerse en cuenta que la velocidad de corrosión es de $5,00 \cdot 10^{-3}$ pulgadas por año, como que el tiempo de vida para tuberías se considera entre 15 y 20 años. Es por esta razón, que se considerarán 20 años de tiempo de vida media para las condiciones de diseño y con ello se tiene:

$$C = 5,00 \cdot 10^{-3} \frac{in}{año} \cdot 20 años = 0,1 in = 3 \cdot 10^{-3} m$$

B.2.9.6. Factor Y

El factor de diseño Y, depende tanto de la temperatura de diseño como del material utilizado. Toma un valor de 0,4 (Véase Anexo F: Tabla F.6).

• **Espesor de los tubos**

El espesor de los tubos utilizados en el intercambiador (t'_{tubos}) se calcula mediante la fórmula [Ec.B.2.35]. Si el espesor obtenido cumple las desigualdades [Ec.B.2.36] y [Ec.B.2.37], entonces habría que tener en cuenta consideraciones de factores especiales como de efectos de fatiga y tensión térmica.

$$t'_{tubo} = \frac{P_{dt} \cdot D_o}{2(S \cdot E + P_{dt} \cdot Y)} \quad [Ec. B. 2.35]$$

$$t'_{tubo} > \frac{D_o}{6} \quad [Ec. B. 2.36]$$

$$\frac{P_{dt}}{S \cdot E} > 0,385 \quad [Ec. B. 2.37]$$

Dónde:

- P_{dt} : Presión de diseño (psi).
- D_o : Diámetro exterior de tubos (in). Igual a 1 in (25 mm).
- S : Tensión máxima admisible (psi).
- E : Eficiencia de soldadura.
- Y : Factor de diseño.

Reemplazando valores:

$$t'_{tubo} = \frac{64,18 \text{ psi} \cdot 1 \text{ in}}{2(20.000 \text{ psi} \cdot 1 + 64,18 \text{ psi} \cdot 0,4)} = 1,60 \cdot 10^{-3} \text{ in}$$

Comprobando las desigualdades:

$$t'_{tubo} = 1,60 \cdot 10^{-3} \text{ in} \not> \frac{D_o}{6} = \frac{1 \text{ in}}{6} = 0,17 \text{ in}$$

$$\frac{P_{dt}}{S \cdot E} = \frac{64,18 \text{ psi}}{20.000 \text{ psi} \cdot 1} = 0,003 \not> 0,385$$

De manera que no se considerarán otros factores adicionales, únicamente el factor de corrosión C :

$$t_{tubo} = t'_{tubo} + C$$

Sustituyendo datos se tiene:

$$t_{tubo} = 1,60 \cdot 10^{-3} \text{ in} + 0,1 \text{ in} = 0,102 \text{ in}$$

El valor tabulado más próximo al espesor de tubo calculado, es de 0,109 in correspondiente a un calibre 12 BWG, coincidente con el calibre elegido y dimensiones utilizadas de tubos (Véase Anexo F: Tabla F.7).

B.2.10. Pérdida de carga en tubos.

La pérdida de carga (ΔP_{tubos}) producida en los tubos del intercambiador es debida a dos componentes, una que se da en el tramo recto de circulación del fluido ($\Delta P_{t\text{-recto}}$) y otra cuando el fluido cambia de dirección debido a la forma de las conducciones (ΔP_t).

$$\Delta P_{\text{tubos}} = \Delta P_{t\text{-recto}} + \Delta P_t \quad [\text{Ec. B. 2.38}]$$

Los datos iniciales necesarios son tomados de la Tabla B.2.3 para el flujo interno:

B.2.10.1. Pérdida de carga en tramo recto

Su determinación requiere de la velocidad másica del fluido (G_t) en $\text{lb}\cdot\text{ft}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, de ϕ_t que relaciona la viscosidad del fluido con la del agua en las mismas condiciones, así como de la gravedad específica del fluido (S_k) y del factor de fricción (f) según la ecuación [Ec.B.2.39]:

$$\Delta P_{t\text{-recto}} = \frac{f \cdot G_t^2 \cdot L \cdot n_p}{5,22 \cdot 10^{10} \cdot D_i \cdot S_k \cdot \phi_t} \quad [\text{Ec. B. 2.39}]$$

- **Velocidad másica**

La velocidad másica del fluido se determina mediante la ecuación:

$$G_t = \frac{\dot{m}_t}{a_t} \quad [\text{Ec. B. 2.40}]$$

Donde m_t es el caudal másico que fluye por las conducciones y a_t un parámetro que se define de la siguiente manera:

$$a_t = \frac{n^{\circ}tubos \cdot S_i}{n_p} \quad [Ec. B.2.41]$$

Donde S_i es la sección de paso del fluido definido por el diámetro interior del tubo (D_i) y n_p el número de pasos que presenta cada tubo en la carcasa.

Sustituyendo valores se tiene:

$$a_t = \frac{186 \cdot \left[\pi \cdot \frac{(20 \cdot 10^{-3} m)^2}{4} \right]}{2} = 0,029 m^2 = 0,31 ft^2$$

Obteniendo la velocidad másica como:

$$G_t = \frac{40.632 \frac{kg}{h} \cdot \frac{1h}{3600s}}{0,029 m^2} = 391,66 \frac{kg}{m \cdot s^2} = 288.785,47 \frac{lb}{ft^2 \cdot h}$$

- **Viscosidad relativa**

Esta relación de viscosidad ϕ_t solicita del valor de la viscosidad del agua en las mismas condiciones a las que opera el intercambiador con el fluido del interior de los tubos. Éste dato es facilitado por el simulador HYSYS a presión y temperatura de diseño, obteniéndose un valor de $25,28 \cdot 10^{-5} kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$.

$$\phi_t = \frac{12,42 \cdot 10^{-5} \frac{kg}{m \cdot s}}{25,28 \cdot 10^{-5} \frac{kg}{m \cdot s}} = 0,49$$

- **Gravedad específica**

Se define como la relación entre la densidad del fluido y la del agua en las mismas condiciones. La densidad del agua obtenida mediante el simulador en las condiciones consideradas en el cálculo de la viscosidad relativa es de $939,63 kg \cdot m^{-3}$, quedando:

$$S_k = \frac{392,96 \frac{kg}{m^3}}{939,63 \frac{kg}{m^3}} = 0,42$$

- **Factor de fricción**

Se determina mediante el número de Reynolds y el ábaco de Moody (Véase Anexo F: Figura F.3).

El Reynolds se calcula por su expresión modificada para un banco de tubos mediante la definición de la velocidad:

$$Re = \frac{4 \cdot \dot{m}_F \cdot n_p}{\pi \cdot D_i \cdot \mu \cdot n^{2tubos}}$$

Expresión de la que se conocen todos los valores:

$$Re = \frac{4 \cdot 40.632 \frac{kg}{h} \cdot \frac{1h}{3600s} \cdot 2}{\pi \cdot 20 \cdot 10^{-3}m \cdot 12,42 \cdot 10^{-5} \frac{kg}{m \cdot s} \cdot 186} = 6,26 \cdot 10^4$$

Si la rugosidad del acero comercial es de $4,60 \cdot 10^{-5}$, la rugosidad relativa toma un valor de 0,0023. En consecuencia el valor del factor f es $0,027 \text{ ft}^2 \cdot \text{ft}^{-2}$.

- **Pérdida de carga**

Conociendo todos los valores de la ecuación [Ec.B.2.39], se prosigue a la determinación de la pérdida de carga de tramo recto en la longitud de tubo (L) igual a 8,53m (28 ft) y de diámetro interno (Di) igual $20 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ (0,07 ft):

$$\Delta P_{t-recto} = \frac{0,024 \cdot \left(288.785,47 \frac{lb}{ft^2 \cdot h}\right)^2 \cdot 28 \text{ ft} \cdot 2}{5,22 \cdot 10^{10} \cdot 0,07 \text{ ft} \cdot 0,42 \cdot 0,49} = 180,41 \text{ psf}^{21} = 1,25 \text{ psi}$$

B.2.10.2. Pérdida de carga en cambio de dirección

El cálculo de la pérdida de carga en el cambio de dirección que realizan los tubos en "U" se define por la ecuación siguiente:

$$\Delta P_t = \frac{4 \cdot n_p \cdot Vt^2}{S_k \cdot 2 \cdot g} \quad [Ec. B. 2.42]$$

²¹ Psf: Pound square feet. Libra por pie cuadrado

Dónde:

- V_t : Velocidad del fluido ($\text{ft}\cdot\text{s}^{-1}$). Que puede determinarse mediante la relación entre el caudal másico \dot{m}_F y a_t :

$$V_t = \frac{\dot{m}_F}{a_t} = \frac{40.632 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot \frac{1\text{h}}{3600\text{s}}}{0,029 \text{ m}^2} = 1 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 3,27 \frac{\text{ft}}{\text{s}}$$

- g : Aceleración de la gravedad ($\text{ft}\cdot\text{s}^{-2}$).
Con un valor igual a $32,19 \text{ ft}\cdot\text{s}^{-2}$.

$$\Delta P_t = \frac{4 \cdot 2 \cdot \left(3,27 \frac{\text{ft}}{\text{s}}\right)^2}{0,42 \cdot 2 \cdot 32,19 \frac{\text{ft}}{\text{s}^2}} = 3,18 \text{ psi}$$

Sustituyendo datos en la ecuación [Ec.B.2.38]:

$$\Delta P_{\text{tubos}} = 1,25 \text{ psi} + 3,18 \text{ psi} = 4,43 \text{ psi} = 0,30 \text{ atm}$$

Este valor es menor al supuesto inicialmente de 5 psi o 0,34 atm. Por lo que se dan como válidos los cálculos anteriores, pues se trabaja con un margen de seguridad adecuado.

B.2.11. Sistema de impulsión.

B.2.11.1. Diámetro de ventilador

Como cifra de partida, debemos especificar el diámetro de cada ventilador, así posteriormente se realizan los cálculos del número necesario de éstos y de su potencia.

El diámetro de cada ventilador debe ser menor al ancho de cada haz de tubos (2,36 m), por esta razón se ha seleccionado un diámetro de ventilador (D_V) igual a 7 ft (2,13 m) [53].

Consecuentemente el área del ventilador (S_V) será igual a:

$$S_V = \pi \cdot \frac{D_V^2}{4} = \pi \cdot \frac{2,13^2}{4} = 3,58 \text{ m}^2$$

B.2.11.2. Posición de ventilador

La distancia existente entre cada uno de ellos y el haz de tubos (d_{V-haz}) debe cumplir las dos siguientes desigualdades:

$$d_{V-haz} > 0,5 \cdot D_V = 0,5 \cdot 2,13 \text{ m} = 1,07 \text{ m}$$

$$d_{V-haz} < \frac{3}{4} \cdot D_V = \frac{3}{4} \cdot 2,13 \text{ m} = 1,60 \text{ m}$$

Por lo que ésta distancia tendrá un valor de $d_{V-haz} = 1,52 \text{ m}$ (5 ft).

El ángulo de dispersión de aire de cada ventilador (α_V) viene dado por las dimensiones del ventilador como por las dimensiones de los tubos a los cuales refrigera. Éste ángulo tiene un valor máximo de 45° .

Se realiza un proceso de iteración para conseguir unas dimensiones adecuadas de ventilador, de forma que al menos el 40% del área de los tubos sobre la que actúa cada ventilador esté cubierta.

Se inicia el cálculo con un valor del ángulo α_V de 45° , se determina el diámetro de proyección (D_{proy}), el área de proyección (A_{proy}), la longitud mínima de tubos sobre la que actúa cada ventilador (ψ_V), el área desviada correspondiente (A_{desv}) y el área de incidencia sobre el banco de tubos (A_{inc}), con lo que finalmente se obtiene el porcentaje de área de ventilador sobre el área de tubos en la que actúa (%V/tubos). Se debe realizar el cálculo disminuyendo el ángulo α_V hasta obtener un valor de %V/tubos igual o mayor a 40%.

Para determinar el valor preciso, se utiliza la herramienta SOLVER del programa Excel, el cual nos indica que el ángulo que cumple los requerimientos es de 32° .

Los valores de los parámetros para un ángulo de $\alpha_V = 32^\circ$ (0,56 rad/s) son:

$$D_{proy} = 2 \cdot d_{V-haz} \cdot \text{tg}\alpha_V + D_V$$

$$D_{proy} = 2 \cdot 1,52 \text{ m} \cdot \text{tg} 0,56 + 2,13 \text{ m} = 4,04 \text{ m}$$

Por consiguiente el área de proyección es:

$$A_{proy} = \pi \cdot \frac{D_{proy}^2}{4} = \pi \cdot \frac{(4,04 \text{ m})^2}{4} = 12,80 \text{ m}^2$$

La longitud mínima de tubos afectados:

$$\psi_V = 2 \cdot \sqrt{\left(\frac{D_{proy}}{2}\right)^2 - \left(\frac{W_{haz}}{2}\right)^2} = 2 \cdot \sqrt{\left(\frac{4,04 \text{ m}}{2}\right)^2 - \left(\frac{2,36 \text{ m}}{2}\right)^2} = 3,28 \text{ m}$$

El área desviada:

$$A_{desv} = 2 \cdot A_{proy} \left[\frac{\arcsen\left(\frac{\psi_V}{D_{proy}}\right)}{180^\circ} - \frac{\left(\frac{\psi_V}{D_{proy}}\right) \sqrt{1 - \left(\frac{\psi_V}{D_{proy}}\right)^2}}{\pi} \right]$$

$$A_{desv} = 2 \cdot 2,66 \text{ m}^2 \left[\frac{\arcsen\left(\frac{3,28 \text{ m}}{4,04 \text{ m}}\right)}{180^\circ \cdot 2 \cdot \frac{\pi}{360^\circ}} - \frac{\left(\frac{3,28 \text{ m}}{4,04 \text{ m}}\right) \sqrt{1 - \left(\frac{3,28 \text{ m}}{4,04 \text{ m}}\right)^2}}{\pi} \right] = 3,86 \text{ m}^2$$

Área de incidencia:

$$A_{inc} = A_{proy} - A_{desv} = 12,80 \text{ m}^2 - 3,86 \text{ m}^2 = 8,94 \text{ m}^2$$

Y por tanto el porcentaje:

$$\frac{S_V}{A_{inc}} = \frac{3,58 \text{ m}^2}{8,94 \text{ m}^2} \cdot 100 = 40 \%$$

Con ello, se podrá obtener el número de ventiladores necesarios (N_{vent}) para cubrir la longitud total de tubos (L):

$$N_{vent} = \frac{A_{haz}}{A_{inc}} = \frac{L \cdot W_{haz}}{A_{inc}} = \frac{8,53 \text{ m} \cdot 2,36 \text{ m}}{8,94 \text{ m}^2} = 2,25 \approx 3$$

Si la longitud total de tubos (L) necesita de 3 ventiladores, la distancia entre los centros de cada uno de ellos (d_{V-V}) es:

$$d_{V-V} = \frac{8,53 \text{ m}}{3} = 2,84 \text{ m}$$

Cuando esta distancia sea menor a la longitud mínima de tubos afectados, el ángulo de trabajo puede ser menor, y puede incluso modificarse aún más la distribución. Sin embargo, al tener una pequeña diferencia entre estos valores, se mantienen las distancias escritas anteriormente.

La distancia horizontal entre el centro de los ventiladores extremos y el fin adyacente del haz de tubos será:

$$d_{V-haz} = \frac{d_{V-V}}{2} = \frac{2,84 \text{ m}}{2} = 1,42 \text{ m}$$

B.2.11.3. Potencia del ventilador

Su determinación se realiza mediante la siguiente expresión:

$$P_V = P_{V,Real} \cdot \eta_V \cdot \eta_I$$

Dónde:

- P_V : Potencia del ventilador (CV).
- $P_{V,Real}$: Potencia real requerida (CV).
- η_V : Rendimiento del ventilador.
- η_I : Rendimiento de los impulsos.

La potencia P_V es la suministrada por el sistema idealmente, sin embargo, en un sistema real debe considerarse una potencia mayor ($P_{V,Real}$) pues deben incluirse los términos de rendimiento del sistema.

La potencia ideal requerida se define mediante la ecuación:

$$P_V = 0,04 \cdot A_{haz}$$

En la que A_{haz} se trata de la superficie frontal del sistema en ft^2 .

$$P_V = 0,04 \cdot (L \cdot W_{haz}) = 0,04 \cdot \left[8,53 \text{ m} \cdot 2,36 \text{ m} \cdot \frac{1 \text{ ft}^2}{(30,48 \cdot 10^{-2} \text{ m})^2} \right] = 8,66 \text{ CV}$$

Si el rendimiento mecánico del ventilador tiene un valor de 0,75 y el rendimiento de los impulsores 0,95 según fuentes bibliográficas [14], se define que la potencia real del sistema es:

$$P_{V,Real} = \frac{P_V}{\eta_V \cdot \eta_I} = \frac{8,66 \text{ CV}}{0,75 \cdot 0,95} = 12,15 \text{ CV} = 8,94 \text{ kW}$$

Contando con 3 ventiladores, cada uno de ellos debe proporcionar por tanto una potencia de:

$$P_{c/vent} = \frac{P_{V,Real}}{N_{vent}} = \frac{12,15 \text{ CV}}{3} = 4,05 \text{ CV} = 2,98 \text{ kW}$$

B.3. Diseño del rehervidor.

B.3.1. Introducción.

En el proceso de destilación, el calderín se trata de un equipo fundamental. Este intercambiador, consigue aportar el calor necesario para elevar la temperatura del líquido recibido de fondo de columna hasta una temperatura tal que, gran parte de éste, fluya como vapor ascendente. El fluido mediante el cual se realizará dicho aporte de calor, será vapor de agua a alta presión.

La corriente resultante en forma de vapor, es dirigida hacia la columna por medio de tuberías, donde se pone en contacto con la corriente líquida descendente, proveniente de platos superiores, y se enriquece de los componentes más volátiles.

B.3.2. Caracterización de las corrientes.

En la siguiente tabla, se mencionan las características de las corrientes fluidas de entrada y salida del rehervidor.

Tabla B.8. Características de las corrientes del rehervidor.

Propiedad	Entrada (L')	Salida (W)	Producto (V')
Temperatura (°C)*	245,86	253,21	253,21
Densidad (kg·m ⁻³)*	561,33	564,22	10,92
Viscosidad (kg·m ⁻¹ ·s ⁻¹)*	15,97·10 ⁻⁵	16,29·10 ⁻⁵	0,79·10 ⁻⁵
Conductividad térmica (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)*	0,084	0,084	0,026
Peso molecular (kg·mol ⁻¹)*	166,09	172,46	160,39
Caudal molar (kmol·h ⁻¹)	1.643	1.123	519
Caudal másico (kg·h ⁻¹)	272.821	193.708	83.313
Caudal volumétrico (m ³ ·h ⁻¹)	486	343	7.627
Entalpía (kJ·kmol ⁻¹)*	-237.504,50	-232.395,94	-197.361,94
Entalpía (kJ·kg ⁻¹)	-1.429,97	-1.347,51	-1.230,48

(*)Propiedades obtenidas mediante el simulador Aspen HYSYS.

La presión a la que el producto sale del rehervidor (W y V') es de 2,61 atm, produciéndose una pérdida de presión como si de una etapa de equilibrio se tratase con un valor de 0,006 atm, por lo que la presión en el último plato de la columna es de 2,61 atm.

Así mismo, se definen las características del fluido de servicio, el vapor de agua de alta presión:

Tabla B.9. Propiedades fluido de servicio de rehervidor.

Propiedad	Valor
Temperatura entrada (°C)	265,08
Temperatura salida (°C)	263,21
Presión entrada (atm)	50,33
Densidad (kg·m ⁻³)	25,92
Viscosidad (kg·m ⁻¹ ·s ⁻¹)	1,80·10 ⁻⁵
Calor específico (kJ·kg ⁻¹ ·°C ⁻¹)	4,22
Calor latente (kJ·kg ⁻¹)	1632,08
Conductividad térmica (W·m ⁻¹ ·°C ⁻¹)	0,05

Considerando que la caída de presión en los tubos es de 0,07 atm, como se indica en los requisitos de diseño, que la temperatura de salida del vapor se

obtiene mediante el simulador HYSYS y que las propiedades del vapor de agua se obtiene mediante Anexo F: Tabla F.8b.

B.3.3. Requisitos de diseño y consideraciones.

Requisitos

- Debe ser posible obtener una corriente de fondo de columna que no exceda 50 ppm de benceno en su composición.
- El área de intercambio de energía debe tener un tamaño considerable ya el caudal a tratar es elevado.
- El fluido de servicio debe ser eficaz, pero a su vez económico y respetuoso con el medio ambiente.

Consideraciones

- La pérdida de carga del fluido en el rehervidor debe tener un valor igual o menor al que se produce en una etapa teórica de equilibrio, considerada como 0,006 atm por plato [20].
- La pérdida de carga del fluido de servicio debe ser igual o menor a 1 psi o 0,07 atm, dado que se trata de vapor de agua de alta presión [27].

B.3.4. Selección del tipo de intercambiador.

La corriente saliente de fondo de columna recibe el calor necesario para elevar su temperatura mediante un rehervidor tipo Kettle, ya que cuando se produce una vaporización del fluido del lado de la carcasa en un intercambiador de carcasa y tubos, éste diseño proporciona un espacio adecuado de cúpula para la separación del vapor y el líquido por encima del haz de tubos originando las corrientes necesarias tanto de fluido de operación de la columna de separación, como de producto final de ésta en estado líquido.

B.3.5. Selección de la trayectoria de flujo.

Las características de los fluidos con los que se opera definen la trayectoria que sigue cada uno. La elevada presión y temperatura que porta el vapor de agua determinan a que éste sea conducido por los tubos del

intercambiador y por tanto, por la carcasa circulará el líquido procedente de la columna de separación.

B.3.6. Características del intercambiador.

El intercambiador es un rehervidor tipo Kettle de configuración similar al intercambiador de carcasa y tubos de tipo 1-2, ofreciendo un paso del fluido de operación por el equipo y dos pasos por los tubos del vapor de agua.

Los tubos presentan un diámetro externo (D_o) de 32 mm constituido por aletas transversales, un diámetro interno (D_i) de 25 mm, una disposición triangular de tubos con un pitch (p') de 79 mm, y una longitud (L) de 3,66 m.

El material de la carcasa es acero al carbono SA-285 C, el de los tubos acero al carbono SA-106 B y el de las aletas aluminio.

Todas estas características son fundamentadas y justificadas en el Documento 1: Memoria.

B.3.7. Cálculo del calor intercambiado.

El calor intercambiado en el rehervidor es determinado mediante un balance energético, el cual se reduce a un balance de entalpía puesto que no se realiza trabajo externo, no se transfiere calor al sistema si el intercambiador está bien aislado, y los cambios en la energía cinética y en la energía potencial suelen ser insignificantes.

Resulta entonces, que si el calor que entra al sistemas es igual al que sale, al calor que porta el líquido ($Q_{L'}$) que ingresa al rehervidor, será necesario añadirle una cantidad de energía (Q_{Aporte}) tal que dé como resultado una corriente en forma de vapor con un determinado calor ($Q_{V'}$) que retornará a columna y una corriente líquida de producto final con cierta energía (Q_W):

$$Q_{L'} + Q_{Aporte} = Q_{V'} + Q_W$$

Definiendo el calor como la relación entre el caudal másico (\dot{m}) de cada corriente y cuyos valores se muestran en la Tabla B.8 y la entalpía (H) de cada corriente obtenida mediante el simulador HYSYS:

$$\dot{m}_{L'} \cdot H_{L'} + Q_{Aporte} = \dot{m}_{V'} \cdot H_{V'} + \dot{m}_W \cdot H_W$$

Sustituyendo los datos requeridos y despejando el calor que es necesario retirar, se tiene:

$$Q_{Aporte} = \dot{m}_{V'} \cdot H_{V'} + \dot{m}_W \cdot H_W - \dot{m}_{L'} \cdot H_{L'}$$

Dónde:

- $\dot{m}_{V'}$: Caudal másico del vapor V' ($\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$). Igual a $83.313 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$.
- \dot{m}_W : Caudal másico del producto líquido W ($\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$).
Igual a $193.708 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$.
- $\dot{m}_{L'}$: Caudal másico del líquido de ingreso al rehervidor L' ($\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$).
Igual a $272.821 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$.
- $H_{V'}$: Entalpia del vapor V' ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$). Igual a $-1.230,48 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$.
- H_W : Entalpia del producto líquido W ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$).
Igual a $-1.347,51 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$.
- $H_{L'}$: Entalpia del líquido L' ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$). Igual a $-1.429,97 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$.

Reemplazando datos en la ecuación se obtiene:

$$Q_{Aporte} = 83.313 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot \left(-1.230,48 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right) + 193.708 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot \left(-1.347,51 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right) - 272.821 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot \left(-1.429,97 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right) = -2,66 \cdot 10^7 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}$$

Sabiendo que el calor que es necesario aportar, razón por la que presenta el signo negativo, se define como la relación entre el caudal másico del vapor de agua a alta presión necesario (\dot{m}_{Agua}) y la entalpía de vaporización de éste (λ_{Agua}):

$$Q_{Aporte} = \dot{m}_{\text{Agua}} \cdot \lambda_{\text{Agua}} \quad [\text{Ec. B. 3.1}]$$

Al sustituir los datos en la anterior ecuación, se consigue obtener el caudal másico requerido:

$$\dot{m}_{\text{Agua}} = \frac{Q_{Aporte}}{\lambda_{\text{Agua}}} = \frac{2,66 \cdot 10^7 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}}{1.632,08 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 16.291,30 \frac{\text{kg}}{\text{h}} = 4,53 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

B.3.8. Cálculo del área del intercambiador.

El área necesaria del intercambiador se determina siguiendo cada uno de los pasos del cálculo del área de intercambio de calor del condensador, es decir, desde [Ec.B.2.2] hasta la [Ec.B.2.28] con las modificaciones indicadas en cada apartado.

La determinación del área del intercambiador se determina de la misma forma que para el condensador, mediante la siguiente ecuación:

$$Q = U \cdot A_S \cdot \Delta T_m \quad [Ec. B. 2.2]$$

Dónde:

- Q: Calor intercambiado entre fluidos ($J \cdot s^{-1}$).
- U: Coeficiente global de transferencia de materia ($W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$).
- A_S : Área de transferencia de calor (m^2).
- ΔT_m : Incremento de temperatura media entre los dos fluidos ($^\circ C$).

B.3.8.1. Diferencia de Temperatura media

Se debe tener en cuenta que el fluido frío en el rehervidor se trata del líquido proveniente del fondo de la columna de separación que entra a una temperatura (T_{F0}) de $245,86^\circ C$ y debe alcanzar una temperatura (T_F) de $253,21^\circ C$, y que el vapor de agua porta una temperatura inicial (T_{C0}) de $265,08^\circ C$ y sale a una temperatura (T_C) de $263,21^\circ C$. Sustituyendo valores en la ecuación de temperatura media logarítmica, se tiene:

$$\Delta T_{mL} = \frac{(T_C - T_F) - (T_{C0} - T_{F0})}{\ln\left(\frac{T_C - T_F}{T_{C0} - T_{F0}}\right)} = \frac{(263,21^\circ C - 253,21^\circ C) - (265,08^\circ C - 245,86^\circ C)}{\ln\left(\frac{263,21^\circ C - 253,21^\circ C}{265,08^\circ C - 245,86^\circ C}\right)}$$

$$\Delta T_{mL} = 14,11^\circ C$$

El cálculo del factor F_G se realiza a partir de la determinación de Z y η_H según la Figura B.1 para intercambiadores de tipo 1-2.

Reemplazando datos en las ecuaciones de los parámetros que definen el factor, se tiene:

$$\eta_H = \frac{T_F - T_{F0}}{T_{co} - T_{F0}} = \frac{253,21^\circ C - 245,86^\circ C}{265,08^\circ C - 245,86^\circ C} = 0,38$$

$$Z = \frac{T_{Co} - T_C}{T_F - T_{Fo}} = \frac{265,08 \text{ }^\circ\text{C} - 263,21 \text{ }^\circ\text{C}}{253,21 \text{ }^\circ\text{C} - 245,86 \text{ }^\circ\text{C}} = 0,25$$

Y con ello, se tiene un valor del factor de corrección (F_G) igual a 0,99.

Al aplicar este valor a la temperatura media logarítmica tendremos un valor igual a $\Delta T_m = 13,97^\circ\text{C}$.

B.3.8.2. Coeficiente global de transferencia de calor

El coeficiente global de transferencia se ve afectado por los efectos de incrustación, y el resultado de la modificación, al aplicar la fórmula de área exterior de tubo, es la siguiente:

$$\frac{1}{U_o} = \frac{D_o}{h_i D_i} + \frac{D_o \cdot R''_{f,i}}{D_i} + \frac{D_o \cdot \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{2k} + R''_{f,o} + \frac{1}{h_o} \quad [\text{Ec. B. 2.7}]$$

Dónde:

- U : Coeficiente global de transferencia ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$).
- h_i : Coeficiente de convección interno ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$).
- A_i : Área interna tubos (m^2).
- $R''_{f,i}$: Factor de incrustación interno ($\text{m}^2\cdot^\circ\text{C}\cdot\text{W}^{-1}$).
- r_o : Radio externo tubos (m).
- r_i : Radio interno tubos (m).
- k : Conductividad térmica del material del tubo ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$).
- L : longitud tubos (m).
- $R''_{f,o}$: Factor de incrustación externo ($\text{m}^2\cdot^\circ\text{C}\cdot\text{W}^{-1}$).
- A_o : Área externa tubos (m^2).
- h_o : Coeficiente de convección externa ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$).

- **Coeficientes de ensuciamiento interno y externo**

Se trata de factores bibliográficos que presentan unidades de $\text{h}\cdot\text{ft}^2\cdot\text{F}\cdot\text{Btu}^{-1}$, con un valor igual a $R''_{f,o} = 0,002$ ($35,22\cdot 10^{-5} \text{ m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$) para el agua, y de $R''_{f,i} = 0,002$ ($35,22\cdot 10^{-5} \text{ m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$) para productos de rehervidores en unidades de alquilación [27].

• **Número de tubos y diámetro de carcasa.**

Para la determinación del número de tubos que contiene el intercambiador, se debe tomar un valor inicial de velocidad del fluido que pasa por los tubos.

Para evitar una pérdida de carga muy alta o un sobredimensionamiento del equipo se sabe que los tubos deben llevar una velocidad entre 1 y $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ y un Re mayor a 10^4 , sin embargo como se está operando a una presión muy elevada se tomará un valor inicial de velocidad de $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Como consecuencia, el caudal volumétrico de vapor de agua ($Q_{V,Agua}$) que fluye por cada tubo es:

$$Q_{V,Agua} = v_{Agua} \cdot S_{tubo,i} = v_{Agua} \cdot \left(\pi \cdot \frac{D_i^2}{4} \right) \cdot \frac{1}{n_p}$$

Dónde:

- v_{Agua} : Velocidad del vapor de agua ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
- D_i : Diámetro interno de tubo (m). Igual a $25 \cdot 10^{-3}$ m.
- n_p : Número de pasos de los tubos. Igual a 2.

Sustituyendo datos se tiene:

$$Q_{V,Agua} = 4 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot \left[\frac{\pi \cdot (25 \cdot 10^{-3} \text{m})^2}{4} \right] \cdot \frac{1}{2} = 9,77 \cdot 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Con lo cual, relacionándolo con la densidad del agua en fase vapor (ρ_{Agua}), se tiene:

$$\dot{m}_{Agua,tubo} = Q_{V,Agua} \cdot \rho_{Agua} = 9,77 \cdot 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 25,92 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 0,03 \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 91,21 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Luego, conociendo por una parte, el caudal total de vapor de agua que debe circular por los tubos es el determinado por medio de la ecuación [B.3.1] con un valor de $\dot{m}_{Agua} = 16.291,30 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ y que guarda una directa relación con el caudal que fluye por cada tubo ($\dot{m}_{Agua,tubo}$), entonces el número de tubos necesarios en el intercambiador es:

$$N_{tubos,Reb} = \frac{\dot{m}_{Agua}}{\dot{m}_{Agua,tubo}} = \frac{16.291,30 \frac{kg}{h}}{91,21 \frac{kg}{h}} = 178,62 \text{ tubos}$$

Dado que se debe operar con números enteros de tubos y mejor par, para poder dividirlos en filas, se decide considerar con 180 tubos en forma de U.

El diámetro inferior aproximado de la carcasa se puede determinar mediante la siguiente expresión:

$$D_{carcasa} = 0,637 \sqrt{\frac{CL}{CTP} \cdot \frac{(N_{tubos,Reb} \cdot \pi \cdot D_o) \cdot \left(\frac{p'}{D_o}\right)^2 \cdot D_o}{L}}$$

Dónde:

- CL: Constante de configuración de tubos. Con un valor de 1 para arreglos cuadrados y un valor de 0,87 para arreglos triangulares.
- CTP: Constante de conteo de tubos. Depend del número de pasos de tubos por la carcasa; así, para un paso de tubos es igual a 1, para dos pasos 0,9, y para cuatro pasos 0,85.
- Ntubos, Reb: Número de tubos.
- Do: Diámetro externo tubos.
- P': Pitch.
- L: Longitud tubos.

Sustituyendo datos se tiene:

$$D_{carcasa} = 0,637 \sqrt{\frac{0,87}{0,9} \cdot \frac{(180 \cdot \pi \cdot 32 \cdot 10^{-3}m) \cdot \left(\frac{79 \cdot 10^{-3}m}{32 \cdot 10^{-3}m}\right)^2 \cdot 32 \cdot 10^{-3}m}{3,66 m}}$$

$$D_{carcasa} = 1,18 m$$

Los tamaños de carcasa comerciales, indican que el diámetro de carcasa debe ser igual a 1,22 m (48 in) (Véase Anexo F: Tabla F.9).

La velocidad del fluido se recalcula para determinar un valor real de la siguiente manera:

$$v_{\text{Agua}} = \frac{n_p \cdot Q_{V, \text{Agua Total}}}{N_{\text{tubos, Reb}} \cdot S_{\text{tubo, i}}} = \frac{2 \cdot 16.291,30 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot \frac{1 \text{h}}{3.600 \text{s}} \cdot \frac{\text{m}^3}{25,92 \text{kg}}}{180 \cdot \left[\frac{\pi \cdot (25 \cdot 10^{-3} \text{m})^2}{4} \right]} = 3,97 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

• **Coefficiente individual de convección**

El coeficiente individual de convección se determina mediante el número adimensional Nusselt, que a su vez requiere del número de Reynolds y Prandtl.

Para ello, se recogen en la tabla B.10. las cifras necesarias para el cálculo de los coeficientes de convección.

Tabla B.10. Datos cálculo coeficientes individuales de convección rehervidor.

	Flujo interno (i)	Flujo externo (o)
Caudal másico del fluido (kg·h ⁻¹)	16.291	273.099
Temperatura media del fluido (°C)	264,15	249,54
Densidad líquido (kg·m ⁻³)	776,85*	564,22
Densidad vapor (kg·m ⁻³)	25,92*	10,92
Conductividad térmica del fluido (W·m ⁻¹ ·°C ⁻¹)	0,05*	0,07
Capacidad calorífica del fluido (kJ·kg ⁻¹ ·°C ⁻¹)	4,22*	2,94
Viscosidad fluido (kg·m ⁻¹ ·s ⁻¹)	1,80·10 ⁻⁵ *	12,26·10 ⁻⁵
Temperatura superficie tubular (°C)	256,84	256,84
Diámetro referido (m)	25·10 ⁻³	32·10 ⁻³
Longitud tubo (m)	3,66	3,66

(*) Datos obtenidos mediante la tabla de propiedades del vapor saturado. Anexo F: Tabla F.8a y F.8b.

Las propiedades del fluido externo son valores medios obtenidos de las corrientes que fluyen en el rehervidor recogidas en la Tabla B.8., y la temperatura de la superficie tubular es la media entre la temperatura de las corrientes de fluido interno y externo.

Coefficiente individual de convección interna

Para el cálculo del coeficiente individual de convección interna (h_i), el fluido que circula por el interior de los tubos es el vapor de agua a alta presión, por lo que se toman los datos de flujo interno de la Tabla B.10. Y se determinan los números adimensionales:

$$Re_i = \frac{4 \cdot Q_{m, \text{Agua}} \cdot n_p}{\pi \cdot D_i \cdot \mu \cdot n^{\circ} \text{tubos}} = \frac{4 \cdot 16.291,30 \cdot \frac{1 \text{h}}{3600 \text{s}} \cdot 2}{\pi \cdot 25 \cdot 10^{-3} \text{m} \cdot 1,80 \cdot 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}} \cdot 180} = 1,42 \cdot 10^5$$

$$Pr = \frac{C_p \cdot \mu}{k} = \frac{4,22 \cdot 10^3 \frac{J}{kg \cdot ^\circ C} \cdot 1,80 \cdot 10^{-5} \frac{kg}{m \cdot s}}{0,05 \frac{W}{m \cdot ^\circ C}} = 1,42$$

Al verificarse el flujo turbulento, Re mayor a 10^4 , obtener un número de Prandtl entre 0,6 y 160 y una relación L/Di mayor a 10 ($L/Di \approx 147$), se utiliza la correlación de Dittus-Boelter correspondiente a convección forzada para flujo interno en conducto circular y una temperatura media del fluido ($T_{m,i} = 264,15^\circ C$) mayor a la temperatura de la superficie tubular interna ($T_{s,i} = 256,84^\circ C$):

$$Nu_i = 0,023 \cdot Re_i^{\frac{4}{5}} \cdot Pr_i^{0,3}$$

Reemplazando datos se tiene:

$$Nu_i = 0,023 \cdot (1,42 \cdot 10^5)^{\frac{4}{5}} \cdot (1,42)^{0,3} = 339,14$$

Y despejando el coeficiente de convección de la ecuación [B.2.8] para flujo interno:

$$h_i = \frac{Nu_i \cdot k_i}{D_i} = \frac{339,14 \cdot 0,05 \frac{W}{m \cdot K}}{25 \cdot 10^{-3} m} = 726,05 \frac{W}{m^2 K}$$

Coefficiente individual de convección externa

Para el cálculo del coeficiente individual de convección externa (h_o), el fluido que circula por el exterior es el líquido proveniente de columna y la dimensión a la que se hace referencia en su determinación será el diámetro externo de los tubos.

Se toman los valores de las características de flujo externo de la Tabla B.10. y se procede de manera similar que en el cálculo del coeficiente de convección interna, pero definiendo en primer lugar las características de las aletas integradas en los tubos.

- **Aletas**

Las dimensiones seleccionadas para las aletas transversales se muestran en la tabla siguiente:

Tabla B.11. Dimensiones de aletas de rehervidor.

Dimensión	Valor (mm)
Altura aleta (h_a)	3
Espesor aleta (e_a)	1
Espaciamiento entre aletas (E_a)	3

Con una densidad (d_a) de 315 aletas por metro (8 aletas por pulgada), que para una longitud de tubos (L) de 3,66 m y un diámetro externo de tubos (D_o) conocido e igual a $32 \cdot 10^{-3}$ m se tiene un total de 1.152 aletas de aluminio por tubo.

Área específica de tubo sin aletas

El área específica sin aletas (A_{mo}) se define como la superficie específica total de tubo menos el área que ocupa la base de las aletas, y requiere tanto del diámetro exterior de tubo (D_o) como de la densidad de aletas (d_a) y su espesor (e_a):

$$A_{mo} = \pi \cdot D_o - \pi \cdot D_o \cdot e_a \cdot d_a \quad [Ec. B. 2.13]$$

Reemplazando valores se tiene:

$$A_{mo} = 0,094 \frac{m^2}{m}$$

Área de una aleta

El área de una aleta (A_a) se define como el resultado de añadir a la superficie lateral de cada aleta, el área que ocupa su extremo, y se determina de la siguiente forma:

$$A_a = A_{base} + A_{extremo} \quad [Ec. B. 2.14]$$

Sustituyendo valores:

$$A_a = 0,001 m^2$$

Área específica de aletas

La determinación de esta área (A_f) depende tanto del área de cada aleta (A_a) como de la densidad de aletas (d_a) de la siguiente forma:

$$A_f = A_a \cdot d_a \quad [Ec. B. 2.15]$$

$$A_f = 0,179 \frac{m^2}{m}$$

Área específica de tubo con aletas

Se define como la adición de la superficie específica de aletas (A_f) a la superficie específica de tubo desnudo o sin aletas (A_{mo}):

$$A_{ta} = A_f + A_{mo} \quad [Ec. B. 2.16]$$

$$A_{ta} = 0,273 \frac{m^2}{m}$$

Número de filas de tubos

Es necesario fijar un número de filas de tubos (n_{filas}), un arreglo de tubos, para hacer posible la determinación del número de tubos, y por tanto del coeficiente de transferencia y dimensiones del rehervidor. Éste puede tomar un valor entre 1 y 16, sin embargo, se elige un valor de 16 para asegurar una elevada área de transferencia y una configuración adecuada según la geometría cilíndrica de la carcasa en la que se disponen los tubos.

Área libre de paso de líquido

El área libre de paso de aire (A_{paso}) se trata de la superficie libre existente entre dos tubos que comprende tanto el área libre transversal entre ellos, como del área libre longitudinal o entre la zona aleteada de tubos, multiplicada por la cantidad de filas de tubos menos una unidad:

$$A_{libre \text{ entre tubos}} = L_t \cdot d_a \cdot E_a \cdot (p' - D_o)$$

$$A_{libre \text{ entre aletas}} = L_t \cdot d_a \cdot e_a \cdot [p' - (2 \cdot h_a + D_o)]$$

$$A_{paso} = (n_{filas} - 1) \cdot (A_{libre \text{ entre tubos}} + A_{libre \text{ entre aletas}}) \quad [Ec. B. 2.24]$$

$$A_{paso} = 2,790 m^2$$

Eficiencia aletas

En la determinación de la eficiencia de las aletas transversales de tipo circulares rectangulares, se hace uso de la gráfica de eficiencia (Anexo F: Figura F.1), para la que se debe determinar tres parámetros que dependen de la geometría seleccionada:

$$r_{2c} = r_2 + \frac{t}{2} \quad [Ec. B. 2.17]$$

$$L_c = L + \frac{t}{2} \quad [Ec. B. 2.18]$$

$$A_p = L_c \cdot t \quad [Ec. B. 2.19]$$

Donde t es el espesor de aleta e_a , L la longitud de la aleta (h_a) y r_2 el radio de tubo exterior ($D_o/2$) tomando en cuenta la altura de la aleta. Todas las dimensiones se encuentran en metros.

Sustituyendo valores se tiene:

$$r_{2c} = 0,019$$

$$L_c = 0,003$$

$$A_p = 5 \cdot 10^{-7}$$

A continuación, es necesario contar con el coeficiente de convección externo, y debido a que todavía no es posible determinarlo, porque requiere de un proceso iterativo de resolución, se toma un valor inicial de coeficiente externo.

Para una mezcla de componentes como son las parafinas, compuestos orgánicos pesados y compuestos orgánicos en ebullición, el valor de coeficiente de convección en un principio es $840 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{°C}^{-1}$.

Teniendo en cuenta que k es la conductividad térmica del material de las aletas para una temperatura de $256,84\text{°C}$, que se trata de la temperatura media entre la que porta el fluido que circula por los tubos y el que circula por la carcasa, y que se calcula por interpolación según la Tabla B.6. La conductividad del aluminio, realizando los cálculos correspondientes de interpolación como de cambio de unidades, es $230,38 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$.

Al contar con todos los datos necesarios, se procede a determinar los parámetros del cálculo de la eficacia de las aletas:

$$\frac{r_{2c}}{r_1} \quad [Ec. B. 2.20]$$

$$L_c^{\frac{3}{2}} \left(\frac{h}{k \cdot A_p} \right)^{\frac{1}{2}} \quad [Ec. B. 2.21]$$

Quedando como:

$$\frac{r_{2c}}{r_1} = 1,17$$

$$L_c^{\frac{3}{2}} \left(\frac{h}{k \cdot A_p} \right)^{\frac{1}{2}} = 0,38$$

Con lo cual, se tiene una eficacia de aleta del 89% según la Figura F.1 del Anexo F.

- **Áreas de tubos**

- Área externa tubos

Se define como el área de tubo exterior relacionada con el diámetro externo (Do) y la longitud de tubo (L):

$$A_o = 0,365 \text{ m}^2$$

- Área interna tubos

Se define como el área de tubo interior relacionada con el diámetro interno (Di) y la longitud de tubo (L):

$$A_i = 0,287 \text{ m}^2$$

- **Conductividad del material**

La temperatura media del fluido que pasa por el interior de los tubos es de 264,15 °C y la del fluido externo es de 249,54°C por lo que la temperatura en consideración será de 256,84°C.

Para esta temperatura el acero presenta una conductividad térmica de $51,80 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$ según la Tabla B.6.

- **Determinación del coeficiente de convección externa, área de transmisión y coeficiente global de transmisión de calor.**

En este tipo de intercambiadores, se produce la transferencia de valor por ebullición nucleada, mecanismo importante en la vaporización de líquidos. Se obtienen velocidades elevadas de transferencia de calor por unidad de área, como resultado de la formación de burbujas en la interfase de líquido y sólido.

Para la determinación del coeficiente de convección (h'_o), se recurre a la ecuación de McNelly:

$$h'_o = 0,225 \left(\frac{Q \cdot Cp}{A_s \cdot \lambda} \right)^{0,69} \cdot \left(\frac{P \cdot k_m}{\sigma} \right)^{0,31} \cdot \left(\frac{\rho_L}{\rho_V} - 1 \right)^{0,33}$$

Dónde:

- Q: Calor de transferencia ($\text{J}\cdot\text{s}^{-1}$). Igual a $2,66\cdot 10^7 \text{ J}\cdot\text{s}^{-1}$ o $7,39\cdot 10^6 \text{ J}\cdot\text{s}^{-1}$.
- Cp: Capacidad calorífica del fluido ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$).
Igual a $2,94 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$.
- As: Área de transferencia (m^2).
- λ : Calor de vaporización del fluido ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$). Igual a $307,01 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$, obtenido a mediante el simulador HYSYS.
- P: Presión del sistema (Pa). Igual a $2,61 \text{ atm}$ o $264,63\cdot 10^3 \text{ Pa}$.
- km: Conductividad del fluido ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$). Igual a $0,07 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$.
- σ : Tensión superficial fluido ($\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$). Igual a $0,007 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$, obtenido a partir del simulador HYSYS.
- ρ_L : Densidad del líquido ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$). Igual a $564,22 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.
- ρ_V : Densidad del vapor ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$). Igual a $10,92 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

Reemplazando datos:

$$h'_o = 0,225 \left(\frac{7,39 \cdot 10^6 \frac{J}{s} \cdot 2,94 \frac{kJ}{kg}}{A_s \cdot 307,01 \frac{kJ}{kg}} \right)^{0,69} \cdot \left(\frac{264,63 \cdot 10^3 \frac{N}{m^2} \cdot 0,07 \frac{W}{m \cdot ^\circ C}}{0,007 \frac{N}{m}} \right)^{0,31} \cdot \left(\frac{564,22 \frac{kg}{m^3}}{10,92 \frac{kg}{m^3}} - 1 \right)^{0,33} = \frac{175.480,75}{A_s^{0,69}}$$

Sin embargo, como se tienen aletas en la superficie, debe modificarse este coeficiente como sigue:

$$\frac{1}{h_o} = \left(\frac{1}{h'_o} + R''_{f,o} \right) \cdot \frac{A_{ta}}{\Omega \cdot A_f + A_{mo}} \quad [Ec. B. 2.28]$$

Resultando:

$$\frac{1}{h_o} = \left(\frac{1}{\frac{175.480,75}{A_s^{0,69}}} + 35,22 \cdot 10^{-5} \frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W} \right) \cdot \frac{0,273 m^2}{0,89 \cdot 0,179 m^2 + 0,094 m^2} \quad [Ec. B. 3.2]$$

A continuación es posible definir el área necesaria de intercambio a partir del calor de transferencia:

$$Q = U \cdot A_s \cdot \Delta T_m$$

Y despejando el coeficiente global y el área de transferencia se tiene:

$$U \cdot A_s = \frac{Q}{\Delta T_m} = \frac{7,39 \cdot 10^6 \frac{J}{s}}{13,97 ^\circ C} = 5,29 \cdot 10^5 \frac{W}{^\circ C} \quad [Ec. B. 3.3]$$

Luego se determina el valor del coeficiente global mediante la ecuación [Ec.B.2.7]:

$$\frac{1}{U_o} = \frac{D_o}{h_i D_i} + \frac{D_o \cdot R''_{f,i}}{D_i} + \frac{D_o \cdot \ln \left(\frac{r_o}{r_i} \right)}{2k} + R''_{f,o} + \frac{1}{h_o}$$

$$\frac{1}{U_o} = \frac{32 \cdot 10^{-3} m}{726,05 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \cdot 25 \cdot 10^{-3} m} + \frac{32 \cdot 10^{-3} m \cdot 35,22 \cdot 10^{-5} \frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W}}{25 \cdot 10^{-3} m} + \frac{32 \cdot 10^{-3} m \cdot \ln\left(\frac{32 \cdot 10^{-3} m}{25 \cdot 10^{-3} m}\right)}{2 \cdot 51,80 \frac{W}{m \cdot ^\circ C}} + 35,22 \cdot 10^{-5} \frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W} + \frac{1}{h_o} \quad [Ec.B.3.4]$$

Se combinan la ecuación del coeficiente externo calculada [Ec.B.3.2] y la anterior ecuación [Ec.B.3.4], sustituyendo la primera en la segunda. El resultado, que todavía depende del área de transferencia, se sustituye en la ecuación [Ec.B.3.3] de forma que se pueda resolver mediante iteraciones. El área resultante tiene un valor final de:

$$A_s = 2.259,15 \text{ m}^2$$

Cifra con la que se puede calcular el coeficiente externo de convección mediante la ecuación [Ec.B.3.2]:

$$h_o = 851,15 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

Que es diferente al supuesto inicial de $840 \text{ W} \cdot \text{m}^2 \cdot ^\circ \text{C}^{-1}$ solamente en un 1,33% por lo que se dan por válidos todos los anteriores cálculos.

Finalmente puede determinarse el coeficiente global de transferencia:

$$U = 234,01 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

Concluyendo que el número total de tubos es 180, o 90 tubos en forma de "U".

B.3.9. Características de carcasa y haz de tubos.

B.3.9.1. Carcasa.

El diámetro seleccionado de carcasa interior (Dsi) tendrá un valor de 1,22 m, debido a su capacidad de contener el número elevado de tubos. Contará también con un espesor de 13 mm por las dimensiones escogidas y las condiciones de operación como se indican en los siguientes apartados.

B.3.9.2. Soportes.

Los soportes externos de la carcasa son silletas del mismo material que ésta, localizados cerca de las líneas de tangencia de los cabezales y aguantados en cimentaciones que proporcionan estabilidad a la estructura.

En el interior de la carcasa, tiene placas que sujetan el haz de tubos, similares a las placas deflectoras con corte amplio.

B.3.10. Diseño mecánico del intercambiador.

En el diseño mecánico de la unidad de intercambio de calor se va a determinar el espesor requerido por los tubos y la carcasa.

Previamente, han de determinarse las condiciones de diseño como la presión y la temperatura, así como algunos coeficientes necesarios de diseño.

B.3.10.1. Presión de diseño.

Conociendo la presión de los tubos en el rehervidor como 50,30 atm (51,97 kg·cm⁻²), se va a añadir un 10% adicional de este valor para su diseño:

$$P_{d,1} = 1,1 \cdot P = 1,1 \cdot 51,97 \frac{kg}{cm^2} = 57,17 \frac{kg}{cm^2} = 813,11 \text{ psi}$$

La presión de diseño para la carcasa, es la misma que para la columna, pues el líquido que ingresa en el rehervidor proviene del fondo de la columna. Tiene un valor de 4,55 atm o 66,83 psi.

B.3.10.2. Temperatura de diseño.

En cuanto a la temperatura, deben añadirse 20°C a la temperatura máxima alcanzada en la operación, ésta se corresponde con la temperatura a la que accede el vapor de agua, con un valor de 265,08°C. Por consiguiente, la temperatura de diseño de los tubos es 285,08 °C (558,23 K ó 545,15 °F).

La temperatura de diseño de la carcasa es de 273,21 °C (546,36 K ó 523,78 °F).

B.3.10.3. Máxima tensión admisible.

La tensión máxima permisible (S) depende tanto de la temperatura de diseño como del material de construcción. Se define como máxima tensión permisible para el diseño de tubos de 1.237 atm (18.178 psi) según el código ASME para una temperatura de 545,15 °F y acero SA-106 B (Véase Anexo F: Tabla F.3c y Tabla F.3.d).

Para el diseño de la carcasa se tiene una máxima tensión permisible de 1.080 atm (15.867 psi).

B.3.10.4. Eficiencia de soldadura.

El coeficiente de soldadura (E) toma un valor de 1 para tuberías sin soldadura correspondiente a la temperatura de diseño y material utilizado, según el código (Véase Anexo F: Tabla F.5).

El coeficiente de soldadura para el diseño de la carcasa toma un valor de 0,85.

B.3.10.5. Factor de corrosión.

En la determinación de este factor (C) debe tenerse en cuenta que la velocidad de corrosión es de $5,00 \cdot 10^{-3}$ pulgadas por año, como que el tiempo de vida para tuberías se considera entre 15 y 20 años. Es por esta razón, que se considerarán 20 años de tiempo de vida media para las condiciones de diseño y con ello se tiene:

$$C = 5,00 \cdot 10^{-3} \frac{\text{in}}{\text{año}} \cdot 20 \text{ años} = 0,1 \text{ in} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

B.3.10.6. Factor Y.

El factor de diseño Y, depende tanto de la temperatura de diseño como del material utilizado. Toma un valor de 0,4 (Véase Anexo F: Tabla F.6).

B.3.10.7. Espesor de los tubos.

Si el espesor obtenido cumple las desigualdades que se indican a continuación, correspondientes a las ecuaciones [Ec.B.2.36] y [Ec.B.2.37], entonces habría que tener en cuenta consideraciones de factores especiales como de efectos de fatiga y tensión térmica.

$$t'_{tubo} = \frac{P_{dt} \cdot D_o}{2(S \cdot E + P_{dt} \cdot Y)}$$

$$t'_{tubo} > \frac{D_o}{6}$$

$$\frac{P_{dt}}{S \cdot E} > 0,385$$

Reemplazando valores resulta:

$$t'_{tubo} = 0,027 \text{ in}$$

Comprobando las desigualdades:

$$t'_{tubo} = 0,027 \text{ in} \not> \frac{D_o}{6} = \frac{1,25 \text{ in}}{6} = 0,21 \text{ in}$$

$$\frac{P_{dt}}{S \cdot E} = 0,045 \not> 0,385$$

De manera que no se considerarán otros factores adicionales, únicamente el factor de corrosión C:

$$t_{tubo} = t'_{tubo} + C$$

Sustituyendo datos se tiene:

$$t_{tubo} = 0,027 \text{ in} + 0,1 \text{ in} = 0,127 \text{ in}$$

El valor tabulado más próximo al espesor de tubo calculado, es de 0,134 in correspondiente a un calibre 10 BWG, coincidente con el calibre elegido y dimensiones utilizadas de tubos (Véase Anexo F: Tabla F.7).

B.3.10.8. Diámetro superior de carcasa.

Este tipo de intercambiador, no utiliza placas deflectoras para producir turbulencia en el fluido externo a los tubos, sino que el haz de tubos está sumergido casi en su totalidad en el líquido a calentar. Es por esta razón que presenta dos diámetros, uno inferior y uno superior, pues debe presentar un espacio adecuado de cúpula para la separación del vapor y el líquido.

La altura de esta cúpula (H_{Reb}) debe ser 0,10 m (4 in) mayor que el diámetro de carcasa inferior (D_s):

$$H_{Reb} = D_s + 4 \text{ in} = 48 \text{ in} + 4 \text{ in} = 52 \text{ in} = 1,32 \text{ m}$$

Y el diámetro superior (D_{Reb}) se define mediante la siguiente expresión en pulgadas:

$$D_{Reb} = 2,93 \cdot H_{Reb}^{0,788} = 2,93 \cdot 52 \text{ in}^{0,788} = 65,93 \text{ in} = 1,67 \text{ m}$$

El aislante que recubre al rehervidor se determina mediante el programa Insulan de la compañía CALORCOL de densidad $100 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ y de espesor comercial igual a 80 mm para las condiciones de temperatura en las que se encuentra.

B.3.10.9. Fondo de carcasa.

El fondo de carcasa se determina de la misma manera que el fondo de columna, pues se opera a las mismas condiciones. Es necesario por tanto, un fondo tipo Klopper.

La presión de diseño y temperatura de diseño se han definido anteriormente, y el diámetro de carcasa superior tiene un valor de 1,67 m con lo cual, mediante las ecuaciones [Ec.A.29], [Ec.A.30] y [Ec.A.31], se tiene respectivamente:

Radio mayor de fondo:

$$R_f = D_{Reb} = 1,67 \text{ m}$$

Radio menor de fondo:

$$r = \frac{D_{Reb}}{10} = 0,17 \text{ m}$$

Altura de fondo:

$$H = 0,2 \cdot D_{Reb} = 0,33 \text{ m}$$

El espesor del fondo se calcula mediante las ecuaciones [Ec.A.32] y [Ec.A.33] válidas para una relación $R_f/r=(1,67\text{m}/0,17\text{m})=10$ menor a 16 2/3:

$$t_{Fondo} = \frac{P_d \cdot R_f \cdot M}{2 \cdot S \cdot E - 0,2 \cdot P_d} T \quad [Ec. A. 32]$$

Dónde:

- P_d : Presión de diseño (psi). Definida en como 66,83 psi (4,55 atm).
- R_f : Radio mayor del fondo (in). Igual a 65,93 in (1,67 m).
- M : Factor que depende de la relación R_f/r .

Se calcula mediante la expresión siguiente:

$$M = \frac{1}{4} \cdot \left(3 + \sqrt{\frac{R_f}{r}} \right) \quad [Ec. A. 33]$$

$$M = 1,54$$

- S : Tensión máxima permisible (psi). Igual a 15.867 psi o 1.080 atm (Véase Anexo F: Tabla F.3a y Tabla F.3b.)
- E : Coeficiente de soldadura. Toma un valor de 0,85 (conforme al apartado UW-12) para una soldadura de doble cordón de uniones a tope y examinada por puntos o zonas (Véase Anexo F: Tabla F.4).

Sustituyendo datos se tiene:

$$t_{Fondo} = 0,252 \text{ in} = 6,4 \text{ mm}$$

B.3.10.10. Espesor de carcasa.

El cálculo del espesor de carcasa, se realiza de la misma forma que para la envolvente de la columna de destilación. Las ecuaciones [Ec.A.34], [Ec.A.35], el espesor requerido por los fondos y los espesores definidos por el código y el material, determinan el valor final.

Los datos de partida son los siguientes:

- Pd: Presión de diseño (psi). Igual a 66,83 psi.
- R: Radio de recipiente (in). Sabiendo que el diámetro mayor es igual a 1,67 m (62,69 in).
- S: Tensión máxima permisible.
- E: Coeficiente de soldadura.

$$t_{circ} = \frac{P_d \cdot R}{S \cdot E - 0,6 \cdot P_d} = 0,143 \text{ in}$$

$$t_{long} = \frac{P_d \cdot R}{2 \cdot S \cdot E + 0,4 \cdot P_d} = 0,071 \text{ in}$$

$$t_{ASME} = 0,198 \text{ in}$$

$$t_{Material} = 0,297 \text{ in}$$

El mayor valor de los cinco obtenidos es 0,297 in. A este espesor se debe añadir el debido a la corrosión, resultando un valor final de 0,397 in.

El espesor comercial más próximo es de 0,5 in o 13 mm.

El diámetro externo inferior alcanza 1,25 m y el diámetro externo superior 1,70m.

La longitud total del intercambiador alcanza 9,30 m según las dimensiones comerciales de este equipo [52].

B.3.11. Pérdida de carga.

B.3.11.1. Pérdida de carga en tubos.

La pérdida de carga (ΔP_{tubos}) producida en los tubos del intercambiador es debida a dos componentes, una que se da en el tramo recto de circulación del fluido ($\Delta P_{t\text{-recto}}$) y otra cuando el fluido cambia de dirección debido a la forma de las conducciones (ΔP_t).

$$\Delta P_{\text{tubos}} = \Delta P_{t\text{-recto}} + \Delta P_t$$

Los datos iniciales necesarios son tomados de la Tabla B.10 para el flujo interno vapor:

- Caudal másico del fluido $\dot{m}_F = 16.291,30 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$.
- Densidad del fluido $\rho_F = 25,92 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.
- Diámetro interno $D_i = 25\cdot 10^{-3} \text{ m}$ (0,08 ft).
- Longitud de tubo $L = 3,66 \text{ m}$ (12 ft).
- Número de pasos $n_p = 2$.
- Número de tubos $n^{\circ}\text{tubos} = 180$.

- **Pérdida de carga en tramo recto.**

Su determinación requiere de la velocidad másica del fluido (G_t) en $\text{lb}\cdot\text{ft}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, de ϕ_t que relaciona la viscosidad del fluido con la del agua en las mismas condiciones, así como de la gravedad específica del fluido (S_k) y del factor de fricción (f) según la ecuación siguiente, en psi:

$$\Delta P_{t\text{-recto}} = \frac{f \cdot G_t^2 \cdot L \cdot n_p}{7,5 \cdot 10^{12} \cdot D_i \cdot S_k \cdot \phi_t} \quad [\text{Ec. B. 3.5}]$$

Velocidad másica

La velocidad másica del fluido, el parámetro a_t se determinan mediante las ecuaciones empleadas en el cálculo del condensador [Ec.B.2.40] y [Ec.B.2.41]:

$$a_t = \frac{n^{\circ}\text{tubos} \cdot S_i}{n_p} = 0,044 \text{ m}^2 = 0,473 \text{ ft}^2$$

$$G_t = \frac{\dot{m}_t}{a_t} = 102,90 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}} = 75.874,70 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^2 \cdot \text{h}}$$

Viscosidad relativa

Al tratarse de vapor de agua, este coeficiente de viscosidad relativa es 1.

Gravedad específica

La gravedad específica del vapor de agua tiene un valor de 1.

Factor de fricción

Se determina mediante el número de Reynolds y el ábaco de Moody (Véase Anexo F: Figura F.3).

Se calcula el número de Reynolds:

$$Re = \frac{4 \cdot \dot{m}_F \cdot n_p}{\pi \cdot D_i \cdot \mu \cdot n^{\circ} tubos} = 1,42 \cdot 10^5$$

Si la rugosidad del acero comercial es de $4,60 \cdot 10^{-5}$, la rugosidad relativa toma un valor de 0,0018. En consecuencia el valor del factor f es $0,024 \text{ ft}^2 \cdot \text{ft}^{-2}$.

Pérdida de carga

Conociendo todos los valores de la ecuación [Ec.B.3.5], se prosigue a la determinación de la pérdida de carga de tramo recto:

$$\Delta P_{t-recto} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ psi}$$

- **Pérdida de carga en cambio de dirección**

El cálculo de la pérdida de carga en el cambio de dirección que realizan los tubos en U se define por la ecuación:

$$\Delta P_t = 1,334 \cdot 10^{-15} \cdot \frac{(2 \cdot n_p - 1,5) \cdot G_t^2}{S_k} \quad [Ec. B. 3.6]$$

Se sustituyen datos y se tiene:

$$\Delta P_t = 2 \cdot 10^{-5} \text{ psi}$$

Obteniendo como pérdida de carga total en tubos:

$$\Delta P_{tubos} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ psi} + 2 \cdot 10^{-5} \text{ psi} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ psi} = 4 \cdot 10^{-4} \text{ atm}$$

Dicho valor es menor al supuesto inicialmente de 0,07 atm. Por lo que damos como válidos los cálculos anteriores.

B.3.11.2. Pérdida de carga en la carcasa.

La pérdida de carga (ΔP_s) producida en la carcasa del intercambiador es solamente a un componente, debido a que se trata de un intercambiador 1-2, es decir, con un solo paso por carcasa. En caso de que tenga más pasos por carcasa, debe considerarse también la pérdida de carga debida al cambio de dirección del fluido. Para su determinación es necesario conocer los siguientes parámetros definidos al inicio:

Propiedades del fluido externo:

- Temperatura media: $T=249,54^{\circ}\text{C}$ ($481,16^{\circ}\text{F}$).
- Caudal másico $\dot{m}_{\text{fluido}}=273.099 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ ($167 \text{ lb}\cdot\text{s}^{-1}$).
- Densidad $\rho_{\text{fluido}}= 564,22 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ($115,56 \text{ lb}\cdot\text{ft}^{-3}$).
- Viscosidad $\mu_{\text{fluido}}=12,26\cdot 10^{-5} \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ($0,30 \text{ lb}\cdot\text{ft}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$).

Características de la carcasa y tubos en su interior:

- Diámetro interno tubos $D_i=25 \text{ mm}$ ($0,08 \text{ ft}$).
- Diámetro externo tubos $D_o=32\text{mm}$ ($0,10 \text{ ft}$).
- Diámetro inferior carcasa $D_s=1,22 \text{ m}$ (4 ft).
- Pitch de tubos $p'=79 \text{ mm}$ ($0,26 \text{ ft}$).
- Número de pasos carcasa $n_s=1$.
- Número de deflectores: $N_s=0$.
- Espaciamiento entre soportes: $E_s=0,9\cdot D_{si}=1,10 \text{ m}$ ($43,20 \text{ in}$)

Propiedades del agua a temperatura de $249,54^{\circ}\text{C}$ y presión de $2,61 \text{ atm}$ obtenidas mediante el simulador HYSYS:

- Densidad vapor de agua= $1,11 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$
- Viscosidad vapor de agua= $1,82\cdot 10^{-5} \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$

Mediante la siguiente ecuación [Ec.B.3.7] se conoce la pérdida de carga en la carcasa:

$$\Delta P_s = \frac{f \cdot G_s^2 \cdot D_s(N_s + 1)}{7,5 \cdot 10^{12} \cdot D_{eq} \cdot S_k \cdot \phi_s}$$

Dónde:

- G_s : Velocidad másica del fluido ($\text{lb}\cdot\text{ft}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$).
- D_{eq} : Diámetro equivalente de (ft).
- S_k : Gravedad específica del fluido.
- ϕ_s : Viscosidad relativa del fluido.

Velocidad másica del aire

Se calcula como de la misma manera que para la pérdida en tubos, pero tomando los datos del fluido exterior, el fondo de columna:

$$G_s = \frac{\dot{m}_{\text{Aire}}}{a_s}$$

Sin embargo, a_s se define de la siguiente forma:

$$a_s = \frac{C \cdot E_s \cdot D_s}{p'}$$

Siendo:

- C el aclaramiento de tubo que relaciona el pitch con el diámetro externo como sigue:

$$C = p' - D_o = 3,13 \text{ in} - 1,25 \text{ in} = 1,88 \text{ in}$$

Sustituyendo valores:

$$a_s = \frac{1,88 \text{ in} \cdot 43,20 \text{ in} \cdot 48 \text{ in}}{3,13 \text{ in}} = 1.244,16 \text{ in}^2 = 8,64 \text{ ft}^2$$

$$G_s = \frac{167 \frac{\text{lb}}{\text{s}}}{8,64 \text{ ft}^2} = 19,36 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^2 \cdot \text{s}} = 69.685 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^2 \cdot \text{h}}$$

Factor de fricción

Para determinar el factor de fricción es necesario conocer el valor del Reynolds así como el material.

Mediante una modificación (asociación de términos) en su ecuación, se tiene:

$$Re = \frac{D_{eq} \cdot G_s}{\mu_{\text{Aire}}}$$

Cuando el diámetro equivalente para una disposición triangular de tubos se define mediante:

$$D_{eq} = \frac{4 \left(\frac{1}{2} p' \cdot 0,86 p' - \frac{1}{2} \frac{\pi}{4} D_o^2 \right)}{\frac{1}{2} \pi D_o} = \frac{4 \left(\frac{1}{2} 3,13 \text{ in} \cdot 0,86 \cdot 3,13 \text{ in} - \frac{1}{2} \frac{\pi}{4} (1,25 \text{ in})^2 \right)}{\frac{1}{2} \pi \cdot 1,25 \text{ in}}$$

$$D_{eq} = 7,30 \text{ in} = 0,61 \text{ ft}$$

Por tanto,

$$Re = \frac{0,61 \text{ ft} \cdot 69.685 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^2 \cdot \text{h}}}{0,30 \frac{\text{lb}}{\text{ft} \cdot \text{h}}} = 1,43 \cdot 10^5$$

Y para el acero comercial y una rugosidad relativa de $4 \cdot 10^{-5}$ en el diagrama de Moody (Ver Anexo F: Figura F.3), el factor de fricción tienen un valor igual a $0,0145 \text{ ft}^2 \cdot \text{ft}^{-2}$.

Gravedad específica

Se relaciona la densidad del fluido externo y la del agua en las mismas condiciones de presión y temperatura, obteniendo un resultado igual a 509,75.

Viscosidad relativa

De igual manera se relaciona la viscosidad del fluido con la del agua para condiciones iguales de presión y temperatura, consiguiendo un valor de 6,75.

Pérdida de carga

Conociendo todos los datos necesarios se procede al cálculo de la pérdida de presión en la carcasa:

$$\Delta P_s = \frac{0,0145 \frac{\text{ft}^2}{\text{ft}^2} \cdot \left(69.685 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^2 \cdot \text{h}} \right)^2 \cdot 4 \text{ ft} (0 + 1)}{7,5 \cdot 10^{12} \cdot 0,61 \text{ ft} \cdot 509,75 \cdot 6,75} = 2 \cdot 10^{-8} \text{ psi} = 1 \cdot 10^{-9} \text{ atm}$$

Consiguiendo una pérdida de carga menor a la estipulada de 0,006 atm, con lo cual, los cálculos anteriores se consideran correctos.

ANEXO C: Sistema de tuberías.

C.1. Introducción.

El diseño de las líneas de conducción comprende el dimensionamiento de las tuberías y la determinación de accesorios necesarios. Adicionalmente se realiza la cuantificación de las pérdidas de carga producidas en ellas para luego definir las características de las bombas o sistemas de impulsión.

Se diferencian tres líneas de conducciones mediante las cuales se interconectan los equipos anteriormente definidos o diseñados, a través de las que fluye la alimentación de columna, o bien, las corrientes de producto obtenidas en el proceso de separación.

C.2. Definición de las líneas de conducciones.

- **LÍNEA 1:** Línea encargada de conducir el fluido desde fondos de la unidad de separación de ácido fluorhídrico (Columna HF) hacia la columna estudiada en el presente proyecto (Columna de recuperación de benceno: T-01) en forma de corriente de alimentación (F).
- **LÍNEA 2:** Línea encargada de conducir el producto de cabeza de columna de recuperación de benceno (T-01) tanto en forma de reflujo (L) hacia la misma columna, como en forma de producto recuperado (D) hacia la zona de reacción de la planta (Reactor de Alquilación).
- **LÍNEA 3:** Línea encargada de conducir el producto (L') de fondo de columna de recuperación de benceno (T-01) tanto hacia la misma columna (V'), como hacia la próxima (W) torre de separación (Columna de parafinas).

A su vez, estas líneas se encuentran divididas por conducciones:

LÍNEA 1: Línea 1: Columna HF-Columna Benceno

- Conducción 1: Conecta fondo de Columna de HF con bomba de impulsión (P-01 A/B).
- Conducción 2: Conecta bomba de impulsión (P-01 A/B) con columna de recuperación de benceno (T-01).

LÍNEA 2: Cabeza de columna vapor/líquido-Reactor Alquilación

- Conducción 3: Conecta cabeza de columna de recuperación de benceno (T-01) con condensador (AC-01).
- Conducción 4: Conecta condensador (AC-01) con acumulador de reflujo (TK-01).
- Conducción 5: Conecta acumulador de reflujo (TK-01) con bomba de impulsión (P-02 A/B).
- Conducción 6: Conecta bomba de impulsión (P-02 A/B) con cabeza de columna de recuperación de benceno (TK-01).
- Conducción 7: Conecta una bomba de impulsión con la unidad de reacción (Reactor de Alquilación) transportando el producto destilado (D).

LÍNEA 3: Fondo de columna líquido/vapor-Columna de parafinas

- Conducción 8: Conecta fondo de columna (T-01) con rehervidor (E-01).
- Conducción 9: Conecta rehervidor (E-01) con fondo de columna (T-01).
- Conducción 10: Conecta rehervidor (E-01) con Columna de Parafinas.

C.3. Caracterización de las corrientes.

La determinación de las tuberías requiere de parámetros iniciales como la velocidad a la que debe transportarse el fluido dependiendo de su procedencia y destino, así como el caudal volumétrico que porta, los cuales se obtienen mediante la Tabla C.1 y C.2:

Tabla C. 1. Características de las corrientes de tuberías*.

Corriente	T	P	ρ	μ	PM	Q
F	172,28	2,47	652,00	$27,38 \cdot 10^{-5}$	150,54	1464
V	113,51	2,43	6,36	$0,94 \cdot 10^{-5}$	78,22	519
L+D	106,03	2,09	779,55	$23,91 \cdot 10^{-5}$	78,22	519
L	106,03	2,09	779,55	$23,91 \cdot 10^{-5}$	78,22	179
D	106,03	2,09	779,55	$23,91 \cdot 10^{-5}$	78,22	341
L'	245,86	2,61	561,33	$15,97 \cdot 10^{-5}$	166,09	1.643
V'	253,21	2,61	10,92	$0,79 \cdot 10^{-5}$	160,39	519
W	253,21	2,61	564,33	$16,29 \cdot 10^{-5}$	172,46	1.123

(*) T se encuentra en °C, P en atm, ρ en $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$, μ en $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$, PM en $\text{kg}\cdot\text{kmol}^{-1}$ y Q en $\text{kmol}\cdot\text{h}^{-1}$.

Tabla C. 2. Velocidad de fluidos en tuberías [13].

Fluido	Tipo de flujo	Velocidad ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
Líquidos poco viscosos	Flujo por gravedad	0,15-0,30
	Entrada de bomba	0,30-0,90
	Salida de bomba	1,20-3,00
	Línea de conducción	1,20-2,40
Líquidos viscosos	Entrada de bomba	0,06-0,15
	Salida de bomba	0,15-0,60
Vapor de agua		9,00-15,00
Aire o gas		9,00-30,00

Con ayuda de la Tabla C.3, se puede relacionar fácilmente los tramos necesarios de tuberías. Las unidades que tengan en común una corriente de flujo son conectadas mediante una conducción de acero SA-106 B, que según las condiciones de operación en cada una de éstas y el fluido que transporten, requieren de un determinado diámetro interno. Por otra parte, es necesario mencionar que las líneas divididas en dos o más conducciones utilizan equipos de impulsión, o bombas, para trasladar el fluido de un punto a otro.

Tabla C. 3. Relación de equipos y corrientes.

Unidad	Corriente de entrada asociada	Corriente de salida asociada
Columna HF	-	F
Columna de benceno	F	V
	F	L'
	L	V
	V'	L'
Condensador	V	L+D
Acumulador reflujo	L+D	L
	L+D	D
Reactor Alquilación	D	-
Rehervidor	L'	V'
	L'	W
Columna de parafinas	W	-

C.4. Diseño de conducciones.

C.4.1. Diámetro interno.

Línea 1. Conducción 1:

La conducción 1 une la corriente de salida del proceso de separación de ácido fluorhídrico con la de entrada a la bomba (P-01 A/B) transportando la corriente de alimentación (F), por consiguiente, la velocidad en la conducción según la Tabla C.2 debe ser aproximadamente de $0,70 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

El caudal volumétrico se determina empleando la Tabla C.1 y la siguiente expresión que relaciona el caudal volumétrico (Q_V) con el caudal molar (Q_m), el peso molecular del fluido (PM) y la densidad del fluido (ρ):

$$Q_V = \frac{Q_m \cdot PM}{\rho}$$

$$Q_V = \frac{1.464 \frac{\text{kmol}}{\text{h}} \cdot 150,54 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}}{652,00 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 337,96 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} = 0,094 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Sin embargo, al alcanzar un caudal tan elevado, se procede a dividirlo en dos corrientes iguales para facilitar su impulsión mediante bombas en paralelo. Con lo cual, resulta:

$$Q_{V1,1'} = \frac{337,96 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}}{2} = 168,98 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} = 0,047 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

A su vez, el caudal volumétrico expresa el vínculo entre la sección transversal de la conducción (S_i) y la velocidad portada por el fluido (v_F), con lo cual, puede determinarse la sección requerida:

$$Q_V = S_i \cdot v_F$$

$$S_i = \frac{Q_V}{v_F} = \frac{0,05 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{0,70 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 0,067 \text{ m}^2$$

Considerando que la conducción describe una forma cilíndrica, el diámetro interno solicitado (D_i') se define mediante:

$$S_i = \frac{\pi \cdot D_i'^2}{4}$$

$$D_i' = \sqrt{S_i \cdot \frac{4}{\pi}} = \sqrt{0,07 \text{ m}^2 \cdot \frac{4}{\pi}} = 0,292 \text{ m} = 292 \text{ mm} = 11,50 \text{ in}$$

El diámetro externo correspondiente al valor obtenido de diámetro interno según datos tabulados (Véase Anexo F: Tabla F.10), adquiere un valor de $Do'=12,75 \text{ in}$ (0,324 m).

C.4.2. Espesor de tubería.

La determinación del espesor requerido ($t'_{\text{tubería}}$) según el material acero al carbono SA-106 B, solicita las condiciones de diseño, las cuales se definen al igual que en apartados anteriores. Se calcula mediante la fórmula [Ec.C.1]. Si el espesor obtenido cumple las desigualdades [Ec.C.2] y [Ec.C.3], entonces habría que tener en cuenta consideraciones de factores especiales como de efectos de fatiga y tensión térmica.

$$t'_{\text{tubería}} = \frac{P_{dt} \cdot D_o'}{2(S \cdot E + P_{dt} \cdot Y)} \quad [\text{Ec. C. 1}]$$

$$t'_{\text{tubería}} > \frac{D_o'}{6} \quad [\text{Ec. C. 2}]$$

$$\frac{P_{dt}}{S \cdot E} > 0,385 \quad [\text{Ec. C. 3}]$$

Dónde:

- P_{dt} : Presión de diseño (psi).
- Do' : Diámetro exterior requerido de tubería (in).
- S : Tensión máxima admisible (psi).
- E : Eficiencia de soldadura.
- Y : Factor de diseño.

C.4.2.1. Presión de diseño

La presión indicada para este tramo tiene un valor igual a 2,47 atm (2,55 $\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2}$). Se tiene por tanto:

$$P_{d,1} = 1,1 \cdot P = 1,1 \cdot 2,55 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} = 2,80 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$P_{d,2} = P + 2 \frac{kg}{cm^2} = 2,55 \frac{kg}{cm^2} + 2 \frac{kg}{cm^2} = 4,55 \frac{kg}{cm^2}$$

$$P_{d,3} = 3,5 \frac{kg}{cm^2}$$

Dónde:

- Pd,1: Presión máxima de operación con un aumento del 10% ($kg \cdot cm^{-2}$).
- Pd,2: Presión máxima de diseño con un incremento de 2 $kg \cdot cm^{-2}$ ($kg \cdot cm^{-2}$).
- Pd,3: Presión establecida como referencia por el código 3,5 $kg \cdot cm^{-2}$.

Entonces, como presión de diseño se fija 4,55 $kg \cdot cm^{-2}$ (4,40 atm ó 64,71 psi).

C.4.2.2. Temperatura de diseño

En cuanto a la temperatura, deben añadirse 20°C a la temperatura máxima alcanzada por la corriente implicada con un valor de 172,28 °C. Por consiguiente, la temperatura de diseño es 192,28 °C (465,43 K ó 378,10°F).

C.4.2.3. Máxima tensión admisible

La tensión máxima permisible (S) depende tanto de la temperatura de diseño como del material de construcción. Se define como máxima tensión permisible 20.000 psi o 1.361 atm (Véase Anexo F: Tabla F.3.c y F.3d) para una temperatura de 378,10 °F y acero SA-106 B.

C.4.2.4. Eficiencia de soldadura

El coeficiente de soldadura (E) toma un valor de 1 para tuberías sin soldadura correspondiente a la temperatura de diseño y material utilizado (Véase Anexo F: Tabla F.5).

C.4.2.5. Factor de corrosión

En la determinación de este factor (C) debe tenerse en cuenta que la velocidad de corrosión es de $5,00 \cdot 10^{-3}$ pulgadas por año, como que el tiempo de

vida para tuberías se considera entre 15 y 20 años. Es por esta razón, que se considerarán 17 años de tiempo de vida media para las condiciones de diseño y con ello se tiene:

$$C = 5,00 \cdot 10^{-3} \frac{\text{in}}{\text{año}} \cdot 17 \text{ años} = 0,085 \text{ in} = 2 \text{ mm}$$

C.4.2.6. Factor Y

El factor de diseño Y, depende tanto de la temperatura de diseño como del material utilizado. Toma un valor de 0,4 (Véase Anexo F: Tabla F.6).

C.4.2.7. Espesor

Reemplazando valores en [Ec.C.1] se tiene:

$$t'_{\text{tubería}} = \frac{64,71 \text{ psi} \cdot 12,75 \text{ in}}{2(20.000 \text{ psi} \cdot 1 + 64,71 \text{ psi} \cdot 0,4)} = 0,021 \text{ in} = 0,52 \text{ mm}$$

Comprobando las desigualdades [Ec.C.2] y [Ec.C.3]:

$$t'_{\text{tubería}} = 0,021 \text{ in} \not\geq \frac{D_o'}{6} = \frac{12,75 \text{ in}}{6} = 2,13 \text{ in}$$

$$\frac{P_{dt}}{S \cdot E} = \frac{64,71 \text{ psi}}{20.000 \text{ psi} \cdot 1} = 0,003 \not\geq 0,385$$

Todas las dimensiones de las tuberías de las conducciones son calculadas de la misma forma, es por eso, que solamente se presenta un resumen de los resultados, en las siguientes 4 tablas, divididas por líneas. Cabe destacar, que el caudal es únicamente dividido en la Conducción 1 y Conducción 2, al tratar con el caudal elevado de alimentación, en ninguna otra conducción es necesario este paso.

• **LÍNEA 1: Columna HF-Columna Benceno.**

Conducción	1 y 1'	2 y 2'
Presión de diseño (atm)	4,40	4,40
Temperatura de diseño (°C)	192,28	192,28
Caudal volumétrico (m ³ ·s ⁻¹)	0,047	0,047
Velocidad requerida (m·s ⁻¹)	0,70	1,00
Diámetro interno requerido (mm)	292	244
Máxima tensión admisible (atm)	1.361	1.361
Eficiencia soldadura	1	1
Factor Y	0,40	0,40
Factor de corrosión (mm)	2	2
Espesor requerido (mm)	0,52	0,44
Cumple desigualdad [Ec.C2 o C3]	NO	NO

• **LÍNEA 2: Cabeza de columna vapor/líquido-Reactor Alquilación.**

Conducción	3	4	5
Presión de diseño (atm)	4,37	4,03	4,03
Temperatura de diseño (°C)	133,51	126,03	126,03
Caudal volumétrico (m ³ ·s ⁻¹)	1,774	0,014	0,005
Velocidad requerida (m·s ⁻¹)	20,00	2,00	0,70
Diámetro interno requerido (mm)	336	96	95
Máxima tensión admisible (atm)	1.361	1.361	1.361
Eficiencia soldadura	1	1	1
Factor Y	0,40	0,40	0,40
Factor de corrosión (mm)	2	2	2
Espesor requerido (mm)	0,57	0,15	0,17
Cumple desigualdad [Ec.C2 o C3]	NO	NO	NO

• **LÍNEA 2: Cabeza de columna vapor/líquido-Reactor Alquilación (Continuación).**

Conducción	6	7
Presión de diseño (atm)	4,03	4,03
Temperatura de diseño (°C)	126,03	126,03
Caudal volumétrico (m ³ ·s ⁻¹)	0,005	0,009
Velocidad requerida (m·s ⁻¹)	2,00	2,00
Diámetro interno requerido (mm)	56	78
Máxima tensión admisible (atm)	1.361	1.361
Eficiencia soldadura	1	1
Factor Y	0,40	0,40
Factor de corrosión (mm)	2	2
Espesor requerido (mm)	0,11	0,13
Cumple desigualdad [Ec.C2 o C3]	NO	NO

• **LÍNEA 3: Fondo de columna líquido/vapor-Columna de parafinas.**

TRAMO	8	9	10
Presión de diseño (atm)	4,54	4,55	4,55
Temperatura de diseño (°C)	265,86	273,21	273,21
Caudal volumétrico (m ³ ·s ⁻¹)	0,135	2,119	0,095
Velocidad requerida (m·s ⁻¹)	2,00	20,00	0,70
Diámetro interno requerido (mm)	293	367	416
Máxima tensión admisible (atm)	1.361	1.361	1.361
Eficiencia soldadura	1	1	1
Factor Y	0,40	0,40	0,40
Factor de corrosión (mm)	2	2	2
Espesor requerido (mm)	0,68	1,02	0,76
Cumple desigualdad [Ec.C2 o C3]	NO	NO	NO

C.4.2.8. Dimensiones

Al no cumplirse ni la desigualdad [Ec.C.2] ni la [Ec.C.3], no se considerarán otros factores adicionales en el diseño, únicamente el factor de corrosión C:

$$t_{tubería} = t'_{tubería} + C$$

Sustituyendo datos para la Conducción 1 se tiene:

$$t_{tubo} = 0,021 \text{ in} + 0,085 \text{ in} = 0,106 \text{ in} = 2,68 \text{ mm}$$

El valor tabulado más próximo al diámetro interno calculado es de 11,626 in (295 mm) con un espesor de 0,562 in (14 mm) correspondientes a un diámetro externo de 12,75 in (324 mm) de Schedule 60 y diámetro nominal 12 in (305 mm).

Se procede a verificar la velocidad real ($v_{real,F}$) a la que el fluido es transportado por la tubería, ésta no debe ser muy diferente o mayor a la requerida, pues al ser mayor expresa que el diámetro interno seleccionado (D_i) es pequeño y debe escogerse uno mayor.

$$v_{real,F} = \frac{Q_V}{\pi \cdot \frac{D_i^2}{4}}$$

$$v_{real,F} = \frac{0,047 \frac{m^3}{s}}{\pi \cdot \frac{(295 \cdot 10^{-3} m)^2}{4}} = 0,69 \frac{m}{s}$$

Velocidad que al ser menor y muy similar a la velocidad supuesta, $v=0,70 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, valida los cálculos anteriormente realizados.

Presentando a forma de resumen los resultados de cada conducción en la Tabla C.4, C.5 y C.6, siguiendo los mismos pasos que los realizados en la determinación de las dimensiones para la Conducción 1:

Tabla C. 4. Dimensiones tuberías Línea 1.

Conducción		1 y 1'	2 y 2'
Diámetro nominal	(mm)	305	254
	(in)	12	10
Diámetro interno	(mm)	295	248
	(in)	11,626	9,750
Diámetro externo	(mm)	324	273
	(in)	12,750	10,750
Espesor	(mm)	14	13
	(in)	0,562	0,500
Velocidad real	($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	0,69	0,97

Tabla C. 5. Dimensiones tuberías Línea 2.

Conducción		3	4	5	6	7
Diámetro nominal	(mm)	356	102	102	64	76
	(in)	14	4	4	2 ½	3
Diámetro interno	(mm)	346	97	102	59	78
	(in)	13,624	3,826	4,026	2,323	3,068
Diámetro externo	(mm)	356	114	114	73	89
	(in)	14,000	4,500	4,500	2,875	3,500
Espesor	(mm)	5	9	6	7	5
	(in)	0,188	0,337	0,237	0,276	0,216
Velocidad real	($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	19,69	2,00	0,65	1,95	1,99

Tabla C. 6. Dimensiones tuberías Línea 3.

Conducción		8	9	10
Diámetro nominal	(mm)	305	406	457
	(in)	12	16	18
Diámetro interno	(mm)	295	373	491
	(in)	11,626	14,688	16,500
Diámetro externo	(mm)	324	406	457
	(in)	12,750	16,000	18
Espesor	(mm)	14	17	19
	(in)	0,562	0,656	0,750
Velocidad real	(m·s ⁻¹)	1,97	19,38	0,69

C.4.2.9. Aislante.

El aislante empleado en las tuberías es de lana de roca, el espesor óptimo ha sido calculado mediante el programa Insulan de la compañía CALORCOL [25] para las condiciones de operación de cada conducción. Los resultados se muestran en la tabla siguiente:

Línea 1: Torre HF-Columna Benceno.

Tabla C. 7. Aislante Línea 1.

Conducción	1 y 1'	2 y 2'
Diámetro externo (mm)	324	273
Espesor aislante (mm)	80	80

LÍNEA 2: Cabeza de columna vapor/líquido-Reactor de Alquilación.

Tabla C. 8. Aislante Línea 2.

Conducción	3	4	5	6	7
Diámetro externo (mm)	356	114	114	73	89
Espesor aislante (mm)	80	30	30	30	30

LÍNEA 3: Fondo de columna líquido/vapor-Torre de parafinas.

Tabla C. 9. Aislante Línea 3.

Conducción	8	9	10
Diámetro externo (mm)	324	406	457
Espesor aislante (mm)	80	100	80

C.4.2.10. Pérdida de carga en tubería.

La pérdida de carga hidráulica (ΔP_{tub}) debida a la fricción a lo largo de una tubería, producida por la velocidad a la que es transportado el fluido, se determina mediante la ecuación empírica de Darcy-Weisbach:

$$h_f = f \cdot \frac{L_T}{D_i} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad [\text{Ec. C. 4}]$$

Dónde:

- h_f : Pérdida de carga (m).
- f : Factor de fricción.
- D_i : Diámetro interior de tubería (m).
- L_T : Longitud total de tubería (m). Incluye longitud de la tubería recta y accesorios.
- v : Velocidad del fluido ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$).
- g : Aceleración de la gravedad ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$). Con valor igual a $9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$.

Factor de fricción.

Para determinar el valor del factor de fricción (f) es necesario conocer el régimen de flujo en la tubería, por lo que en primer lugar, se realiza el cálculo del número de Reynolds (Re) conocidos todos los parámetros necesarios como son la velocidad del fluido real (v), la densidad de éste (ρ) y su viscosidad (μ), así como el diámetro interno obtenido (D_i) que se encuentran en las tablas anteriores Tabla C1, C4, C5 y C6, para las distintas conducciones.

Para la **Conducción 1**:

$$Re = \frac{v \cdot \rho \cdot D_i}{\mu}$$

$$Re = \frac{0,69 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 652 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 295 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{27,38 \cdot 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}} = 4,82 \cdot 10^5$$

Para el acero comercial la rugosidad tiene un valor de $4,60 \cdot 10^{-5}$ m, tomando en cuenta que el diámetro interno para éste tramo es de 295 mm, la rugosidad relativa es $\epsilon/D=0,00016$.

Con ayuda del diagrama de Moody (Véase Anexo F: Figura F.3), al situar el valor del Re que al ser mayor de 2.000 se tiene un régimen turbulento de fluido, y de la rugosidad relativa presente en éste, el factor de fricción obtenido es $f= 0,0143$.

Longitud total de tubería.

La longitud total toma en cuenta tanto la distancia que debe recorrer el fluido desde el punto de partida hasta el punto de destino, como los distintos accesorios que deben acoplarse para un correcto transporte y control del fluido.

Para la conducción 1, la longitud que debe recorrer el fluido en la planta tiene un valor de 10 m.

Los accesorios necesarios son: 1 codo de 90°, 1 reducción, 1 tes y 1 válvula de compuerta.

Cada accesorio produce una pérdida de carga secundaria que se calcula mediante una longitud equivalente a una distancia de tramo recto de tubería (Véase Anexo F: Tabla F.11).

Resultando para un diámetro de tubería de 11,626 in una longitud equivalente a 1 codo de 90° de 7,34 m, 1 reducción de 5,32 m, 1 tes de 15,91 m y 1 válvula de compuerta de 2,08 m.

Por tanto, la longitud total es la suma de las longitudes consideradas:

$$L_T = L_{\text{Conducción}} + L_{eq}$$

$$L_T = 10 \text{ m} + (7,34\text{m} + 5,32\text{m} + 15,91\text{m} + 2,08\text{m}) = 10\text{m} + 30,64\text{m} = 44,64 \text{ m}$$

Los accesorios utilizados en cada tramo se resumen en las siguientes tablas, en la cual se muestra la cantidad de cada uno (u: unidades) y la longitud equivalente:

• **LÍNEA 1: Columna HF-Columna Benceno.**

	Cond. 1 y 1'	Cond. 2 y 2'
ACCESORIOS	u.	u.
Codo de 90°	1	5
Reducciones	1	1
Tes	1	1
Válvula de compuerta	1	0
Válvula de globo	0	1
Válvula de retención	0	1
Longitud equivalente (m)	30,64	155,22

• **LÍNEA 2: Cabeza de columna vapor/líquido-Reactor Alquilación.**

	Cond. 3	Cond. 4	Cond. 5	Cond. 6	Cond. 7
ACCESORIOS	u.	u.	u.	u.	u.
Codo de 90°	6	6	4	5	0
Reducciones	0	0	1	1	0
Tes	0	0	1	1	0
Válvula de compuerta	0	0	1	0	0
Válvula de globo	0	0	0	1	1
Válvula de retención	0	1	0	1	1
Longitud equivalente (m)	54,97	24,28	20,89	37,52	33,67

• **LÍNEA 3: Fondo de columna líquido/vapor-Columna de parafinas.**

	Cond.8	Cond.9	Cond.10
ACCESORIOS	u.	u.	u.
Codo de 90°	6	6	3
Reducciones	1	1	0
Tes	0	0	0
Válvula de compuerta	0	0	0
Válvula de globo	1	0	0
Válvula de retención	0	0	0
Longitud equivalente (m)	165,98	65,92	33,15

Pérdida de carga

Al reemplazar los datos obtenidos en la ecuación [Ec.C.4] para la **Conducción 1**, se tiene:

$$h_f = 0,0143 \cdot \frac{40,64 \text{ m}}{295 \cdot 10^{-3} \text{ m}} \cdot \frac{\left(0,69 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2 \cdot 9,81 \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 0,05 \text{ m}$$

Se realiza cada paso igual para cada tramo de tubería, presentando como resumen de resultados las siguientes tablas:

- **LÍNEA 1: Columna HF-Columna Benceno.**

TRAMO	1 y 1'	2 y 2'
Velocidad real (m·s ⁻¹)	0,69	0,97
Diámetro interno (m)	0,295	0,248
Reynolds	4,82·10 ⁵	5,75·10 ⁵
Rugosidad relativa	1,6·10 ⁻⁴	1,9·10 ⁻⁴
Factor de fricción	0,0143	0,0145
Longitud conducto (m)	10	53
Pérdida de carga (m)	0,05	0,59

- **LÍNEA 2: Cabeza de columna vapor/líquido-Reactor Alquilación.**

TRAMO	3	4	5	6	7
Velocidad Real (m·s ⁻¹)	18,86	1,95	0,61	1,82	1,99
Diámetro interno (m)	0,346	0,097	0,102	0,059	0,078
Reynolds	4,44·10 ⁶	6,18·10 ⁵	2,02·10 ⁵	3,51·10 ⁵	5,06·10 ⁵
Rugosidad relativa	1,3·10 ⁻⁴	4,7·10 ⁻⁴	4,5·10 ⁻⁴	7,8·10 ⁻⁴	5,9·10 ⁻⁴
Factor de fricción	0,013	0,0176	0,0185	0,0195	0,0182
Longitud conducto (m)	50	57	43	68	83
Pérdida de carga (m)	77,50	2,86	0,22	5,91	5,50

- **LÍNEA 3: Fondo de columna líquido/vapor-Columna de parafinas.**

TRAMO	8	9	10
Velocidad real (m·s ⁻¹)	1,97	19,38	0,69
Diámetro interno (m)	0,295	0,373	0,419
Reynolds	2,05·10 ⁶	1,00·10 ⁷	1,00·10 ⁶
Rugosidad relativa	1,6·10 ⁻⁴	1,2·10 ⁻⁴	1,1·10 ⁻⁴
Factor de fricción	0,0138	0,0125	0,0146
Longitud conducto (m)	34	34	30
Pérdida de carga (m)	1,85	64,10	0,05

ANEXO D: Diseño del sistema de impulsión.

D.1. Introducción.

En el diseño del sistema de impulsión se definen las características de los equipos encargados de suministrar la energía mecánica requerida por una corriente fluida para transportarla de un punto a otro de la planta.

Los equipos utilizados serán bombas de impulsión debido a que los fluidos que se quieren transportar se encuentran en fase líquida.

D.2. Localización en planta.

El esquema de la Memoria Figura 1.8 del capítulo de introducción, indica la localización de las bombas utilizadas en forma de figuras.

A continuación se describe el mismo esquema mediante una tabla, en la que se indica la bomba, el fluido que transporta, el origen y el destino de impulsión con las respectivas conducciones asociadas.

Tabla D. 1. Sistema de impulsión.

Bomba	Origen	Destino	Fluido
P-01 A/B	Columna HF	Columna de benceno (T-01)	Alimentación (F)
	Conducción 1	Conducción 2	
P-02 A/B	Acumulador reflujo (TK-01)	Columna de benceno (T-01)	Reflujo (L)
	Conducción 5	Conducción 6	

D.3. Selección del tipo de bomba.

La elección del tipo de bomba, viene dado por las características del fluido que debe trasladar y la altura que debe alcanzar [29].

Es por esta razón que se definen parámetros importantes para la selección: Propiedades del fluido y caudal volumétrico, carga útil, la potencia requerida por la bomba y la altura neta positiva de succión disponible. Mediante los cuales y la siguiente figura, se puede definir el tipo de bomba a utilizar.

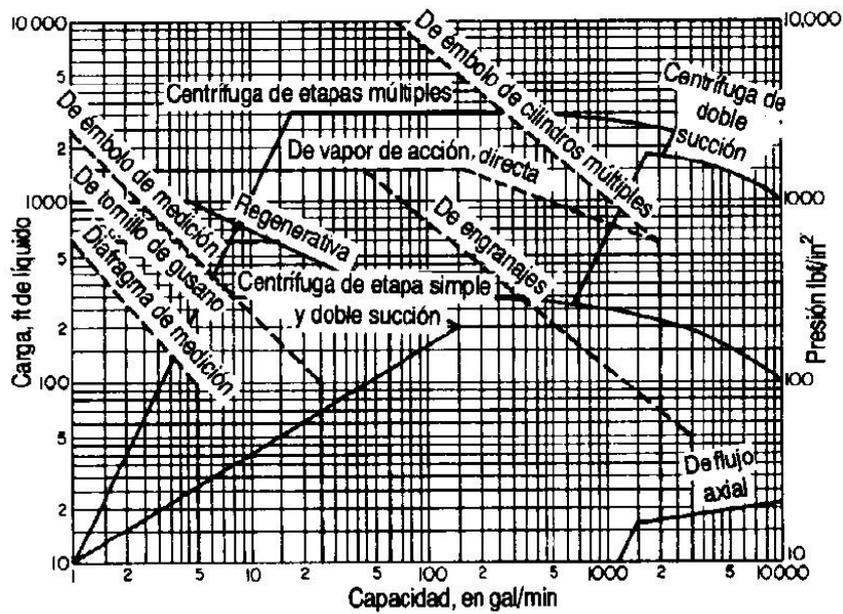


Figura D. 1. Gráfica de los alcances de las bombas en rangos de funcionamiento, para los tipos comerciales [14].

D.4. Parámetros característicos.

Como paso previo se definen las corrientes para poder determinar la carga efectiva de la bomba, así como para la altura neta positiva de succión disponible.

D.4.1. Caracterización de las corrientes.

Tabla D. 2. Características de las corrientes del sistema de impulsión.

Bomba	Origen			Destino			Fluido			
	P ₁	V ₁	z ₁	P ₂	V ₂	z ₂	ρ	hf	Pv	Q
P-01* A/B	2,47	0,69	0,20	2,47	0,97	28,94	652,00	0,64	2,35	0,047
P-02 A/B	2,09	0,61	0,40	2,09	1,82	32,62	779,55	8,98	2,17	0,005

(*) Esta bomba está conectada a otra idéntica en paralelo con la finalidad de transportar todo el caudal de alimentación.

Las unidades que utiliza la tabla son:

Presión (P): atm; Velocidad (V): m·s⁻¹; Altura (z): m; Densidad (ρ): kg·m⁻³; Pérdida de carga (hf): m; Presión de vapor (Pv): atm; Caudal volumétrico del fluido (Q): m³·s⁻¹.

D.4.2. Altura efectiva.

Mediante la Tabla D.2 y la ecuación de Bernoulli [Ec.D.1] teniendo en cuenta las pérdidas de carga, se determina la altura efectiva de la bomba, es decir, la presión efectiva o carga total que debe aportar el equipo para vencer la resistencia de flujo, los desniveles en la localización y recorrido, y las presiones que éstos portan.

$$H = \frac{P_2 - P_1}{\rho \cdot g} + (z_2 - z_1) + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2 \cdot g} + h_f \quad [Ec. D. 1]$$

Ecuación que en la que el subíndice 1 indica el punto de aspiración de la bomba y 2, el punto de descarga de la misma. H es la altura efectiva de la bomba (m), g es la aceleración de la gravedad (9,81 m·s⁻²) y hf la pérdida de carga (m) producida en las conducciones desde el punto de succión o aspiración hasta el punto de descarga.

BOMBA 1 (P-01 A/B): Punto de aspiración es la salida de Columna HF y el punto de descarga el plato de alimentación, nº 7 que se encuentra a una altura de 28,94 m sobre el suelo.

BOMBA 2 (P-02 A/B): Punto de aspiración es el acumulador de reflujo y el punto de descarga la cabeza de columna, o 1º plato, a una altura de 32,62 m sobre el nivel del suelo.

Al aplicar la ecuación con los parámetros de cada bomba se tiene:

$$H_{P-01} = \frac{(2,47atm - 2,47atm) \cdot \frac{1,01^5 Pa}{1 atm}}{652 \frac{kg}{m^3} \cdot 9,81 \frac{m}{s^2}} + (28,94 m - 0,20 m) + \frac{\left(0,97 \frac{m}{s}\right)^2 - \left(0,69 \frac{m}{s}\right)^2}{2 \cdot 9,81 \frac{m}{s^2}} + 0,64 m = 29,40 m = 96,46 ft$$

$$H_{P-02} = \frac{(2,09atm - 2,09atm) \cdot \frac{1,01^5 Pa}{1 atm}}{779,55 \frac{kg}{m^3} \cdot 9,81 \frac{m}{s^2}} + (32,62 m - 0,40 m) + \frac{\left(1,82 \frac{m}{s}\right)^2 - \left(0,61 \frac{m}{s}\right)^2}{2 \cdot 9,81 \frac{m}{s^2}} + 8,98 m = 41,36 m = 135,69 ft$$

D.4.3. Potencia.

La potencia de la bomba se calcula a partir de la ecuación siguiente:

$$W = Q \cdot H \cdot \rho \cdot g \quad [Ec. D.2]$$

Dónde:

- W: Potencia de la bomba (W).
- Q: Caudal volumétrico del fluido ($m^3 \cdot s^{-1}$).
- H: Altura efectiva (m).
- ρ : Densidad del fluido ($kg \cdot m^{-3}$).
- g: Aceleración de la gravedad ($m \cdot s^{-2}$). Igual a $9,81 m \cdot s^{-2}$.

Reemplazando valores para ambas bombas:

$$W_{P-01} = 0,047 \frac{m^3}{s} \cdot 29,40 m \cdot 652 \frac{kg}{m^3} \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} = 8.826,91 W = 12,00 CV$$

$$W_{P-01} = 0,005 \frac{m^3}{s} \cdot 41,36 m \cdot 779,55 \frac{kg}{m^3} \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} = 1.576,58 W = 2,14 CV$$

D.4.4. Altura neta positiva de succión.

El cálculo de la altura neta positiva de succión disponible o $NPSH_d$ (Net Positive Suction Head) es realizado con el propósito de comprobar el correcto funcionamiento del equipo de impulsión.

El resultado debe tener un valor mayor al de la altura neta positiva de succión requerida por el equipo, así se evitan problemas de cavitación y el consecuente deterioro de la bomba. La expresión que determina el $NPSH$ disponible es la siguiente:

$$NPSH_d = \frac{P_a - P_v}{\rho \cdot g} + \frac{v_a^2}{2 \cdot g} - h_{f,a} + (z_a - z_b) \quad [Ec.D.3]$$

Debiendo cumplir la siguiente desigualdad:

$$NPSH_d > NPSH_r$$

Dónde:

- P_a : Presión de aspiración de la bomba (Pa).
- P_v : Presión de vapor del fluido (Pa). Se calcula mediante las presiones de vapor de cada componente presente en la corriente a la temperatura a la que es transportado el fluido, multiplicado por la fracción molar o composición en dicha corriente (X_F o X_D). Los coeficientes para determinar la presión de vapor de cada componente han sido obtenidos mediante el simulador HYSYS.

Tabla D. 3. Factores del cálculo de la presión de vapor.

Comp.	HF	C6H6	C-10	C-11	C-12	C-13	C-14
A	45,4	169,7	123,1	121,2	125,2	14,1	143,6
B	-3.945	-10.314	-10.635	-11.079	-11.737	-3.892	-13.893
C	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-98,9	0,0
D	-5,0	-23,6	-15,8	-15,4	-15,9	0,0	-18,3
E	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
F	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
X_F	0,001	0,231	0,110	0,218	0,202	0,160	0,003
X_D	0,003	0,992	0,005	-	-	-	-
Comp.	n-Decil-Bz	n-Undecil-Bz	n-Dodecil-Bz	n-Tridecil-Bz	n-Tetradecil-Bz	Alquilato pesado	
A	95,5	100,8	107,0	114,0	118,9	106,8	
B	-12.904	-13.699	-14.583	-15.561	-16.305	-15.323	
C	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
D	-10,8	-11,4	-12,2	-13,1	-13,7	-12,1	
E	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
F	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	
X_F	0,010	0,025	0,022	0,015	0,003	0,001	
X_D	-	-	-	-	-	-	

Siguiendo la expresión:

$$\ln P_v(\text{kPa}) = A + \frac{B}{T(\text{K}) + C} + D \cdot \ln T(\text{K}) + E \cdot T(\text{K})^F$$

Temperatura del fluido para la Bomba 1 (P-01 A/B): 172,28°C (445,43K); y para la Bomba 2 (P-02 A/B): 106,03°C (379,18K).

- v_a : Velocidad de aspiración de la bomba ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
- z_a : Altura de aspiración (m).
- z_b : Altura en la entrada de la bomba (m).
- $H_{f,a}$: Pérdida de carga en el tramo de aspiración (m)
- NPSHd: Altura neta positiva de succión, disponible (m).
- NPSHr: Altura neta positiva de succión, requerida (m).

Sustituyendo datos para ambas bombas:

$$NPSH_{d,P-01} = \frac{2,47atm \cdot \frac{1,01^5 Pa}{1atm} - 2,35atm \frac{1,01^5 Pa}{1atm}}{652 \frac{kg}{m^3} \cdot 9,81 \frac{m}{s^2}} + \frac{\left(0,69 \frac{m}{s}\right)^2}{2 \cdot 9,81 \frac{m}{s^2}} - 0,05 m$$

$$+ (0,20 - 0,40)$$

$$NPSH_{d,P-01} = 1,75 m = 5,74 ft$$

$$NPSH_{d,P-02} = \frac{2,09atm \cdot \frac{1,01^5 Pa}{1atm} - 2,17atm \frac{1,01^5 Pa}{1atm}}{779,55 \frac{kg}{m^3} \cdot 9,81 \frac{m}{s^2}} + \frac{\left(0,61 \frac{m}{s}\right)^2}{2 \cdot 9,81 \frac{m}{s^2}} - 3,08 m$$

$$+ (0,40 - 0,40)$$

$$NPSH_{d,P-02} = 2,03 m = 6,66 ft$$

D.4.5. Altura neta positiva de succión requerida.

La Altura neta positiva de succión requerida (NPSHr) es la presión mínima que solicita la bomba para que no se produzca cavitación en su interior. Su valor viene definido por la bomba seleccionada y el fabricante.

Las bombas se han seleccionado mediante los parámetros definidos anteriormente y el programa facilitado por la página Web de Goulds Pumps.

- La BOMBA 1 (P-01 A/B) de caudal $0,047 m^3 \cdot s^{-1}$ (744 gpm), con una altura efectiva de 29,40 m (96,46 ft), una potencia requerida de 12,00 CV y un $NPSH_d$ de 1,75 m (5,74 ft), solicita una bomba centrífuga de etapa simple según la Figura D.1.

El modelo seleccionado es de Goulds Pumps: 3620, 1.485 rpm, frecuencia 50Hz, potencia de 15,82 CV (15,60 HP) de 75,5% de eficiencia y NPSHr igual a 3,30 ft (Véase Anexo G: Catálogo Bomba 3620 y curva característica "Alimentación").

$$NPSH_d = 5,74 ft > NPSH_r = 3,30 ft$$

Cumpliendo con la condición para asegurar el buen funcionamiento de la bomba.

Siendo las dos Bombas 1 necesarias, iguales y dispuestas en paralelo, para suministrar el caudal total de alimentación de $0,094 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, y la curva característica de ambas bombas en serie puede verse también en Anexo G: Curva característica Bomba modelo 3620 de Goulds Pumps "Alimentación".

- La BOMBA 2 (P-02 A/B) de caudal $0,005 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (79,01 gpm), con una altura efectiva de 41,36 m (135,69 ft), una potencia requerida de 2,14 CV y un $NPSH_d$ igual a 6,66 ft, solicita una bomba centrífuga de etapa simple según la Figura D.1.

El modelo seleccionado es de Goulds Pumps: API 3171, 2.930 rpm, frecuencia 50 Hz, potencia de 3,95 CV (3,9 HP) de 54,5% de eficiencia y $NPSH_r$ igual a 5,2 ft (Véase Anexo G: Catálogo Bomba API 3171 y curva característica "Reflujo").

$$NPSH_d = 6,66 \text{ ft} > NPSH_r = 5,2 \text{ ft}$$

Cumpliendo con la condición garantizando el buen funcionamiento de la bomba.

Es necesario mencionar que no se diseña la bomba que impulsa el fluido de salida del acumulador de reflujo hacia el reactor de alquilación, pues al no conocer la distancia de recorrido hasta el destino final, el reactor, y las pérdidas de carga que existan, no es posible determinar sus características.

ANEXO E: Diseño del acumulador de reflujo.

E.1. Introducción.

El acumulador de reflujo es un recipiente a presión por lo que requiere de la determinación de los siguientes parámetros:

- Condiciones de diseño
- Parámetros específicos del material empleado

E.2. Condiciones de diseño.

E.2.1. Presión de diseño.

Van a evaluarse tres presiones distintas y elegirse la mayor de éstas para tener un margen de seguridad en el diseño. La presión de salida del condensador tiene un valor igual a 2,13 atm ($2,20 \text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$) habiendo tomado en cuenta la pérdida de presión real de 0,30 atm. Se tiene por tanto:

$$P_{d,1} = 1,1 \cdot P = 1,1 \cdot 2,20 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} = 2,42 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$P_{d,2} = P + 2 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} = 2,20 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} + 2 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} = 4,20 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$P_{d,3} = 3,5 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

Dónde:

- Pd,1: Presión máxima de operación con un aumento del 10% ($\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$).
- Pd,2: Presión máxima de diseño con un incremento de $2 \text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$ ($\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$).
- Pd,3: Presión establecida como referencia por el código $3,5 \text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$.

Entonces, como presión de diseño se fija $4,20 \text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$ ($4,07 \text{ atm}$ ó $59,75 \text{ psi}$).

E.2.2. Temperatura de diseño.

En cuanto a la temperatura, deben añadirse 20°C a la temperatura máxima alcanzada por las corrientes implicadas, ésta se corresponde con la temperatura a la que sale el líquido del condensador, con un valor de 106,03 °C. Por consiguiente, la temperatura de diseño es 126,03 °C (399,18 K ó 258,86 F).

E.3. Parámetros del material.

E.3.1. Máxima tensión admisible.

La tensión máxima permisible (S) depende tanto de la temperatura de diseño como del material de construcción. Se define como máxima tensión permisible 1.221 atm (17.947 psi) según el código ASME para una temperatura de 258,86°F y acero SA-285 C (Véase Anexo F: Tabla F.3a. y Tabla F.3b.).

E.3.2. Eficiencia de soldadura

El coeficiente de soldadura (E) toma un valor de 0,85 para una soldadura de doble cordón de uniones a tope y examinada por puntos o zonas correspondiente a la temperatura de diseño y material utilizado según la tabla del Anexo F: Tabla F.4.

E.3.3. Factor de corrosión.

En la determinación de este factor debe tenerse en cuenta tanto que los recipientes a presión presentan de forma habitual una velocidad de corrosión de $5,00 \cdot 10^{-3}$ pulgadas por año, como que el tiempo de vida para equipos secundarios es entre 8 y 10 años [35].

El acumulador de reflujo se trata de un recipiente secundario a presión para el que se estima un tiempo de vida de 10 años, de manera que el factor de corrosión o espesor debido a corrosión es:

$$C = 5,00 \cdot 10^{-3} \frac{in}{año} \cdot 10 \text{ años} = 0,050 \text{ in} = 1 \text{ mm}$$

E.3.4. Tamaño óptimo.

Para la determinación de las dimensiones óptimas del recipiente a presión, se hace uso tanto del factor F que toma en cuenta la presión de diseño, la tensión admisible por el material (S), el factor de corrosión (C) y el coeficiente de soldadura (E), como el diámetro interno (D_R) requerido por el volumen de fluido (V_F) según la figura del Anexo F: Figura F.2.

$$F = \frac{P_d}{C \cdot S \cdot E}$$

$$F = \frac{59,75 \text{ psi}}{0,05 \text{ in} \cdot 17.947 \text{ psi} \cdot 0,85} = 0,08$$

Si a las condiciones en las que se encuentra el fluido, presenta las propiedades siguientes:

- Densidad $\rho_F = 779,55 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.
- Viscosidad $\mu_F = 23,91 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$.
- Peso molecular $PM_F = 78,22 \text{ kg} \cdot \text{kmol}^{-1}$.
- Caudal molar $Q_m = 519 \text{ kmol} \cdot \text{h}^{-1}$.

Se determina el caudal volumétrico (Q_V) del fluido con la siguiente expresión:

$$Q_V = \frac{Q_m \cdot PM_F}{\rho_F} = \frac{519 \frac{\text{kmol}}{\text{h}} \cdot 78,22 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}}{779,55 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 52,12 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} = 0,01 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Para los acumuladores de reflujo el tiempo de almacenamiento ($t_{almacen}$) debe encontrarse entre 15 y 30 minutos, este diseño tomará en cuenta 30 minutos (0,5 h) de almacenamiento y por tanto el volumen de fluido (V_F) que se obtiene es:

$$V_F = Q_V \cdot t_{almacen} = 52,12 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot 0,5 \text{ h} = 26,06 \text{ m}^3$$

El volumen máximo de llenado del acumulador debe ser un 90% del total, por tanto, el volumen requerido por el recipiente (V_R) es:

$$V_R = \frac{V_F}{0,90} = \frac{26,06 \text{ m}^3}{0,90} = 28,96 \text{ m}^3 = 1.022,59 \text{ ft}^3$$

Con este valor requerido de volumen y con el factor calculado F, se obtiene un diámetro interno de recipiente (D_R) igual a 6 ft (1,83 m).

Mediante la geometría de un cilindro horizontal, se determina la longitud del recipiente²²:

$$H_R = \frac{V_R}{\pi \cdot \frac{D_R^2}{4}} = \frac{1.022,59 \text{ ft}^3}{\pi \cdot \frac{(6 \text{ ft})^2}{4}} = 36,17 \text{ ft}$$

E.4. Diseño mecánico.

Para la determinación del espesor del acumulador, debe tenerse en cuenta el requerido por fondos como por la carcasa según las condiciones a las que están sometidos.

E.4.1. Fondos del recipiente

Como se indica en el apartado A.4.6., se emplean los fondos de tipo Korbogen cuando se cumple una de las siguientes condiciones:

- 1º Condición: Presión de diseño igual o superior a 6,77 atm (7 kg·cm⁻²).
- 2º Condición: Temperatura de diseño superior a 350°C.
- 3º Condición: Fondos inferiores de recipientes verticales cuya relación altura/diámetro sea superior a 10.

Las condiciones de diseño del recipiente son menores que las indicadas, y al presentar una relación entre longitud y diámetro $H_R/D_R=36,17 \text{ ft}/6 \text{ ft}=6$ los dos fondos serán toriesféricos de tipo Klopper.

Siguiendo las mismas operaciones y pasos del apartado A.4.6, las dimensiones del recipiente son:

$$R_f = T \quad [\text{Ec. A. 29}]$$

$$r = \frac{T}{10} \quad [\text{Ec. A. 30}]$$

²² H_R : Se emplea H_R para asemejar las ecuaciones empleadas en los cálculos de espesor del proyecto, pero la magnitud considerada es la longitud.

$$H = 0,2 \cdot T \quad [Ec. A. 31]$$

Al reemplazar datos se tiene:

- Diámetro interno: $D_R=T=1,83$ m (72 in).
- Radio mayor del fondo: $R_f=1,83$ m (72 in).
- Radio menor del fondo: $r=0,18$ m (7,20 in).
- Longitud fondo: $H_{fondo}=H=0,37$ m (14,40 in).
- Volumen fondo:
 $V_{fondo}=0,1 \cdot R_f^3=0,61$ m³ (37.324,80 in³).

E.4.1.1. Espesor fondos

Para una relación $R_f/r=10$ menor a $16 \frac{2}{3}$, mediante la expresión [Ec.A.32], el espesor obtenido para el fondo es:

$$t_{Fondo} = \frac{P_d \cdot R \cdot M}{2 \cdot S \cdot E - 0,2 \cdot P_d} \quad [Ec. A. 32]$$

$$t_{Fondo} = \frac{59,75 \text{ psi} \cdot \frac{72 \text{ in}}{2} \cdot 1,54}{2 \cdot 17.947 \text{ psi} \cdot 0,85 - 0,2 \cdot 59,75 \text{ psi}} = 0,217 \text{ in} = 5,52 \text{ mm}$$

En el valor obtenido se debe incluir el factor de corrosión (C), en consecuencia el espesor es 0,267 in (7 mm).

Recordando que M se calcula mediante la siguiente relación:

$$M = \frac{1}{4} \cdot \left(3 + \sqrt{\frac{R_f}{r}} \right) = \frac{1}{4} (3 + \sqrt{10}) = 1,54$$

E.4.1.2. Espesor carcasa

La unidad diseñada debe presentar un espesor uniforme en todo el recipiente, por lo que se elige el espesor mayor obtenido entre fondos y carcasa.

Así mismo, se toma en cuenta tanto el espesor mínimo exigido por el código ASME (t_{ASME}) y el exigido por el material ($t_{Material}$), como el requerido debido a las tensiones a las que el acumulador se somete ($t_{Tensiones}$) y el obtenido en fondos (t_{Fondos}):

$$t_{ASME} (mm) = 2,5 mm + C = 2,5 mm + 1,27 mm = 3,77 mm = 0,148 in$$

$$t_{Material} (mm) = 5 mm + C = 5 mm + 1,27 mm = 6,27 mm = 0,247 in$$

El espesor requerido debido a las tensiones será el resultado de la suma del factor de corrosión y el mayor obtenido de la comparación de dos valores:

El primero, se trata del espesor debido a la presión interna de tensión circunferencial según las ecuaciones del apartado A.4.6:

Tensión circunferencial

$$t_{circ} = \frac{P_d \cdot R}{S \cdot E - 0,6 \cdot P_d} \quad [Ec. A. 34]$$

Tensión longitudinal

$$t_{long} = \frac{P_d \cdot R}{2 \cdot S \cdot E + 0,4 \cdot P_d} \quad [Ec. A. 35]$$

Obteniendo:

$$t_{circ} = \frac{59,75 \text{ psi} \cdot \frac{72}{2} \text{ in}}{17.947 \text{ psi} \cdot 0,85 - 0,6 \cdot 59,75 \text{ psi}} = 0,141 \text{ in}$$

El segundo, el espesor debido a la presión interna de tensión longitudinal es:

$$t_{long} = \frac{57,59 \text{ psi} \cdot \frac{72}{2} \text{ in}}{2 \cdot 17.947 \text{ psi} \cdot 0,85 + 0,4 \cdot 57,59 \text{ psi}} = 0,070 \text{ in}$$

Por tanto, el mayor de éstos dos incluyendo el factor de corrosión toma el valor de 0,191 in o 5 mm.

E.4.1.3. Espesor recipiente

Al comparar los valores obtenidos de espesores, se observa que el mayor es el conseguido en fondos, por esta razón el espesor del acumulador de reflujo es 0,267 in (7 mm).

El valor comercial inmediatamente superior al calculado es 0,313 in (8 mm o 5/16 in).

E.5. Dimensiones

Se conoce el diámetro interno, el volumen del cilindro, el volumen de cada fondo y el espesor requerido por el recipiente, con lo que se procederá al cálculo de las dimensiones finales.

$$V_{Acumulador} = V_R + V_{fondo-superior} + V_{fondo-inferior}$$

$$V_{Acumulador} = 28,96 \text{ m}^3 + 0,61 \text{ m}^3 + 0,61 \text{ m}^3 = 30,18 \text{ m}^3$$

El diámetro externo del acumulador se determina de la siguiente manera:

$$D_{e,Acum} = D_{i,Acum} + 2 \cdot t_{Acum} = 1,83 \text{ m} + 2 \cdot (8 \cdot 10^{-3} \text{ m}) = 1,84 \text{ m}$$

Con lo cual, la altura total del recipiente es igual a:

$$H_{Acum} = H_R + H_{fondo-superior} + H_{fondo-inferior} + 2 \cdot t_{Acum}$$

$$H_{Acum} = 11,02 \text{ m} + 0,37 \text{ m} + 0,37 \text{ m} + 2 \cdot (8 \cdot 10^{-3} \text{ m}) = 11,77 \text{ m}$$

Para la verificación de las dimensiones, se calcula el porcentaje de llenado del recipiente que no debe tener un valor superior al 90% como se demuestra en la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Llenado} = \frac{V_F}{V_{Acumulador}} \cdot 100 = \frac{26,06 \text{ m}^3}{30,18 \text{ m}^3} \cdot 100 = 86,35 \%$$

De manera que se dan como válidas las dimensiones especificadas según la anterior fórmula, que nos da un valor final de recipiente de 30,18 m³ o 30.180 litros.

Está recubierto externamente por lana de roca como material aislante, con un espesor de 60 mm y una densidad de 100 kg·m⁻³. El espesor ha sido calculado mediante el programa Insulan de la compañía CALORCOL [25].

ANEXO F: Tablas y figuras.

Tabla F. 1a. Resistencia química de metales [35].

CHEMICAL RESISTANCE OF METALS														
Resistance Ratings: A = Good; F = Fair C = Caution - depends on conditions X = Not recommended.														
Caution: Do not use table without reading footnotes and text.														
Chemical	Iron and Steel	Red Brass	Commercial Bronze	Lead	Copper	Aluminum	Nickel	Inconel	Monel Metal	Type 304 S.S.	Type 316 S.S.	Type 347 S.S.	Carpenter "20" S.S.	Hastelloy "B" or "C"
Acetic acid, crude.....	C	C	F	C	F	A	C	C	C	C	C	C	A	A
Pure.....	X	C	F	C	F	A	C	C	C	C	C	C	A	A
Vapors.....	X	C	F	C	F	A	C	C	C	C	C	C	A	A
150 lb/sq.in. @ 400°F.....	X	-	F	X	F	A	-	C	C	-	X	C	A	A
Acetic anhydride.....	C	F	F	A	F	A	A	A	A	F	A	A	A	A
Acetone.....	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Acetylene.....	A	X	X	A	X	A	A	-	A	A	A	A	A	A
Aluminum chloride.....	X	C	C	X	C	C	C	C	C	C	C	C	A	A
Aluminum sulfate.....	X	F	F	A	F	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Alums.....	X	F	F	A	F	A	A	-	A	A	A	A	A	A
Ammonia gas, dry.....	F	A	A	A	A	A	A	A ₃	A	A	A	A	A	A
Moist.....	F	X	X	A	X	A	C	A	A	A	A	A	A	A
Ammonium chloride.....	F	X	X	A	X	A	C	A	A	A	A	A	A	A ₆
Ammonium hydroxide.....	A	X	X	X	X	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Ammonium nitrate.....	F	X	X	X	X	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Ammonium phosphate.....	C	C	C	A	C	C	A	A ₄	A	A	A	A	A	A ₅
Ammonium sulfate.....	F	C	C	A	C	A	F	A	A	A	A	A	A	A
Aniline, aniline oil.....	A	X	X	-	X	X	-	-	A	A	A	A	A	A
Aniline dyes.....	-	-	-	-	-	-	-	-	A	A	A	A	A	A
Barium chloride.....	-	-	-	-	-	-	A	-	-	C	C	-	F	A ₆
Barium hydroxide.....	-	-	-	X	X	X	A	-	-	A	A	A	A	-
Barium sulfide.....	-	-	-	A	X	-	-	-	A	A	A	A	A	-
Beer.....	C	-	A	-	A	A	A	A	A	A	A	A	-	A
Beet sugar liquors.....	C	-	-	-	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Benzene, benzol.....	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Benzine, petroleum ether, naphtha	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Black sulfate liquor.....	A	A	A	F	X	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Boric acid.....	X	A	A	C	C	-	-	-	A	A	A	A	A	A
Bromine.....	X	C	C	-	C	X	C	C	C	X	X	X	C	A

Notes continued on opposite page

1. In absence of oxygen.
2. 125° maximum.
3. All percents; 70°.
4. To boiling.
5. 5% room temperature.
6. To 122°.
7. Iron and steel may rust considerably in presence of water and air.
8. High copper alloys prohibited by Codes; yellow brass acceptable.
9. Hastelloy "C" recommended to 105°.

10. Where color is not important. Do not use with c.p. acid.
11. Room temperature to 212°. Moisture inhibits attack.
12. Gas; 70°.
13. To 300°.
14. Hastelloy "C" at room temperature.
15. Room temperature to 158°.
16. At room temperature.
17. Where discoloration is not objectionable.
18. 5% maximum; 150° maximum.
19. Satisfactory vapors to 212°.

Tabla F. 2.Propiedades de materiales [35].

PROPERTIES OF MATERIALS				
CARBON & LOW ALLOY STEEL *				
Form	Nominal Composition	Specification		APPLICATION
		Number	Grade	
Plate	C	SA-283	C	Structural quality. For pressure vessel may be used with limitations see note : 1
	C	SA-285	C	Boilers for stationary service and other pressure vessels
	C - Si	SA-515	55 *	Primarily for intermediate and high temperature service
	C - Si	SA-515	60 *	- " -
	C - Si	SA-515	65	- " -
	C - Si	SA-515	70	- " -
	C - Si	SA-516	55 *	For moderate and lower temperature service
	C - Si	SA-516	60 *	- " -
	C - Mn - Si	SA-516	65 *	- " -
	C - Mn - Si	SA-516	70 *	- " -
Flange and Fitting	C - Mn - Si	SA-105		For high temperature service
	C - Si	SA-181	I	For general service
	C - Mn	SA-350	LF1	For low temperature service
	C - Mn - Si		LF2	
Pipe	C - Mn	SA-53	B	For general service
	C - Mn	SA-106	B	For high temperature service
Bolting	1Cr-1/5 Mo.	SA-193	B7 *	For high temperature service Bolt 2½ in. diam. or less
		SA-194	2H	For high temperature service nut
		SA-307	B *	Machine bolt for general use
				*For low temperature operation see page 185
* Data of the most frequently used materials from ASME Code Section II and VIII.				

Tabla F. 3a. Tensión admisible para metales [ASME B31.3, 2004].

Table A-1 Basic Allowable Stresses in Tension for Metals¹ (Cont'd)
 Numbers in Parentheses Refer to Notes for Appendix A Tables; Specifications Are ASTM Unless Otherwise Indicated

Material	Spec. No.	P-No. or S-No. (5)	Grade	Notes	Min. Temp., °F (6)	Specified Min. Strength, ksi		Min. Temp.		
						Tensile	Yield	to 100	200	300
Carbon Steel (Cont'd)										
Pipes and Tubes (2) (Cont'd)										
...	API 5L	S-1	X60	(51)(55)(71)(77)	A	75	60	25.0	25.0	25.0
...	API 5L	S-1	X65	(51)(55)(71)	A	77	65	25.7	25.7	25.7
...	API 5L	S-1	X70	(51)(55)(71)	A	82	70	27.3	27.3	27.3
...	API 5L	S-1	X80	(51)(55)(71)	A	90	80	30.0	30.0	30.0
...	A 381	S-1	Y60	(51)(71)	A	75	60	25.0	25.0	25.0
Pipes (Structural Grade) (2)										
A 283 Gr. A	A 134	1	...	(8a)(8c)	-20	45	24	13.7	13.0	12.4
A 570 Gr. 30	A 134	S-1	...	(8a)(8c)	-20	49	30	15.0	15.0	15.0
A 283 Gr. B	A 134	1	...	(8a)(8c)	-20	50	27	15.3	14.4	13.9
A 570 Gr. 33	A 134	S-1	...	(8a)(8c)	-20	52	33	15.9	15.9	15.9
A 570 Gr. 36	A 134	S-1	...	(8a)(8c)	-20	53	36	16.3	16.3	16.3
A 570 Gr. 40	A 134	1	...	(8a)(8c)	-20	55	40	16.9	16.9	16.9
A 36	A 134	1	...	(8a)(8c)	-20	58	36	17.6	16.8	16.8
A 283 Gr. D	A 134	1	...	(8a)(8c)	-20	60	33	18.4	17.4	16.6
A 570 Gr. 45	A 134	S-1	...	(8a)(8c)	-20	60	45	18.4	18.4	18.4
A 570 Gr. 50	A 134	1	...	(8a)(8c)	-20	65	50	19.9	19.9	19.9
Plates and Sheets										
...	A 285	1	A	(57)(59)	B	45	24	15.0	14.6	14.2
...	A 285	1	B	(57)(59)	B	50	27	16.7	16.4	16.0
...	A 516	1	55	(57)	C	55	30	18.3	18.3	17.7
...	A 285	1	C	(57)(59)	A	55	30	18.3	18.3	17.7
...	A 516	1	60	(57)	C	60	32	20.0	19.5	18.9
...	A 515	1	60	(57)	B	60	32	20.0	19.5	18.9
...	A 516	1	65	(57)	B	65	35	21.7	21.3	20.7
...	A 515	1	65	(57)	A	65	35	21.7	21.3	20.7
...	A 516	1	70	(57)	B	70	38	23.3	23.1	22.5
...	A 515	1	70	(57)	A	70	38	23.3	23.1	22.5
(≤ 2½ in. thick)	A 537	1	CL 1	...	D	70	50	23.3	23.3	22.9
(> 1 in. thick)	A 299	1	...	(57)	A	75	40	25.0	24.4	23.7
(≤ 1 in. thick)	A 299	1	...	(57)	A	75	42	25.0	25.0	24.8

Tabla F. 3b. (Continuación 3a.) Tensión admisible para metales [ASME B31.3, 2004].

Table A-1 Basic Allowable Stresses in Tension for Metals¹ (Cont'd)
 Numbers in Parentheses Refer to Notes for Appendix A Tables; Specifications Are ASTM Unless Otherwise Indicated

Basic Allowable Stress <i>S</i> , ksi (1), at Metal Temperature, °F (7)														
400	500	600	650	700	750	800	850	900	950	1000	1050	1100	Grade	Spec. No.
Carbon Steel (Cont'd)														
Pipes and Tubes (2) (Cont'd)														
25.0	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	X60	API 5L
25.7	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	X65	API 5L
27.3	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	X70	API 5L
30.0	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	X80	API 5L
25.0	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	X60	A 381
Pipes (Structural Grade) (2)														
11.8	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	A 134
15.0	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	A 134
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	A 134
15.9	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	A 134
16.3	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	A 134
16.9	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	A 134
16.8	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	A 134
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	A 134
18.4	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	A 134
19.9	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	A 134
Plates and Sheets														
13.7	13.0	11.8	11.6	11.5	10.2	9.0	7.7	6.5	4.5	2.5	1.6	1.0	A	A 285
15.4	14.6	13.3	13.1	13.0	11.1	9.6	8.0	6.5	4.5	2.5	1.6	1.0	B	A 285
17.2	16.2	14.8	14.5	14.4	12.0	10.2	8.3	...	...	...	...	...	55	A 516
17.2	16.2	14.8	14.5	14.4	12.0	10.2	8.3	6.5	4.5	2.5	1.6	1.0	C	A 285
18.3	17.3	15.8	15.5	15.4	12.9	10.8	8.6	...	...	...	...	...	60	A 516
18.3	17.3	15.8	15.5	15.4	12.9	10.8	8.6	6.5	4.5	2.5	...	...	60	A 515
20.0	18.9	17.3	17.0	16.8	13.8	11.4	8.9	...	...	...	...	...	65	A 516
20.0	18.9	17.3	17.0	16.8	13.8	11.4	8.9	6.5	4.5	2.5	...	...	65	A 515
21.7	20.5	18.7	18.4	18.3	14.7	12.0	9.2	...	...	...	...	...	70	A 516
21.7	20.5	18.7	18.4	18.3	14.7	12.0	9.2	6.5	4.5	2.5	...	...	70	A 515
22.9	22.9	22.6	22.0	21.4	...	...	...	...	...	...	...	...	Cl. 1	A 537
22.9	21.6	19.7	19.4	19.2	15.6	12.6	9.5	6.5	4.5	2.5	1.6	1.0	...	A 299
24.0	22.7	20.7	20.4	20.2	15.6	12.6	9.5	6.5	4.5	2.5	1.6	1.0	...	A 299

Tabla F. 3c. Tensiones admisibles para metales [ASME B31.3, 2004].

Table A-1 Basic Allowable Stresses in Tension for Metals¹ (Cont'd)
 Numbers in Parentheses Refer to Notes for Appendix A Tables; Specifications Are ASTM Unless Otherwise Indicated

Material	Spec. No.	P-No. or S-No. (5)	Grade	Notes	Min. Temp., °F (6)	Specified Min. Strength, ksi		Min. Temp.			
						Tensile	Yield	to 100	200	300	
Carbon Steel											
Pipes and Tubes (2)											
A 285 Gr. A	A 134	1	...	(8b)(57)	| B	45	24	15.0	14.6	14.2	
A 285 Gr. A	A 672	1	A45	(57)(59)(67)	| B	45	24	15.0	14.6	14.2	
Butt weld Smls & ERW	API 5L	S-1	A25	(8a)	|| -20	45	25	15.0	15.0	14.5	
	API 5L	S-1	A25	(57)(59)	| B	45	25	15.0	15.0	14.5	
...	A 179	1	...	(57)(59)	-20	47	26	15.7	15.0	14.2	
Type F	A 53	1	A	(8a)(77)	|| 20	48	30	16.0	16.0	16.0	
...	A 139	S-1	A	(8b)(77)	| A	48	30	16.0	16.0	16.0	
...	A 587	1	...	(57)(59)	-20	48	30	16.0	16.0	16.0	
...	A 53	1	A	(57)(59)	} B	48	30	16.0	16.0	16.0	
...	A 106	1	A	(57)							
...	A 135	1	A	(57)(59)							
...	A 369	1	FPA	(57)							
...	API 5L	S-1	A	(57)(59)(77)							
A 285 Gr. B	A 134	1	...	(8b)(57)	| B	50	27	16.7	16.4	16.0	
A 285 Gr. B	A 672	1	A50	(57)(59)(67)	| B	50	27	16.7	16.4	16.0	
A 285 Gr. C	A 134	1	...	(8b)(57)	| A	55	30	18.3	18.3	17.7	
...	A 524	1	II	(57)	-20	55	30	18.3	18.3	17.7	
...	A 333	1	1	} (57)(59)	-50	55	30	18.3	18.3	17.7	
...	A 334	1	1								
A 285 Gr. C	A 671	1	CA55								(59)(67)
A 285 Gr. C	A 672	1	A55	(57)(59)(67)	A	} 55	30	18.3	18.3	17.7	
A 516 Gr. 55	A 672	1	C55	(57)(67)	C						
A 516 Gr. 60	A 671	1	CC60	(57)(67)	C	60	32	20.0	19.5	18.9	
A 515 Gr. 60	A 671	1	CB60	} (57)(67)	B	60	32	20.0	19.5	18.9	
A 515 Gr. 60	A 672	1	B60								
A 516 Gr. 60	A 672	1	C60								C
...	A 139	S-1	B	(8b)	| A	60	35	20.0	20.0	20.0	
...	A 135	1	B	(57)(59)	} B	60	35	20.0	20.0	20.0	
...	A 524	1	I	(57)							
...	A 53	1	B	(57)(59)	} B	60	35	20.0	20.0	20.0	
...	A 106	1	B	(57)							
...	A 333	} 1	6	(57)							
...	A 334			(57)							
...	A 369			FPB							(57)
...	A 381	S-1	Y35	...							A
...	API 5L	S-1	B	(57)(59)(77)							B

Tabla F. 3d. (Continuación 3c) Tensiones admisibles para metales [ASME B31.3, 2004].

Table A-1 Basic Allowable Stresses in Tension for Metals¹ (Cont'd)
 Numbers in Parentheses Refer to Notes for Appendix A Tables; Specifications Are ASTM Unless Otherwise Indicated

Basic Allowable Stress S, ksi (1), at Metal Temperature, °F (7)

400	500	600	650	700	750	800	850	900	950	1000	1050	1100	Grade	Spec. No.
													Carbon Steel Pipes and Tubes (2)	
13.7	13.0	11.8	11.6	11.5	10.3	9.0	7.8	6.5	...	...	...	...	...	A 134
13.7	13.0	11.8	11.6	11.5	10.3	9.0	7.8	6.5	4.5	2.5	1.6	1.0	A45	A 672
13.8	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	A25	API 5L
13.8	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	A25	API 5L
13.5	12.8	12.1	11.8	11.5	10.6	9.2	7.9	6.5	4.5	2.5	1.6	1.0	...	A 179
16.0	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	A	A 53
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	A	A 139
16.0	16.0	14.8	14.5	14.4	10.7	9.3	7.9	...	...	...	...	...	...	A 587
16.0	16.0	14.8	14.5	14.4	10.7	9.3	7.9	6.5	4.5	2.5	1.6	1.0	A A A FPA A	A 53 A 106 A 135 A 369 API 5L
15.4	14.6	13.3	13.1	13.0	11.2	9.6	8.1	6.5	...	...	...	...	...	A 134
15.4	14.6	13.3	13.1	13.0	11.2	9.6	8.1	6.5	4.5	2.5	1.6	1.0	A 50	A 672
17.2	16.2	14.8	14.5	14.4	12.0	10.2	8.3	6.5	...	...	...	...	...	A 134
17.2	16.2	14.8	14.5	14.4	12.0	10.2	8.3	6.5	4.5	2.5	...	...	II	A 524
17.2	16.2	14.8	14.5	14.4	12.0	10.2	8.3	6.5	4.5	2.5	1.6	1.0	1 1 CA55 A55 C55	A 333 A 334 A 671 A 672 A 672
17.2	16.2	14.8	14.5	14.4	12.1	10.2	8.4	6.5	4.5	2.5	1.6	1.0	C60	A 671
18.3	17.3	15.8	15.5	15.4	13.0	10.8	8.7	6.5	4.5	2.5	...	...	CB60	A 671
18.3	17.3	15.8	15.5	15.4	13.0	10.8	8.7	6.5	4.5	2.5	1.6	1.0	B60 C60	A 672 A 672
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	B	A 139
20.0	18.9	17.3	17.0	16.5	13.0	10.8	8.7	6.5	4.5	2.5	...	...	B I	A 135 A 524
20.0	18.9	17.3	17.0	16.5	13.0	10.8	8.7	6.5	4.5	2.5	1.6	1.0	B B 6 6 FPB Y35 B	A 53 A 106 A 333 A 334 A 369 A 381 API 5L

Tabla F. 4. Coeficientes de soldadura [35].

TYPES OF WELDED JOINTS					
TYPES CODE UW-12		JOINT EFFICIENCY, E When the Joint:			
		a. Fully Radio- graphed	b. Spot Examined	c. Not Examined	
1		<p>Butt joints as attained by double-welding or by other means which will obtain the same quality of deposited weld metal on the inside and outside weld surface.</p> <p>Backing strip if used shall be removed after completion of weld.</p>	1.00	0.85	0.70
2	 <p>For circumferential joint only</p>	<p>Single-welded butt joint with backing strip which remains in place after welding</p>	0.90	0.80	0.65
3		<p>Single-welded butt joint without use of backing strip</p>	—	—	0.60
4		<p>Double-full fillet lap joint</p>	—	—	0.55
5		<p>Single-full fillet lap joint with plug welds</p>	—	—	0.50
6		<p>Single full fillet lap joint without plug welds</p>	—	—	0.45

Tabla F. 5. Coeficiente de soldadura en tubos [ASME B31.3, 2004].

Table A-1B Basic Quality Factors for Longitudinal Weld Joints in Pipes, Tubes, and Fittings E_j
 These quality factors are determined in accordance with para. 302.3.4(a). See also para. 302.3.4(b) and Table 302.3.4 for increased quality factors applicable in special cases. Specifications, except API, are ASTM.

Spec. No.	Class (or Type)	Description	E_j (2)	Appendix A Notes
Carbon Steel				
API 5L	...	Seamless pipe	1.00	...
	...	Electric resistance welded pipe	0.85	...
	...	Electric fusion welded pipe, double butt, straight or spiral seam	0.95	...
	...	Furnace butt welded	0.60	...
A 53	Type S	Seamless pipe	1.00	...
	Type E	Electric resistance welded pipe	0.85	...
	Type F	Furnace butt welded pipe	0.60	...
A 105	...	Forgings and fittings	1.00	(9)
A 106	...	Seamless pipe	1.00	...
A 134	...	Electric fusion welded pipe, single butt, straight or spiral seam	0.80	...
	...	Electric resistance welded pipe	0.85	...
A 135	...	Electric fusion welded pipe, straight or spiral seam	0.80	...
A 139	...	Seamless tube	1.00	...
A 179	...	Forgings and fittings	1.00	(9)
A 181	...	Seamless and welded fittings	1.00	(16)
A 234	...	Seamless pipe	1.00	...
	...	Electric resistance welded pipe	0.85	...
A 333	...	Seamless tube	1.00	...
A 334	...	Forgings and fittings	1.00	(9)
A 350	...	Seamless pipe	1.00	...
A 369	...	Electric fusion welded pipe, 100% radiographed	1.00	(18)
A 381	...	Electric fusion welded pipe, spot radiographed	0.90	(19)
	...	Electric fusion welded pipe, as manufactured	0.85	...
	...	Welded fittings, 100% radiographed	1.00	(16)
A 420	...	Seamless pipe	1.00	...
A 524	...	Electric resistance welded pipe	0.85	...
A 587	12, 22, 32, 42, 52	Electric fusion welded pipe, 100% radiographed	1.00	...
	13, 23, 33, 43, 53	Electric fusion welded pipe, double butt seam	0.85	...
A 672	12, 22, 32, 42, 52	Electric fusion welded pipe, 100% radiographed	1.00	...
	13, 23, 33, 43, 53	Electric fusion welded pipe, double butt seam	0.85	...
A 691	12, 22, 32, 42, 52	Electric fusion welded pipe, 100% radiographed	1.00	...
	13, 23, 33, 43, 53	Electric fusion welded pipe, double butt seam	0.85	...
Low and Intermediate Alloy Steel				
A 182	...	Forgings and fittings	1.00	(9)
A 234	...	Seamless and welded fittings	1.00	(16)
A 333	...	Seamless pipe	1.00	...
	...	Electric resistance welded pipe	0.85	...
A 334	...	Seamless tube	1.00	...
A 335	...	Seamless pipe	1.00	...
A 350	...	Forgings and fittings	1.00	...
A 369	...	Seamless pipe	1.00	...
A 420	...	Welded fittings, 100% radiographed	1.00	(16)

A 671	12, 22, 32, 42, 52	Electric fusion welded pipe, 100% radiographed	1.00	...
	13, 23, 33, 43, 53	Electric fusion welded pipe, double butt seam	0.85	...

Tabla F. 6. Factor F de tuberías [ASME B31.3, 2004].

Table 304.1.1 Values of Coefficient Y for $t < D/6$

Materials	Temperature, °C (°F)					
	≤ 482 (900 & Lower)	510 (950)	538 (1000)	566 (1050)	593 (1100)	≥ 621 (1150 & Up)
Ferritic steels	0.4	0.5	0.7	0.7	0.7	0.7
Austenitic steels	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.7
Other ductile metals	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
Cast iron	0.0	...	...	...	...	...

Tabla F.7. Características de tubos [14].

TABLA 11-2. Características de tubos*

Díámetro exterior del tubo, en in	Calibre HWG	Espesor de la pared, en in	Área. int. de corte transvers., en in ²	f ² de superficie externa por ft de longitud	f de superficie interna por ft de longitud	Peso por ft de longitud, de acero, en lb *	Díámetro interno del tubo, en in	Momento de inercia, en in ⁴	Módulo de sección en in ³	Radio de giro, en in	Constante**	Diseño exterior/diámetro interior	Área metálica transversal en in ²
1/2	22	0.025	0.0295	0.0655	0.0508	0.066	0.194	0.00012	0.00098	0.0792	46	1.285	0.0195
1/2	24	0.22	.0333	.0655	.0539	.064	.206	.00011	.00083	.0810	52	1.214	.0159
1/2	26	0.18	.0360	.0655	.0560	.045	.214	.00009	.00071	.0824	56	1.168	.0131
1/2	27	0.16	.0373	.0655	.0570	.040	.218	.00008	.00064	.0820	58	1.146	.0117
3/8	18	0.49	.0603	.0982	.0725	.171	.277	.00068	.0036	.1164	94	1.354	.0502
3/8	20	0.35	.0751	.0982	.0798	.127	.305	.00055	.0029	.1213	114	1.253	.0374
3/8	22	0.28	.0799	.0982	.0835	.104	.319	.00046	.0025	.1227	125	1.176	.0305
3/8	24	0.22	.0860	.0982	.0867	.085	.331	.00038	.0020	.1248	134	1.133	.0244
1/2	16	0.65	.1075	.1309	.0969	.302	.370	.0022	.0086	.1556	168	1.351	.0688
1/2	18	0.49	.1269	.1309	.1052	.236	.402	.0018	.0072	.1606	198	1.244	.0694
1/2	20	0.35	.1452	.1309	.1126	.174	.430	.0014	.0056	.1649	227	1.163	.0511
1/2	22	0.28	.1548	.1309	.1162	.141	.444	.0012	.0046	.1671	241	1.126	.0415
5/8	12	1.09	.1301	.1636	.1066	.602	.407	.0061	.0197	.1864	203	1.536	.177
5/8	13	0.95	.1486	.1636	.1139	.537	.435	.0057	.0183	.1903	232	1.437	.158
5/8	14	0.83	.1635	.1636	.1202	.479	.459	.0053	.0170	.1934	258	1.362	.141
5/8	15	0.72	.1817	.1636	.1259	.425	.481	.0049	.0156	.1971	283	1.299	.125
5/8	16	0.65	.1924	.1636	.1296	.398	.495	.0045	.0145	.1993	300	1.263	.114
5/8	17	0.58	.2035	.1636	.1333	.350	.509	.0042	.0134	.2016	317	1.228	.103
5/8	18	0.49	.2181	.1636	.1390	.303	.527	.0037	.0118	.2043	340	1.166	.089
5/8	19	0.42	.2298	.1636	.1416	.262	.541	.0033	.0105	.2068	358	1.155	.077
5/8	20	0.35	.2419	.1636	.1453	.221	.555	.0028	.0091	.2089	377	1.126	.065
1	10	1.34	.1825	.1963	.1262	.884	.482	.0129	.0344	.2229	285	1.596	.269
1	11	1.20	.2043	.1963	.1335	.806	.510	.0122	.0326	.2267	319	1.471	.238
1	12	1.09	.2223	.1963	.1393	.745	.532	.0116	.0309	.2299	347	1.410	.220
1	13	0.95	.2463	.1963	.1466	.696	.560	.0107	.0285	.2340	384	1.339	.196
1	14	0.83	.2679	.1963	.1529	.592	.584	.0098	.0262	.2376	418	1.284	.174
1	15	0.72	.2884	.1963	.1587	.520	.606	.0089	.0250	.2410	450	1.238	.153
1	16	0.65	.3019	.1963	.1623	.476	.620	.0080	.0221	.2433	471	1.210	.140
1	17	0.58	.3157	.1963	.1660	.426	.634	.0076	.0203	.2455	492	1.183	.128
1	18	0.49	.3339	.1963	.1707	.367	.652	.0067	.0178	.2484	521	1.150	.108
1	20	0.35	.3632	.1963	.1780	.269	.680	.0050	.0134	.2532	567	1.103	.079
1 1/8	10	1.34	.2892	.2291	.1589	1.061	.607	.0221	.0505	.2662	451	1.441	.312
1 1/8	12	1.09	.3290	.2291	.1720	.891	.657	.0196	.0449	.2736	529	1.332	.262
1 1/8	13	0.95	.3685	.2291	.1793	.792	.685	.0180	.0411	.2778	575	1.277	.233
1 1/8	14	0.83	.3948	.2291	.1856	.704	.709	.0164	.0374	.2815	616	1.234	.207
1 1/8	16	0.65	.4359	.2291	.1950	.561	.745	.0137	.0312	.2873	680	1.174	.165
1 1/8	18	0.49	.4742	.2291	.2034	.432	.777	.0109	.0249	.2925	740	1.126	.127
1 1/8	20	0.35	.5090	.2291	.2107	.313	.805	.0082	.0187	.2972	794	1.087	.092
1 1/2	8	1.65	.3526	.2618	.1754	1.462	.670	.0392	.0784	.3009	550	1.493	.430
1 1/2	10	1.34	.4208	.2618	.1916	1.237	.712	.0350	.0700	.3098	656	1.366	.364
1 1/2	11	1.20	.4596	.2618	.1990	1.129	.760	.0327	.0654	.3140	708	1.316	.332
1 1/2	12	1.09	.4903	.2618	.2047	1.037	.792	.0307	.0615	.3174	749	1.279	.305
1 1/2	13	0.95	.5153	.2618	.2121	.918	.810	.0280	.0559	.3217	804	1.235	.270
1 1/2	14	0.83	.5463	.2618	.2183	.813	.834	.0253	.0507	.3255	852	1.199	.239
1 1/2	15	0.72	.5795	.2618	.2241	.714	.856	.0227	.0455	.3291	898	1.167	.210
1 1/2	16	0.65	.5945	.2618	.2278	.649	.870	.0210	.0419	.3314	927	1.149	.191
1 1/2	18	0.49	.6390	.2618	.2361	.496	.902	.0166	.0332	.3366	997	1.109	.146
1 1/2	20	0.35	.6793	.2618	.2435	.360	.930	.0124	.0247	.3414	1060	1.075	.106
1 3/8	7	1.80	.6221	.3272	.2330	2.057	.890	.0890	.1425	.3836	970	1.404	.605
1 3/8	8	1.65	.6648	.3272	.2409	1.921	.920	.0847	.1355	.3880	1037	1.359	.565
1 3/8	10	1.34	.7574	.3272	.2571	1.595	.982	.0741	.1186	.3974	1182	1.273	.470
1 3/8	11	1.20	.8012	.3272	.2644	1.448	1.010	.0688	.1100	.4018	1250	1.238	.426
1 3/8	12	1.09	.8365	.3272	.2702	1.329	1.032	.0642	.1027	.4052	1305	1.211	.391
1 3/8	13	0.95	.8825	.3272	.2775	1.173	1.060	.0579	.0926	.4097	1377	1.179	.345
1 3/8	14	0.83	.9229	.3272	.2838	1.083	1.084	.0521	.0833	.4136	1440	1.153	.304
1 3/8	16	0.65	.9852	.3272	.2932	.823	1.120	.0426	.0682	.4196	1537	1.116	.242
1 3/8	18	0.49	1.042	.3272	.3016	.629	1.152	.0334	.0534	.4250	1626	1.085	.185
1 3/8	20	0.35	1.094	.3272	.3089	.456	1.180	.0247	.0395	.4297	1707	1.059	.154
1 1/2	10	1.34	1.192	.3927	.3225	1.955	1.232	1.354	.1906	.4853	1860	1.218	.575
1 1/2	12	1.09	1.291	.3927	.3356	1.618	1.282	1.159	.1546	.4933	2014	1.170	.476
1 1/2	14	0.83	1.396	.3927	.3492	1.258	1.334	.0931	.1241	.5018	2181	1.124	.370
1 1/2	16	0.65	1.474	.3927	.3587	.996	1.370	.0756	.1008	.5079	2299	1.085	.293
2	11	1.20	2.433	.5236	.4608	2.410	1.790	31.44	31.44	.6660	3795	1.130	.709
2	14	0.98	2.642	.5236	.4601	1.699	1.834	2300	2300	.6784	4121	1.090	.500
2 1/2	9	1.48	3.815	.6540	.5770	3.719	2.204	7592	.6074	.8032	5851	1.134	1.094

* Normas de la Tubular Exchanger Manufacturers Association, 5a ed., 1968 y 6a ed., 1978.

** Los pesos se basan en acero de bajo contenido de carbono con una densidad de 0.2833 lb/in³. Para otros metales, multiplíquese por los factores que siguen:

Aluminio	0.35	Latón de aluminio	1.06
Titanio	0.58	Níquel-cromo-hierro	1.07
Aceros inoxidables, AISI serie 400	0.99	Latón Admiralty	1.09
Aceros inoxidables, AISI serie 300	1.02	Níquel y cuproníquel	1.13
Bronce de aluminio	1.04	Cobre y cuproníquel	1.14

** Velocidad de líquido = $\frac{\text{lb por tubo por hora}}{\text{densidad relativa de agua} \times C}$ en ft/s (densidad relativa de agua a 16°C (60°F) = 1.0) sp gr de agua

Tabla F. 8a. Tabla de vapor saturado [14].

TABLA 3-302 Vapor saturado

Temperatura, K	Presión, bar*	Volumen, m ³ /kg		Entalpía, kJ/kg		Entropía, kJ/(kg·K)		Calor específico, C _p , kJ/(kg·K)		Viscosidad, Ns/m ²		Conductividad térmica, W/(m·K)		Num. de Prandtl		Tensión superficial, (N/m)	Temperatura, K
		Condensado [†]	Vapor	Condensado [†]	Vapor	Condensado [†]	Vapor	Condensado [†]	Vapor	Condensado [†]	Vapor	Condensado [†]	Vapor	Condensado [†]	Vapor		
150	6.30 - 11	1.073 - 3	0.55 + 9	-539.6	2273	-2.187	16.54	1.155				3.73					150
160	7.72 - 10	1.074 - 3	0.62 + 8	-525.7	2291	-2.106	15.49	1.233				3.52					160
170	7.29 - 9	1.076 - 3	1.08 + 8	-511.7	2310	-2.026	14.57	1.311				3.34					170
180	5.38 - 8	1.077 - 3	1.55 + 7	-497.8	2328	-1.947	13.76	1.389				3.18					180
190	3.23 - 7	1.078 - 3	2.72 + 6	-483.8	2347	-1.868	13.03	1.467				3.04					190
200	1.62 - 6	1.079 - 3	5.69 + 5	-467.5	2366	-1.789	12.38	1.545				2.91					200
210	7.01 - 6	1.081 - 3	1.39 + 5	-451.2	2384	-1.711	11.79	1.623				2.79					210
220	2.65 - 5	1.082 - 3	3.83 + 4	-435.0	2403	-1.633	11.20	1.701				2.69					220
230	6.91 - 5	1.084 - 3	1.18 + 4	-418.5	2421	-1.555	10.79	1.779				2.59					230
240	3.72 - 4	1.085 - 3	4.07 + 3	-400.1	2440	-1.478	10.35	1.857				2.50					240
250	7.59 - 4	1.087 - 3	1.52 + 3	-381.5	2459	-1.400	9.954	1.935				2.42					250
255	1.23 - 3	1.087 - 3	9.56 + 3	-369.8	2468	-1.361	9.768	1.974				2.38					255
260	1.96 - 3	1.088 - 3	612.2	-360.5	2477	-1.323	9.590	2.013				2.35					260
265	3.06 - 3	1.089 - 3	400.4	-351.2	2486	-1.281	9.461	2.052				2.31					265
270	4.69 - 3	1.090 - 3	265.4	-339.6	2496	-1.296	9.255	2.091				2.27					270
273.15	6.11 - 3	1.091 - 3	206.3	-333.5	2502	-1.221	9.158	2.116				2.26					273.15
273.15	0.00611	1.000 - 3	206.3	0.0	2502	0.000	9.158	4.217	1.854	1750 - 6	8.02 - 6	0.589	0.0182	12.99	0.815	0.0755	273.15
275	0.00697	1.000 - 3	181.7	7.8	2505	0.029	9.109	4.211	1.855	1652 - 6	5.09 - 6	0.574	0.0183	12.22	0.817	0.0753	275
280	0.00990	1.000 - 3	130.4	28.8	2514	0.104	8.980	4.196	1.858	1422 - 6	8.29 - 6	0.582	0.0186	10.26	0.825	0.0748	280
285	0.01387	1.000 - 3	99.4	49.8	2523	0.179	8.857	4.180	1.861	1225 - 6	8.49 - 6	0.590	0.0189	8.41	0.833	0.0743	285
290	0.01917	1.001 - 3	69.7	70.7	2532	0.251	8.740	4.184	1.864	1060 - 6	8.69 - 6	0.598	0.0193	7.56	0.841	0.0737	290
295	0.02617	1.002 - 3	51.94	91.6	2541	0.323	8.627	4.181	1.868	959 - 6	8.89 - 6	0.606	0.0195	6.82	0.849	0.0727	295
300	0.03531	1.003 - 3	39.13	112.5	2550	0.393	8.520	4.179	1.872	855 - 6	9.09 - 6	0.613	0.0196	5.83	0.857	0.0717	300
305	0.04712	1.005 - 3	27.90	133.4	2559	0.462	8.417	4.178	1.877	760 - 6	9.29 - 6	0.620	0.0201	5.20	0.865	0.0709	305
310	0.06221	1.007 - 3	22.93	154.3	2568	0.530	8.314	4.178	1.882	685 - 6	9.49 - 6	0.628	0.0204	4.82	0.873	0.0700	310
315	0.08132	1.009 - 3	17.92	175.2	2577	0.597	8.224	4.179	1.888	631 - 6	9.69 - 6	0.634	0.0207	4.16	0.883	0.0692	315
320	0.1053	1.011 - 3	13.98	196.1	2586	0.649	8.151	4.180	1.895	577 - 6	9.89 - 6	0.640	0.0210	3.77	0.894	0.0683	320
325	0.1351	1.013 - 3	11.06	217.0	2595	0.727	8.046	4.182	1.903	528 - 6	10.09 - 6	0.645	0.0213	3.42	0.901	0.0675	325
330	0.1719	1.016 - 3	8.82	237.9	2604	0.791	7.962	4.184	1.911	489 - 6	10.29 - 6	0.650	0.0217	3.15	0.906	0.0666	330
335	0.2167	1.018 - 3	7.09	258.8	2613	0.854	7.881	4.186	1.920	453 - 6	10.49 - 6	0.655	0.0220	2.88	0.916	0.0658	335
340	0.2713	1.021 - 3	5.74	279.8	2622	0.916	7.804	4.188	1.930	420 - 6	10.69 - 6	0.660	0.0223	2.66	0.925	0.0649	340
345	0.3372	1.024 - 3	4.683	300.7	2630	0.977	7.729	4.191	1.941	389 - 6	10.89 - 6	0.665	0.0226	2.45	0.933	0.0641	345
350	0.4163	1.027 - 3	3.846	321.7	2639	1.038	7.657	4.195	1.954	365 - 6	11.09 - 6	0.668	0.0230	2.29	0.942	0.0632	350
355	0.5100	1.030 - 3	3.180	342.7	2647	1.097	7.588	4.199	1.968	343 - 6	11.29 - 6	0.671	0.0233	2.14	0.951	0.0623	355
360	0.6209	1.034 - 3	2.645	363.7	2655	1.156	7.521	4.203	1.983	324 - 6	11.49 - 6	0.674	0.0237	2.02	0.960	0.0614	360
365	0.7514	1.038 - 3	2.212	384.7	2663	1.214	7.456	4.209	1.999	306 - 6	11.69 - 6	0.677	0.0241	1.91	0.969	0.0605	365

Tabla F.8b. Tabla de vapor saturado [14] (Continuación 8a).

370	0.9040	1.041 -3	1.961	495.8	2671	1.271	7.394	4.214	2.017	289 -6	11.99 -6	0.679	0.0245	1.80	0.978	0.0595	370
373.15	1.0133	1.044 -3	1.679	419.1	2676	1.307	7.356	4.217	2.029	279 -6	12.02 -6	0.680	0.0248	1.76	0.984	0.0589	373.15
375	1.0815	1.045 -3	1.574	425.8	2679	1.328	7.935	4.220	2.036	274 -6	12.09 -6	0.681	0.0249	1.70	0.987	0.0586	375
380	1.2969	1.049 -3	1.307	448.0	2687	1.384	7.275	4.226	2.057	260 -6	12.29 -6	0.683	0.0254	1.61	0.995	0.0576	380
385	1.5233	1.053 -3	1.142	469.2	2694	1.439	7.218	4.232	2.080	248 -6	12.49 -6	0.685	0.0258	1.53	1.004	0.0566	385
390	1.704	1.058 -3	0.980	490.4	2702	1.494	7.163	4.239	2.104	237 -6	12.69 -6	0.686	0.0263	1.47	1.013	0.0556	390
400	2.455	1.067 -3	0.731	532.9	2716	1.605	7.056	4.256	2.158	217 -6	13.05 -6	0.688	0.0272	1.34	1.033	0.0536	400
410	3.302	1.077 -3	0.553	575.6	2729	1.708	6.959	4.278	2.221	200 -6	13.42 -6	0.688	0.0282	1.24	1.054	0.0515	410
420	4.370	1.088 -3	0.425	618.6	2742	1.810	6.865	4.302	2.291	185 -6	13.79 -6	0.688	0.0293	1.16	1.075	0.0494	420
430	5.699	1.099 -3	0.331	661.8	2753	1.911	6.775	4.331	2.369	173 -6	14.14 -6	0.685	0.0304	1.09	1.10	0.0472	430
440	7.333	1.110 -3	0.261	705.3	2764	2.011	6.689	4.36	2.46	162 -6	14.50 -6	0.682	0.0317	1.04	1.12	0.0451	440
450	9.319	1.123 -3	0.208	749.2	2773	2.109	6.607	4.40	2.56	152 -6	14.85 -6	0.678	0.0331	0.99	1.14	0.0429	450
460	11.71	1.137 -3	0.167	793.5	2782	2.205	6.528	4.44	2.68	143 -6	15.19 -6	0.673	0.0346	0.95	1.17	0.0407	460
470	14.55	1.152 -3	0.136	838.2	2789	2.301	6.451	4.48	2.79	136 -6	15.54 -6	0.667	0.0363	0.92	1.20	0.0385	470
480	17.90	1.167 -3	0.111	883.4	2795	2.395	6.377	4.53	2.94	129 -6	15.88 -6	0.660	0.0381	0.89	1.23	0.0362	480
490	21.83	1.184 -3	0.0922	929.1	2799	2.479	6.312	4.59	3.10	124 -6	16.23 -6	0.651	0.0401	0.87	1.25	0.0339	490
500	26.40	1.203 -3	0.0766	975.6	2801	2.581	6.253	4.66	3.27	118 -6	16.59 -6	0.642	0.0423	0.86	1.28	0.0316	500
510	31.66	1.222 -3	0.0631	1023	2802	2.673	6.193	4.74	3.47	113 -6	16.95 -6	0.631	0.0447	0.85	1.31	0.0293	510
520	37.70	1.244 -3	0.0525	1071	2801	2.765	6.093	4.84	3.70	108 -6	17.33 -6	0.621	0.0475	0.84	1.35	0.0269	520
530	44.58	1.268 -3	0.0445	1119	2798	2.856	6.023	4.95	3.96	104 -6	17.72 -6	0.608	0.0505	0.85	1.39	0.0245	530
540	52.38	1.294 -3	0.0375	1170	2792	2.948	5.953	5.08	4.27	101 -6	18.1 -6	0.594	0.0540	0.86	1.43	0.0221	540
550	61.19	1.323 -3	0.0317	1220	2784	3.039	5.882	5.24	4.64	97 -6	18.6 -6	0.580	0.0583	0.87	1.47	0.0197	550
560	71.08	1.355 -3	0.0269	1273	2772	3.132	5.808	5.43	5.09	94 -6	19.1 -6	0.563	0.0637	0.90	1.52	0.0173	560
570	82.16	1.392 -3	0.0228	1328	2757	3.225	5.733	5.68	5.67	91 -6	19.7 -6	0.548	0.0698	0.94	1.59	0.0150	570
580	94.51	1.433 -3	0.0193	1384	2737	3.321	5.654	6.00	6.40	88 -6	20.4 -6	0.528	0.0767	0.99	1.66	0.0128	580
590	108.3	1.482 -3	0.0163	1443	2717	3.419	5.569	6.41	7.35	84 -6	21.5 -6	0.513	0.0841	1.05	1.74	0.0106	590
600	123.5	1.541 -3	0.0137	1506	2682	3.520	5.480	7.00	8.75	81 -6	22.7 -6	0.497	0.0929	1.14	2.15	0.0084	600
610	137.3	1.612 -3	0.0115	1573	2641	3.627	5.318	7.85	11.1	77 -6	24.1 -6	0.467	0.103	1.30	2.60	0.0063	610
620	159.1	1.705 -3	0.0094	1647	2589	3.741	5.259	9.35	15.4	72 -6	25.9 -6	0.444	0.114	1.52	3.46	0.0045	620
625	169.1	1.778 -3	0.0085	1697	2553	3.805	5.191	10.6	18.3	70 -6	27.0 -6	0.430	0.121	1.65	4.20	0.0035	625
630	179.7	1.856 -3	0.0075	1734	2515	3.875	5.115	12.6	22.1	67 -6	28.0 -6	0.412	0.130	2.0	4.8	0.0026	630
635	190.9	1.935 -3	0.0066	1783	2466	3.950	5.025	16.4	27.6	64 -6	30.0 -6	0.392	0.141	2.7	6.0	0.0015	635
640	202.7	2.075 -3	0.0057	1841	2401	4.037	4.912	26	42	59 -6	32.0 -6	0.367	0.155	4.2	9.6	0.0008	640
645	215.2	2.351 -3	0.0045	1931	2292	4.223	4.732	90	90	54 -6	37.0 -6	0.331	0.178	12	26	0.0001	645
647.31	221.2	3.170 -3	0.0032	2107	2107	4.443	4.443	∞	∞	45 -6	45.0 -6	0.238	0.238	∞	∞	0.0000	647.31

* 1 bar = 10⁵ N/m².

† Arriba de la línea horizontal, la fase condensada es sólida; abajo, es líquida.

‡ Temperatura crítica.

NOTA: Las notaciones 6.30.-11, 1.073.-3, 9.55. +9, etc., significan 6.30 × 10⁻¹¹, 1.073 × 10⁻³, 9.55 × 10⁹, etc.

Tabla F. 9. Número de tubos para intercambiadores de calor [14].

H. Tubos de 1 1/4 de in de diámetro exterior con paso triangular de 1 9/16 de in

Diámetro interno de la coraza		TEMA L o M				TEMA P o S				TEMA U		
mm	in	Número de pasos				Número de pasos				Número de pasos		
		1	2	4	6	1	2	4	6	2	4	6
203	8	15	10	8	12	13	10	4	0	6	4	6
254	10	27	22	16	12	18	20	8	12	14	12	12
305	12	38	36	26	24	33	26	26	18	28	20	18
337	13½	55	44	42	40	38	44	34	24	34	28	30
387	15½	66	64	52	50	57	58	48	44	52	48	40
438	17½	88	82	78	68	81	72	62	68	72	68	64
489	19½	117	106	98	96	100	94	86	80	90	84	78
540	21½	136	134	124	108	126	120	116	102	118	112	102
591	23½	170	164	146	148	159	146	132	132	148	132	120
635	25	198	188	166	168	183	172	150	148	172	160	152
686	27	237	228	208	192	208	206	190	180	200	188	180
737	29	268	266	242	236	249	236	224	220	242	228	216
787	31	312	304	284	276	291	282	262	256	282	264	250
838	33	357	346	322	324	333	326	298	296	326	308	292
889	35	417	396	372	364	372	368	344	336	362	344	336
940	37	446	446	422	408	425	412	384	384	416	396	384
991	39	506	490	472	464	478	468	442	432	472	444	428
1067	42	592	584	552	544	558	546	520	512	554	524	510
1143	45	680	676	646	632	646	634	606	596	636	624	592
1219	48	788	774	736	732	748	732	704	696	736	708	692
1372	54	1003	980	952	928	962	952	912	892	946	916	890
1524	60	1237	1228	1188	1152	1194	1182	1144	1116	1176	1148	1116
1676	66	1520	1496	1448	1424							
1829	72	1814	1786	1736	1724							
1981	78	2141	2116	2068	2044							
2134	84	2507	2470	2392	2372							
2286	90	2861	2840	2764	2744							
2438	96	3275	3246	3158	3156							
2743	108	4172	4136	4046	4020							
3048	120	5164	5128	5038	5000							

Tabla F. 10. Propiedades de las tuberías de acero [14].

TABLA 6-6 Propiedades de las tuberías de acero

Tamaño nominal de tub., in	Diám. exterior, in	No. de cédula	Espesor de la pared, in	Diám. interior, in	Área de corte transversal		Circunferencias, ft. o superficie, ft ² /ft de longitud		Capacidad a una velocidad de 1 ft/s		Peso de tub. de extremos lisos, en lb/ft
					Metal en in ²	Flujo en ft ²	Exterior	Interior	U.S. gal/min	Lb/h de agua	
¾	0.405	10S	.049	0.307	0.055	0.00051	0.106	0.0804	0.231	115.5	0.19
		40ST, 40S	.068	.269	.072	.00040	.106	.0705	.179	89.5	.24
		80XS, 80S	.095	.215	.093	.00025	.106	.0563	.113	56.5	.31
¾	0.540	10S	.065	.410	.097	.00092	.141	.107	.412	206.5	.33
		40ST, 40S	.088	.364	.125	.00072	.141	.095	.323	161.5	.42
		80XS, 80S	.119	.302	.157	.00050	.141	.079	.224	112.0	.54
¾	0.675	10S	.065	.545	.125	.00162	.177	.143	.727	363.5	.42
		40ST, 40S	.091	.493	.167	.00133	.177	.129	.596	298.0	.57
		80XS, 80S	.126	.423	.217	.00095	.177	.111	.440	220.0	.74
¾	0.840	5S	.065	.710	.158	.00275	.220	.186	1.234	617.0	.54
		10S	.083	.674	.197	.00248	.220	.176	1.112	556.0	.67
		40ST, 40S	.109	.622	.250	.00211	.220	.163	0.945	472.0	.85
		80XS, 80S	.147	.546	.320	.00163	.220	.143	0.730	365.0	1.09
		160	.188	.464	.385	.00117	.220	.122	0.527	263.5	1.31
		XX	.294	.252	.504	.00035	.220	.066	0.155	77.5	1.71
¾	1.050	5S	.065	.920	.201	.00461	.275	.241	2.072	1036.0	0.69
		10S	.083	.884	.252	.00426	.275	.231	1.903	951.5	0.86
		40ST, 40S	.113	.824	.333	.00371	.275	.216	1.665	832.5	1.13
		80XS, 80S	.154	.742	.433	.00300	.275	.194	1.345	672.5	1.47
		160	.219	.612	.572	.00204	.275	.160	0.917	458.5	1.94
		XX	.308	.434	.718	.00103	.275	.114	0.461	230.5	2.44
1	1.315	5S	.065	1.185	.255	.00768	.344	.310	3.449	1725	0.87
		10S	.109	1.097	.413	.00656	.344	.287	2.946	1473	1.40
		40ST, 40S	.133	1.049	.494	.00600	.344	.275	2.690	1345	1.68
		80XS, 80S	.179	0.957	.639	.00499	.344	.250	2.240	1120	2.17
		160	.250	0.815	.836	.00362	.344	.213	1.625	812.5	2.84
		XX	.358	0.599	1.076	.00196	.344	.157	0.878	439.0	3.66
1½	1.660	5S	.065	1.530	0.326	.01277	.435	.401	5.73	2865	1.11
		10S	.109	1.442	0.531	.01134	.435	.378	5.09	2545	1.81
		40ST, 40S	.140	1.380	0.668	.01040	.435	.361	4.57	2285	2.27
		80XS, 80S	.191	1.278	0.881	.00891	.435	.335	3.99	1995	3.00
		160	.250	1.160	1.107	.00734	.435	.304	3.29	1645	3.76
		XX	.382	0.896	1.534	.00438	.435	.235	1.97	985	5.21
1½	1.900	5S	.065	1.770	0.375	.01709	.497	.463	7.67	3835	1.28
		10S	.109	1.682	0.614	.01543	.497	.440	6.94	3465	2.09
		40ST, 40S	.145	1.610	0.800	.01414	.497	.421	6.34	3170	2.72
		80XS, 80S	.200	1.500	1.069	.01225	.497	.393	5.49	2745	3.63
		160	.281	1.338	1.429	.00976	.497	.350	4.38	2190	4.86
		XX	.400	1.100	1.885	.00660	.497	.288	2.96	1480	6.41
2	2.375	5S	.065	2.245	0.472	.02749	.622	.588	12.34	6170	1.61
		10S	.109	2.157	0.776	.02538	.622	.565	11.39	5695	2.64
		40ST, 40S	.154	2.067	1.075	.02330	.622	.541	10.45	5225	3.85
		80ST, 80S	.218	1.939	1.477	.02050	.622	.508	9.20	4600	5.02
		160	.344	1.687	2.195	.01552	.622	.436	6.97	3485	7.46
		XX	.436	1.503	2.656	.01232	.622	.393	5.53	2765	9.03
2½	2.875	5S	.083	2.709	0.728	.04003	.753	.709	17.97	8985	2.48
		10S	.120	2.635	1.039	.03787	.753	.690	17.00	8500	3.53
		40ST, 40S	.203	2.469	1.704	.03322	.753	.647	14.92	7460	5.79
		80XS, 80S	.276	2.323	2.254	.02942	.753	.608	13.20	6600	7.66
		160	.375	2.125	2.945	.02463	.753	.556	11.07	5535	10.01
		XX	.552	1.771	4.028	.01711	.753	.464	7.68	3840	13.69
3	3.500	5S	.083	3.334	0.891	.06063	.916	.873	27.21	13,605	3.03
		10S	.120	3.260	1.274	.05796	.916	.853	26.02	13,010	4.33
		40ST, 40S	.216	3.068	2.228	.05130	.916	.803	23.00	11,500	7.58
		80XS, 80S	.300	2.900	3.016	.04587	.916	.759	20.55	10,275	10.25
		160	.438	2.624	4.213	.03755	.916	.687	16.86	8430	14.32
		XX	.600	2.300	5.466	.02885	.916	.602	12.95	6475	18.58
3½	4.0	5S	.083	3.834	1.021	.08017	1.047	1.004	35.98	17,990	3.48
		10S	.120	3.760	1.463	.07711	1.047	0.984	34.61	17,305	4.97
		40ST, 40S	.226	3.548	2.680	.06870	1.047	0.929	30.80	15,400	9.11
		80XS, 80S	.318	3.364	3.678	.06170	1.047	0.881	27.70	13,850	12.50
4	4.5	5S	.083	4.334	1.152	.10245	1.178	1.135	46.0	23,000	3.92
		10S	.120	4.260	1.651	.09898	1.178	1.115	44.4	22,200	5.61
		40ST, 40S	.237	4.026	3.17	.08840	1.178	1.054	39.6	19,800	10.79
		80XS, 80S	.337	3.826	4.41	.07986	1.178	1.002	35.8	17,900	14.98

Tabla F.10. Propiedades de las tuberías de acero [14] (Continuación).

TABLA 6-6 Propiedades de las tuberías de acero (Continuación)											
Tamaño nominal de tub., in	Diám. exterior, in	No. de cédula	Espesor de la pared, in	Diám. interior, in	Área de corte transversal		Circunferencias, ft, o superficie, ft ² /ft de longitud		Capacidad a una velocidad de 1 ft/s		Peso de tub. de extremos lisos, en lb/ft
					Metal en in ²	Flujo en ft ²	Exterior	Interior	U.S. gal/min	Lb/h de agua	
5	5.563	120	.438	3.624	5.58	.07170	1.176	0.949	32.2	16,100	19.00
		160	.531	3.438	6.62	.06647	1.178	0.900	28.9	14,450	22.51
		XX	.674	3.152	8.10	.05419	1.178	0.825	24.3	12,150	27.54
		5S	.109	5.345	1.87	.1558	1.456	1.399	69.9	34,950	6.36
		10S	.134	5.295	2.29	.1529	1.456	1.386	68.6	34,300	7.77
		40ST, 40S	.258	5.047	4.30	.1390	1.456	1.321	62.3	31,150	14.62
		80XS, 80S	.375	4.813	6.11	.1263	1.456	1.260	57.7	28,850	20.78
		120	.500	4.563	7.95	.1136	1.456	1.195	51.0	25,500	27.04
		160	.625	4.313	9.70	.1015	1.456	1.129	45.5	22,750	32.96
		XX	.750	4.063	11.34	.0900	1.456	1.064	40.4	20,200	38.55
6	6.625	5S	0.109	6.407	2.23	0.2239	1.734	1.677	100.5	50,250	7.60
		10S	.134	6.357	2.73	.2204	1.734	1.664	98.9	49,450	9.29
		40ST, 40S	.280	6.065	5.58	.2006	1.734	1.588	90.0	45,000	18.97
		80XS, 80S	.432	5.761	8.40	.1810	1.734	1.508	81.1	40,550	28.57
		120	.562	5.501	10.70	.1650	1.734	1.440	73.9	36,950	36.39
		160	.719	5.187	13.34	.1467	1.734	1.358	65.9	32,950	45.34
		XX	.864	4.897	15.64	.1308	1.734	1.282	58.7	29,950	53.16
		5S	.109	8.407	2.915	.3855	2.258	2.201	173.0	86,500	9.93
		10S	.148	8.329	3.941	.3784	2.258	2.180	169.8	84,900	13.40
		20	.250	8.125	6.578	.3601	2.258	2.127	161.5	80,750	22.36
8	8.625	30	.277	8.071	7.265	.3553	2.258	2.113	159.4	79,700	24.70
		40ST, 40S	.322	7.981	8.399	.3474	2.258	2.089	155.7	77,850	28.55
		60	.406	7.813	10.48	.3329	2.258	2.045	149.4	74,700	35.64
		80XS, 80S	.500	7.625	12.76	.3171	2.258	1.996	142.3	71,150	43.39
		100	.594	7.437	14.99	.3017	2.258	1.947	135.4	67,700	50.95
		120	.719	7.187	17.86	.2817	2.258	1.882	126.4	63,200	60.71
		140	.812	7.001	19.93	.2673	2.258	1.833	120.0	60,000	67.76
		XX	.875	6.875	21.30	.2578	2.258	1.800	115.7	57,850	72.42
		160	.906	6.813	21.97	.2532	2.258	1.784	113.5	56,750	74.69
		10	10.75	5S	.134	10.482	4.47	.5993	2.814	2.744	269.0	134,500	15.19
10S	.165			10.420	5.49	.5922	2.814	2.728	265.8	132,900	18.65
20	.250			10.250	8.25	.5731	2.814	2.685	257.0	128,500	28.04
30	.307			10.136	10.07	.5603	2.814	2.655	252.0	126,000	34.24
40ST, 40S	.365			10.020	11.91	.5475	2.814	2.620	246.0	123,000	40.48
80S, 60XS	.500			9.750	16.10	.5185	2.814	2.550	233.0	116,500	54.74
80	.594			9.562	18.95	.4967	2.814	2.503	223.4	111,700	64.43
100	.719			9.312	22.66	.4729	2.814	2.438	212.3	106,150	77.03
120	.844			9.062	26.27	.4479	2.814	2.372	201.0	100,500	89.29
140, XX	1.000			8.750	30.63	.4176	2.814	2.291	188.0	94,000	104.13
12	12.75	160	1.125	8.500	34.02	.3941	2.814	2.225	177.0	88,500	115.64
		5S	0.156	12.438	6.17	.8438	3.338	3.26	378.7	189,350	20.98
		10S	0.180	12.390	7.11	.8373	3.338	3.24	375.8	187,900	24.17
		20	0.250	12.250	9.82	.8185	3.338	3.21	367.0	183,500	33.38
		30	0.330	12.090	12.88	.7972	3.338	3.17	358.0	179,000	43.77
		ST, 40S	0.375	12.000	14.58	.7854	3.338	3.14	352.5	176,250	49.56
		40	0.406	11.938	15.74	.7773	3.338	3.13	349.0	174,500	53.52
		XS, 80S	0.500	11.750	19.24	.7530	3.338	3.08	338.0	169,000	65.42
		60	0.562	11.626	21.52	.7372	3.338	3.04	331.0	165,500	73.15
		80	0.688	11.374	26.07	.7056	3.338	2.98	316.7	158,350	88.63
14	14	100	0.844	11.062	31.57	.6674	3.338	2.90	299.6	149,800	107.32
		120, XX	1.000	10.750	36.91	.6303	3.338	2.81	283.0	141,500	125.49
		140	1.125	10.500	41.09	.6013	3.338	2.75	270.0	135,000	139.67
		160	1.312	10.126	47.14	.5592	3.338	2.65	251.0	125,500	160.27
		5S	0.156	13.688	6.78	1.0219	3.665	3.58	459	229,500	23.07
		10S	0.188	13.624	8.16	1.0125	3.665	3.57	454	227,000	27.73
		10	0.250	13.500	10.80	0.9940	3.665	3.53	446	223,000	36.71
		20	0.312	13.376	13.42	0.9750	3.665	3.50	438	219,000	45.61
		30, ST	0.375	13.250	16.05	0.9575	3.665	3.47	430	215,000	54.57
		40	0.438	13.124	18.66	0.9397	3.665	3.44	422	211,000	63.44
16	16	XS	0.500	13.000	21.21	0.9218	3.665	3.40	414	207,000	72.09
		60	0.594	12.812	25.02	0.8957	3.665	3.35	402	201,000	85.05
		80	0.750	12.500	31.22	0.8522	3.665	3.27	382	191,000	106.13
		100	0.938	12.124	38.49	0.8017	3.665	3.17	360	180,000	130.85
		120	1.094	11.812	44.36	0.7610	3.665	3.09	342	171,000	150.79
		140	1.250	11.500	50.07	0.7213	3.665	3.01	324	162,000	170.21
		160	1.406	11.188	55.63	0.6827	3.665	2.93	306	153,000	189.11
		5S	0.165	15.670	8.21	1.3393	4.189	4.10	601	300,500	27.90
		10S	0.188	15.624	9.34	1.3314	4.189	4.09	598	299,000	31.75
		10	0.250	15.500	12.37	1.3104	4.189	4.06	587	293,500	42.05

Tabla F. 10. Propiedades de las tuberías de acero [14] (Continuación).

TABLA 6-6 Propiedades de las tuberías de acero (Continuación)

Tamaño nominal de tub., in	Diám. exterior, in	No. de cédula	Espesor de la pared, in	Inside Diám. interior, in	Área de corte transversal		Circunferencias, ft, o superficie, ft ² /ft de longitud		Capacidad a una velocidad de 1 ft/s		Peso de tub. de extremos lisos, en lb/ft
					Metal en in ²	Flujo en ft ²	Exterior	Interior	U.S. gal/min	Lb/h de agua	
18	18	20	0.312	15.376	15.38	1.2985	4.189	4.03	578	289.000	52.27
		30, ST	0.375	15.250	18.41	1.2680	4.189	3.99	568	284.000	62.58
		40, XS	0.500	15.000	24.35	1.2272	4.189	3.93	550	275.000	82.77
		60	0.656	14.688	31.62	1.1766	4.189	3.85	528	264.000	107.50
		80	0.844	14.312	40.19	1.1171	4.189	3.75	501	250.500	136.61
		100	1.031	13.938	48.48	1.0596	4.189	3.65	474	237.000	164.82
		120	1.219	13.562	56.61	1.0032	4.189	3.55	450	225.000	192.43
		140	1.438	13.124	65.79	0.9394	4.189	3.44	422	211.000	223.64
		160	1.594	12.812	72.14	0.8953	4.189	3.35	402	201.000	245.25
		5S	0.165	17.670	9.25	1.7029	4.712	4.63	764	382.000	31.43
		10S	0.188	17.624	10.52	1.6941	4.712	4.61	760	379.400	35.76
		10	0.250	17.500	13.94	1.6703	4.712	4.58	750	375.000	47.39
		20	0.312	17.376	17.34	1.6468	4.712	4.55	739	369.500	58.94
		ST	0.375	17.250	20.76	1.6230	4.712	4.52	728	364.000	70.59
		30	0.438	17.124	24.16	1.5993	4.712	4.48	718	359.000	82.15
		XS	0.500	17.000	27.49	1.5763	4.712	4.45	707	353.500	93.45
		40	0.562	16.876	30.79	1.5533	4.712	4.42	697	348.500	104.67
		60	0.750	16.500	40.64	1.4849	4.712	4.32	666	333.000	138.17
		80	0.938	16.124	50.28	1.4180	4.712	4.22	636	318.000	170.92
		100	1.156	15.688	61.17	1.3423	4.712	4.11	602	301.000	207.96
120	1.375	15.250	71.82	1.2684	4.712	3.99	569	284.500	244.14		
140	1.562	14.876	80.66	1.2070	4.712	3.89	540	270.000	274.22		
160	1.781	14.438	90.75	1.1370	4.712	3.78	510	255.000	308.50		
20	20	5S	0.188	19.624	11.70	2.1004	5.236	5.14	943	471.500	39.78
		10S	.218	19.564	13.55	2.0878	5.236	5.12	937	467.500	46.06
		10	.250	19.500	15.51	2.0740	5.236	5.11	930	465.000	52.73
		20, ST	.375	19.250	23.12	2.0211	5.236	5.04	902	451.000	78.60
		30, XS	.500	19.000	30.63	1.9689	5.236	4.97	883	441.500	104.13
		40	.594	18.812	36.21	1.9302	5.236	4.92	866	433.000	123.11
		60	.812	18.376	48.95	1.8417	5.236	4.81	826	413.000	166.40
		80	1.031	17.938	61.44	1.7550	5.236	4.70	787	393.500	208.87
		100	1.281	17.438	75.33	1.6585	5.236	4.57	744	372.000	256.10
		120	1.500	17.000	87.18	1.5763	5.236	4.45	707	353.500	296.37
		140	1.750	16.500	100.3	1.4849	5.236	4.32	665	332.500	341.09
		160	1.969	16.062	111.5	1.4071	5.236	4.21	632	316.000	397.17
24	24	5S	0.218	23.564	16.29	3.0285	6.283	6.17	1359	679.500	55.37
		10, 10S	0.250	23.500	18.65	3.012	6.283	6.15	1350	675.000	63.41
		20, ST	0.375	23.250	27.83	2.948	6.283	6.09	1325	662.500	94.62
		XS	0.500	23.000	36.90	2.885	6.283	6.02	1295	642.500	125.49
		30	0.562	22.876	41.39	2.854	6.283	5.99	1281	640.500	140.68
		40	0.688	22.624	50.39	2.792	6.283	5.92	1253	626.500	171.29
		60	0.969	22.062	70.11	2.655	6.283	5.78	1192	596.000	238.35
		80	1.219	21.562	87.24	2.536	6.283	5.64	1138	569.000	296.58
		100	1.531	20.938	108.1	2.391	6.283	5.48	1073	536.500	367.39
		120	1.812	20.376	126.3	2.264	6.283	5.33	1016	508.000	429.39
		140	2.062	19.876	142.1	2.155	6.283	5.20	965	482.500	483.12
		160	2.344	19.312	159.5	2.034	6.283	5.06	913	456.500	542.13
30	30	5S	0.250	29.500	23.37	4.746	7.854	7.72	2130	1,065,000	79.43
		10, 10S	0.312	29.376	29.10	4.707	7.854	7.69	2110	1,055,000	98.93
		ST	0.375	29.250	34.90	4.666	7.854	7.66	2094	1,048,000	118.65
		20, XS	0.500	29.000	46.34	4.587	7.854	7.59	2055	1,027,500	157.53
		30	0.625	28.750	57.68	4.508	7.854	7.53	2020	1,010,000	196.08

5S, 10S y 40S se compilaron de Stainless Steel Pipe, ANSI B36. 19-1976, con autorización del editor, la American Society of Mechanical Engineers, New York. ST = pared estándar, XS = pared extrafuerte, XX = pared extrafuerte doble y los números de cédula 10 a 160 se compilaron de Wrought-Steel and Wrought-Iron Pipe ANSI B36. 10-1975, con autorización del mismo editor. Los espesores decimales para tamaños de tuberías representan sus dimensiones de paredes promedio o nominales. Se permiten tolerancias de fabricación hasta $\pm 12 \frac{1}{2} \%$.

Se producen tuberías de extremos lisos mediante un corte a escuadra. También se envían tuberías desde las fábricas con roscas, un acoplamiento roscado en un extremo o con extremos biselados para soldar o estriados y dimensionados para acoplamientos patentados. Los pesos por pie para tuberías roscadas y acopladas son ligeramente mayores debido al peso del acoplamiento, pero no existe en tamaños mayores de 12 in o más ligeros que el número de cédula 30 de 8 a 12 in o de cédula 40 de 6 in y menores.

Para convertir pulgadas en milímetros, multiplíquese por 25.4; para convertir pulgadas cuadradas en milímetros cuadrados, multiplíquese por 645; para convertir pies cuadrados en metros cuadrados, multiplíquese por 0.0929; para convertir libras por pie en kilogramos/m, multiplíquese por 1.49; para convertir galones en metros cúbicos, multiplíquese por 3.7854×10^{-3} ; para convertir libras en kilogramos, multiplíquese por 0.4536.

Tabla F. 11. Pérdidas en codos y accesorios [38] (Longitud equivalente en tubería recta, en pies).

Diámetro interno tubo (in)	1	2	3	4	5	6	8	10	12	14	16	18	20	24
Codo 90°	2-2,5	4-5	6-7	8-10	10-11	12-14	18	27	26	31	35	40	45	52
Codo largo de 90°	1,5-2	2,5-4	5	6-7	7-8	9-11	12-14	16-17	20	23	27	30	34	40
Codo de 45°	1,5	2,5	3,5	4,5	6	7,5	10	12,5	15	17	19	21	23	28
Codo largo de 45°	1	1,5	2	2,7	3,5	4	5	6	7	9	10	12	14	16
Curva de 180°	-	-	-	-	-	36	46	60	75	-	-	-	-	-
Curva de 180°, de gran radio	-	-	-	-	-	20	25	30	40	-	-	-	-	-
Curvas de 90° soldadas 0,5	-	7	10	12	15	19	25	32	38	44	50	56	-	-
1	-	3	5	6	7	8	11	14	17	20	23	26	-	-
1,5	-	2	3	4	5	6	8	10	12	14	16	18	-	-
2	-	1	2	3	3,5	4	6	8	10	12	14	16	-	-
3	-	1	1,5	2,5	3	4	6	7	9	11	13	15	-	-
Tes	5,5	10	15	20	25	32	41	55	65	75	85	100	115	130
Válvula de compuerta abierta	0,6	1,25	1,7	2,3	2,9	3,5	4,5	6	7	8	9	10	12	14
cerrada 1/4	-	7	10	13	16	19	26	33	40	-	-	-	-	-
Cerrada 1/2	-	33	50	70	85	100	130	160	190	-	-	-	-	-
cerrada 3/4	-	140	200	280	340	400	540	700	800	-	-	-	-	-
Válvula esférica	27	56	80	107	133	160	215	270	320	375	430	480	540	640
Válvula de retención	7	13	20	27	33	40	53	67	80	93	107	120	135	160
Válvula de pie	2	4	8	8	10	12	16	20	24	28	32	36	40	48
Colador	4	5	6	8	10	11	13	16	18	21	24	30	35	40
Entrada típica	1,5	3	4,5	8	7,5	9	12	15	18	21	24	27	30	35

Figura F.1. Aletas eficacia [37].

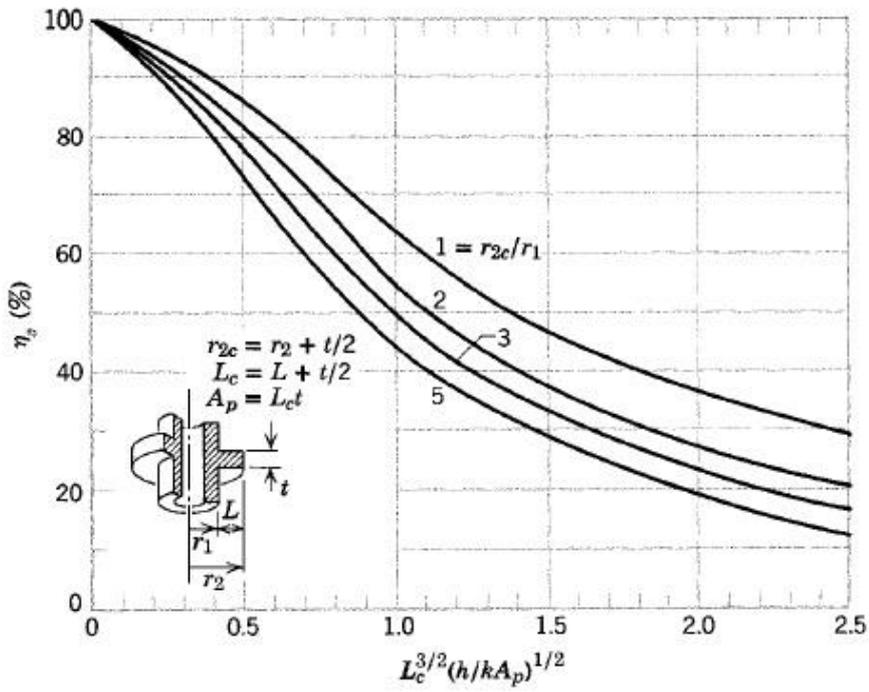


Figura F.2. Factor F para el tamaño óptimo de recipiente [35].

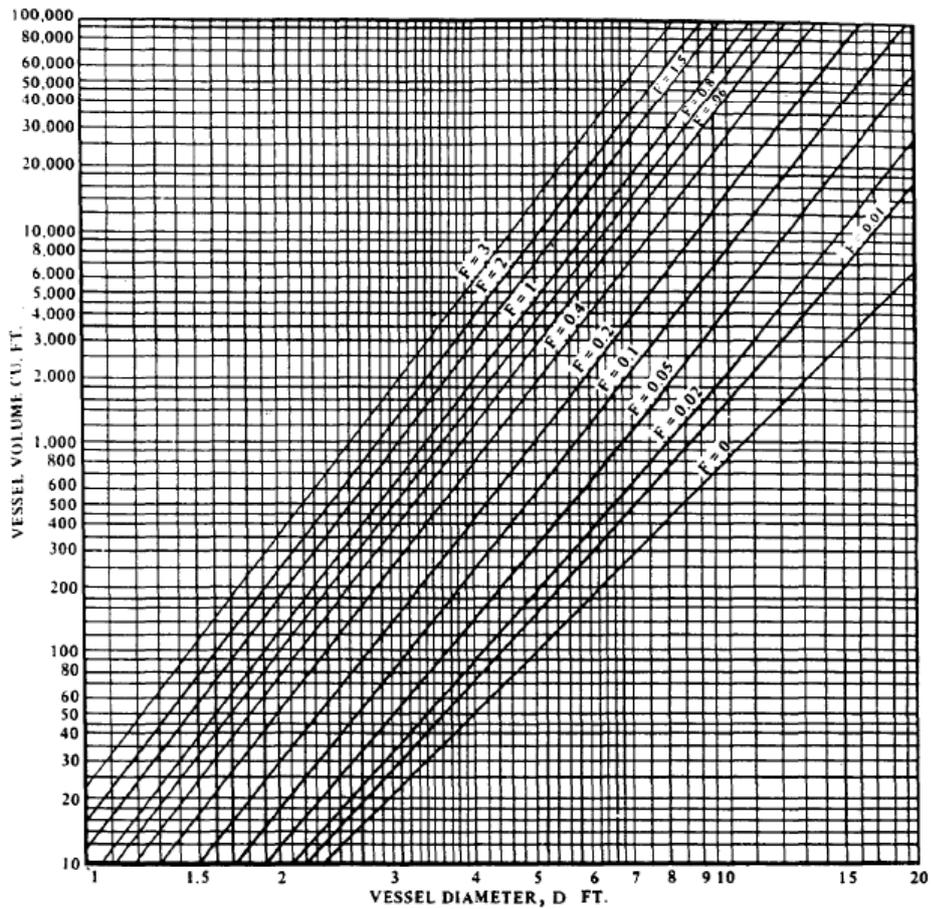
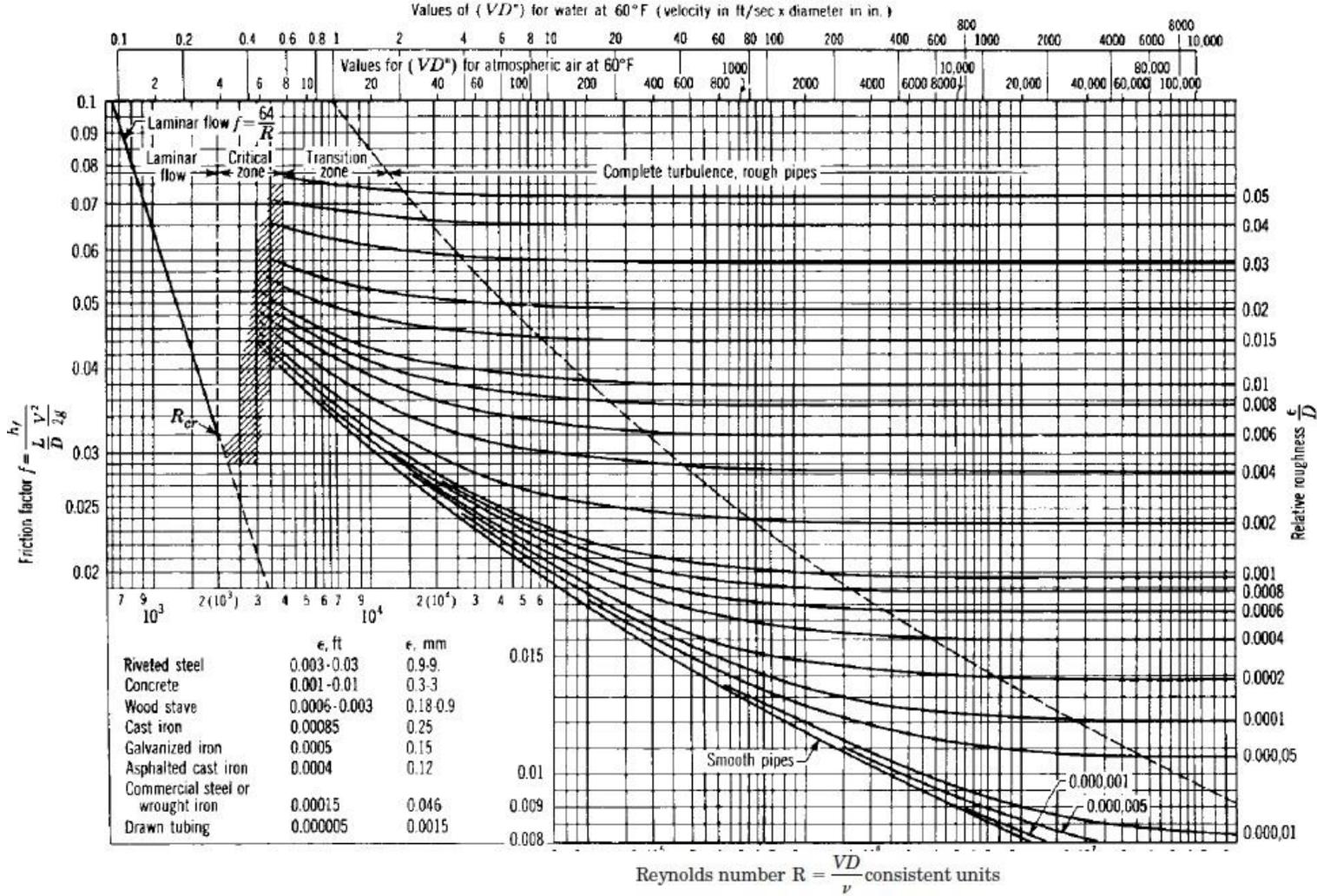


CHART FOR DETERMINING THE OPTIMUM VESSEL SIZE

Figura F. 3. Ábaco de Moody [29].



ANEXO G: Fichas de seguridad y catálogos.

Fichas Internacionales de Seguridad Química

ÁCIDO C10-13 ALQUILBENCENOSULFÓNICO, SALES DE SODIO		ICSC: 1602
		Octubre 2005
Alquilbenceno sulfonato sódico Ácido lineal alquilbencenosulfónico, sal sódica Lineal alquilbenceno sulfonato sódico LAS		
CAS:	68411-30-3	$C_{11.6}H_{24.2}C_6H_4SO_3Na$
CE / EINECS:	270-115-0	Masa molecular: 342,4

TIPO DE PELIGRO / EXPOSICIÓN	PELIGROS AGUDOS / SÍNTOMAS	PREVENCIÓN	PRIMEROS AUXILIOS / LUCHA CONTRA INCENDIOS
INCENDIO	No combustible. En caso de incendio se desprenden humos (o gases) tóxicos e irritantes.		En caso de incendio en el entorno: están permitidos todos los agentes extintores.
EXPLOSIÓN			

EXPOSICIÓN			
Inhalación	Tos. Dolor de garganta.	Extracción localizada o protección respiratoria.	Aire limpio, reposo.
Piel	Enrojecimiento. Dolor.	Guantes protectores.	Aclarar la piel con agua abundante o ducharse.
Ojos	Enrojecimiento. Dolor. Quemaduras.	Gafas ajustadas de seguridad.	Enjuagar con agua abundante durante varios minutos (quitar las lentes de contacto si puede hacerse con facilidad), después proporcionar asistencia médica.
Ingestión	Diarrea. Náuseas. Vómitos.	No comer, ni beber, ni fumar durante el trabajo.	Enjuagar la boca. NO provocar el vómito.

DERRAMES Y FUGAS	ENVASADO Y ETIQUETADO
Protección personal adicional: respirador de filtro P2 contra partículas nocivas. NO permitir que este producto químico se incorpore al ambiente. Barrer la sustancia derramada e introducirla en un recipiente; si fuera necesario, humedecer el polvo para evitar su dispersión.	
RESPUESTA DE EMERGENCIA	ALMACENAMIENTO
	Almacenar en un área sin acceso a desagües o alcantarillas. Separado de ácidos.

 IPCS International Programme on Chemical Safety	 WHO	 ILO	 UNEP		 MINISTERIO DE TRABAJO E INMIGRACIÓN	 INSTITUTO NACIONAL DE SEGURIDAD E HIGIENE EN EL TRABAJO
---	--	--	---	---	---	--

Preparada en el Contexto de Cooperación entre el IPCS y la Comisión Europea © CE, IPCS, 2006

VÉASE INFORMACIÓN IMPORTANTE AL DORSO

Fichas Internacionales de Seguridad Química

ÁCIDO C10-13-ALQUILBENCENOSULFÓNICO, SALES DE SODIO **ICSC: 1602**

DATOS IMPORTANTES	
<p>ESTADO FÍSICO; ASPECTO: Sólido en diversas formas.</p> <p>PELIGROS QUÍMICOS: La sustancia se descompone al calentarla intensamente, produciendo humos tóxicos y corrosivos, incluyendo óxidos de azufre. Reacciona con ácidos, produciendo humos tóxicos y corrosivos, incluyendo óxidos de azufre.</p> <p>LÍMITES DE EXPOSICIÓN: TLV no establecido. MAK no establecido.</p>	<p>VÍAS DE EXPOSICIÓN: La sustancia se puede absorber por ingestión.</p> <p>RIESGO DE INHALACIÓN: Puede alcanzarse rápidamente una concentración nociva de partículas suspendidas en el aire cuando se dispersa.</p> <p>EFFECTOS DE EXPOSICIÓN DE CORTA DURACIÓN: La sustancia irrita la piel y el tracto respiratorio y es corrosiva para los ojos.</p>
PROPIEDADES FÍSICAS	
<p>Punto de ebullición: 637 °C Punto de fusión: 277 °C Densidad relativa (agua = 1): 1,06 Solubilidad en agua, g/100 ml a 20 °C: 25 Presión de vapor: despreciable</p>	<p>Coefficiente de reparto octanol/agua como log Pow: 3,32</p>
DATOS AMBIENTALES	
<p>La sustancia es tóxica para los organismos acuáticos.</p>	
NOTAS	
<p>La sustancia se vende generalmente como un concentrado del 50%. La cadena alquílica lineal tiene habitualmente de 10 a 13 átomos de carbono, aproximadamente en la siguiente relación molar (porcentaje de longitud de cadena alquílica relativa al componente total) C10:C11:C12:C13=13:30:33:24. Las formulaciones de los alquilbencenos sulfonatos lineales disponibles en EEUU contienen también un 0,5% del componente C14.</p>	
INFORMACIÓN ADICIONAL	
Nota legal	<p>Esta ficha contiene la opinión colectiva del Comité Internacional de Expertos del IPCS y es independiente de requisitos legales. Su posible uso no es responsabilidad de la CE, el IPCS, sus representantes o el INSHT, autor de la versión española.</p>
© IPCS, CE 2006	

Fichas Internacionales de Seguridad Química

BENCENO		ICSC: 0015 Mayo 2003	
CAS: 71-43-2 RTECS: CY1400000 NU: 1114 CE Índice Anexo I: 601-020-00-8 CE / EINECS: 200-753-7		Ciclohexatrieno Benzol C_6H_6 Masa molecular: 78.1	
		 	
TIPO DE PELIGRO / EXPOSICIÓN	PELIGROS AGUDOS / SÍNTOMAS	PREVENCIÓN	PRIMEROS AUXILIOS / LUCHA CONTRA INCENDIOS
INCENDIO	Altamente inflamable.	Evitar las llamas. NO producir chispas y NO fumar.	Polvo. AFFF, espuma, dióxido de carbono
EXPLOSIÓN	Las mezclas vapor/aire son explosivas. Riesgo de incendio y explosión: véanse Peligros Químicos.	Sistema cerrado, ventilación, equipo eléctrico y de alumbrado a prueba de explosión. NO utilizar aire comprimido para llenar, vaciar o manipular. Utilícense herramientas manuales no generadoras de chispas. Evitar la generación de cargas electrostáticas (por ejemplo, mediante conexión a tierra).	En caso de incendio: mantener fríos los bidones y demás instalaciones rociando con agua.
EXPOSICIÓN		¡EVITAR TODO CONTACTO!	
Inhalación	Vértigo. Somnolencia. Dolor de cabeza. Náuseas. Jadeo. Convulsiones. Pérdida del conocimiento.	Ventilación, extracción localizada o protección respiratoria.	Aire limpio, reposo. Proporcionar asistencia médica.
Piel	PUEDA ABSORBERSE! Piel seca. Enrojecimiento. Dolor. (Además, véase Inhalación).	Guantes de protección. Traje de protección.	Quitar las ropas contaminadas. Aclarar la piel con agua abundante o ducharse. Proporcionar asistencia médica.
Ojos	Enrojecimiento. Dolor.	Pantalla facial, o protección ocular combinada con la protección respiratoria.	Enjuagar con agua abundante durante varios minutos (quitar las lentes de contacto si puede hacerse con facilidad), después proporcionar asistencia médica.
Ingestión	Dolor abdominal. Dolor de garganta. Vómitos. (para mayor información, véase Inhalación).	No comer, ni beber, ni fumar durante el trabajo.	Enjuagar la boca. NO provocar el vómito. Proporcionar asistencia médica.
DERRAMES Y FUGAS		ENVASADO Y ETIQUETADO	
Eliminar toda fuente de ignición. Recoger, en la medida de lo posible, el líquido que se derrama y el ya derramado en recipientes herméticos. Absorber el líquido residual en arena o absorbente inerte y trasladarlo a un lugar seguro. NO verterlo al alcantarillado. NO permitir que este producto químico se incorpore al ambiente. (Protección personal adicional: traje de protección completa incluyendo equipo autónomo de respiración).		No transportar con alimentos y piensos. Clasificación UE Símbolo: F, T R: 45-46-11-36/38-48/23/24/25-65 S: 53-45 Nota: E Clasificación NU Clasificación de Peligros NU: 3 Grupo de Envasado NU: II	
RESPUESTA DE EMERGENCIA		ALMACENAMIENTO	
Ficha de emergencia de transporte (Transport Emergency Card): TEC (R)-30S1114/30GF1-II Código NFPA: H 2; F 3; R 0;		A prueba de incendio. Separado de alimentos y piensos, oxidantes y halógenos.	
Preparada en el Contexto de Cooperación entre el IPCS y la Comisión Europea © CE, IPCS, 2005			
      			

VÉASE INFORMACIÓN IMPORTANTE AL DORSO

Fichas Internacionales de Seguridad Química

BENCENO		ICSC: 0015
DATOS IMPORTANTES		
<p>ESTADO FÍSICO: ASPECTO Líquido incoloro, de olor característico.</p> <p>PELIGROS FÍSICOS El vapor es más denso que el aire y puede extenderse a ras del suelo; posible ignición en punto distante. Como resultado del flujo, agitación, etc., se pueden generar cargas electrostáticas.</p> <p>PELIGROS QUÍMICOS Reacciona violentamente con oxidantes, ácido nítrico, ácido sulfúrico y halógenos, originando peligro de incendio y explosión. Ataca plásticos y caucho.</p> <p>LÍMITES DE EXPOSICIÓN TLV: 0.5 ppm como TWA; 2.5 ppm como STEL; (piel): A1; BEI establecido (ACGIH 2004). MAK: H; Cancerígeno clase: 1; Mutágeno clase: 3A; (DFG 2004).</p>	<p>VÍAS DE EXPOSICIÓN La sustancia se puede absorber por inhalación, a través de la piel y por ingestión.</p> <p>RIESGO DE INHALACIÓN Por evaporación de esta sustancia a 20°C se puede alcanzar muy rápidamente una concentración nociva en el aire.</p> <p>EFFECTOS DE EXPOSICIÓN DE CORTA DURACIÓN La sustancia irrita los ojos, la piel y el tracto respiratorio. La ingestión del líquido puede dar lugar a la aspiración del mismo por los pulmones y la consiguiente neumonitis química. La sustancia puede causar efectos en el sistema nervioso central, dando lugar a disminución de la consciencia. La exposición muy por encima del OEL puede producir pérdida del conocimiento y muerte.</p> <p>EFFECTOS DE EXPOSICIÓN PROLONGADA O REPETIDA El líquido desengrasa la piel. La sustancia puede afectar a la médula ósea y al sistema inmune, dando lugar a una disminución de células sanguíneas. Esta sustancia es carcinógena para los seres humanos.</p>	
PROPIEDADES FÍSICAS		
<p>Punto de ebullición: 80°C Punto de fusión: 6°C Densidad relativa (agua = 1): 0.88 Solubilidad en agua, g/100 ml a 25°C: 0.18 Presión de vapor, kPa a 20°C: 10 Densidad relativa de vapor (aire = 1): 2.7</p>	<p>Densidad relativa de la mezcla vapor/aire a 20°C (aire = 1): 1.2 Punto de inflamación: -11°C c.c. Temperatura de autoignición: 498°C Límites de explosividad, % en volumen en el aire: 1.2-8.0 Coeficiente de reparto octanol/agua como log Pow: 2.13</p>	
DATOS AMBIENTALES		
La sustancia es muy tóxica para los organismos acuáticos.		
NOTAS		
El consumo de bebidas alcohólicas aumenta el efecto nocivo. Está indicado examen médico periódico dependiendo del grado de exposición. La alerta por el olor es insuficiente. Esta ficha ha sido parcialmente actualizada en octubre de 2004: ver Clasificación UE.		
INFORMACIÓN ADICIONAL		
<p>Límites de exposición profesional (INSHT 2011): VLA-ED: 1 ppm; 3.25 mg/m³ C1A (Sustancia carcinogénica de categoría 1A), M1B (Sustancia mutagénica de categoría 1B).</p> <p>Notas: vía dérmica. Es de aplicación el RD 1124/2000, por el que se modifica el RD 665/1997 de agentes cancerígenos. Esta sustancia tiene establecidas restricciones a la fabricación, comercialización o al uso especificadas en el Reglamento REACH.</p> <p>VLB: 0,045 mg/g creatinina en orina de ácido S-Fenilmercaptúrico; 2 mg/L en orina de ácido t,t-Mucónico; 5 µg/L en sangre de benceno total.</p>		
NOTA LEGAL	Esta ficha contiene la opinión colectiva del Comité Internacional de Expertos del IPCS y es independiente de requisitos legales. Su posible uso no es responsabilidad de la CE, el IPCS, sus representantes o el INSHT, autor de la versión española.	
© IPCS, CE 2005		

Fichas Internacionales de Seguridad Química

DECANO

ICSC: 0428

			
DECANO n-Decano $C_{10}H_{22}/CH_3(CH_2)_8CH_3$ Masa molecular: 142.3			
Nº CAS 124-18-5 Nº RTECS HD6550000 Nº ICSC 0428 Nº NU 2247			
TIPOS DE PELIGRO/ EXPOSICION	PELIGROS/ SINTOMAS AGUDOS	PREVENCION	PRIMEROS AUXILIOS/ LUCHA CONTRA INCENDIOS
INCENDIO	Inflamable.	Evitar llama abierta, NO producir chispas y NO fumar.	Polvos, AFFF, espuma, dióxido de carbono.
EXPLOSION	Por encima de 46°C: pueden formarse mezclas explosivas de vapor/aire.	Por encima de 46°C: sistema cerrado, ventilación y equipo eléctrico a prueba de explosiones.	En caso de incendio: mantener fríos los bidones y demás instalaciones por pulverización con agua.
EXPOSICION			
• INHALACION	Confusión mental, somnolencia.	Ventilación o protección respiratoria.	Aire limpio, reposo, posición de semiincorporado y someter a atención médica.
• PIEL	Piel seca, enrojecimiento.	Guantes protectores,	Quitar las ropas contaminadas, aclarar la piel con agua abundante o ducharse.
• OJOS	Enrojecimiento, dolor.	Gafas ajustadas de seguridad.	Enjuagar con agua abundante durante varios minutos (quitar las lentes de contacto si puede hacerse con facilidad), después consultar a un médico.
• INGESTION		No comer, beber ni fumar durante el trabajo.	Enjuagar la boca. NO provocar el vómito. Reposo y someter a atención médica.
DERRAMAS Y FUGAS	ALMACENAMIENTO	ENVASADO Y ETIQUETADO	
Recoger, en la medida de lo posible, el líquido que se derrama y el ya derramado en recipientes herméticos metálicos o de vidrio. Absorber el líquido residual en arena o absorbente inerte y trasladarlo a un lugar seguro.	A prueba de incendio. Mantener en lugar fresco.	Clasificación de Peligros NU: 3 Grupo de Envasado NU: III	
VEASE AL DORSO INFORMACION IMPORTANTE			
ICSC: 0428		Preparada en el Contexto de Cooperación entre el IPCS y la Comisión de las Comunidades Europeas © CCE, IPCS, 1994	

Fichas Internacionales de Seguridad Química

DECANO

ICSC: 0428

D A T O S I M P O R T A N T E S	<p>ESTADO FISICO; ASPECTO Líquido incoloro, de olor característico.</p> <p>PELIGROS FISICOS</p> <p>PELIGROS QUIMICOS Puede reaccionar con materiales oxidantes.</p> <p>LIMITES DE EXPOSICION TLV no establecido.</p>	<p>VIAS DE EXPOSICION La sustancia se puede absorber por inhalación y por ingestión.</p> <p>RIESGO DE INHALACION Por evaporación de esta sustancia a 20°C se puede alcanzar bastante lentamente una concentración nociva en el aire.</p> <p>EFFECTOS DE EXPOSICION DE CORTA DURACION Por deglución puede pasar a los pulmones con riesgo de neumonitis química. La exposición muy por encima del OEL podría causar disminución de la consciencia.</p> <p>EFFECTOS DE EXPOSICION PROLONGADA O REPETIDA El líquido desengrasa la piel. La sustancia puede causar efectos en el riñón y en la sangre.</p>
	PROPIEDADES FISICAS	<p>Punto de ebullición: 174.2°C Punto de fusión: -29.7°C Densidad relativa (agua = 1): 0.7 Solubilidad en agua: Ninguna Presión de vapor, kPa a 25°C: 0.17 Densidad relativa de vapor (aire = 1): 4.9</p>	Densidad relativa de la mezcla vapor/aire a 20°C (aire = 1): 1.02 Punto de inflamación: 46°C (c.c.)°C Temperatura de autoignición: 210°C Límites de explosividad, % en volumen en el aire: 0.8-5.4 Coeficiente de reparto octanol/agua como log Pow: 5.98 (estimado)
DATOS AMBIENTALES		
NOTAS		
<p>Ficha de emergencia de transporte (Transport Emergency Card): TEC (R)-550 Código NFPA: H 0; F 2; R 0;</p>		
INFORMACION ADICIONAL		
<p>FISQ: 2-056 DECANO</p>		
<p>ICSC: 0428</p>		<p>DECANO</p>
<p>© CCE, IPCS, 1994</p>		
NOTA LEGAL IMPORTANTE:	<p>Ni la CCE ni la IPCS ni sus representantes son responsables del posible uso de esta información. Esta ficha contiene la opinión colectiva del Comité Internacional de Expertos del IPCS y es independiente de requisitos legales. La versión española incluye el etiquetado asignado por la clasificación europea, actualizado a la vigésima adaptación de la Directiva 67/548/CEE traspuesta a la legislación española por el Real Decreto 363/95 (BOE 5.6.95).</p>	

© INSHT

Fichas Internacionales de Seguridad Química

FLUORURO DE HIDROGENO

ICSC: 0283

 <p style="text-align: center;">FLUORURO DE HIDROGENO Acido fluorhídrico Acido hidrofluórico anhidro HF Masa molecular: 20.0</p> <p>Nº CAS 7664-39-3 Nº RTECS MW7875000 Nº ICSC 0283 Nº NU 1052 Nº CE 009-002-00-6</p> <p style="text-align: right;">  </p>			
TIPOS DE PELIGRO/ EXPOSICION	PELIGROS/ SINTOMAS AGUDOS	PREVENCION	PRIMEROS AUXILIOS/ LUCHA CONTRA INCENDIOS
INCENDIO	No combustible. Muchas reacciones pueden producir incendio o explosión.	(Véanse Riesgos Químicos).	En caso de incendio en el entorno: usar medio de extinción adecuado.
EXPLOSION			En caso de incendio: mantener fría la botella rociando con agua pero NO en contacto directo con agua. Combatir el incendio desde un lugar protegido.
EXPOSICION		¡EVITAR TODO CONTACTO!	¡CONSULTAR AL MEDICO EN TODOS LOS CASOS!
• INHALACION	Sensación de quemazón, vértigo, dolor de cabeza, tos, dificultad respiratoria, náusea, jadeo, vómitos, dolor de garganta, síntomas no inmediatos: ver Notas	Ventilación, extracción localizada o protección respiratoria.	Aire limpio, reposo, posición de semiincorporado y proporcionar asistencia médica.
• PIEL	¡PUEDE ABSORBERSE! Enrojecimiento, dolor, ampollas, quemaduras graves. (Ver Inhalación)	Guantes protectores y traje de protección.	Quitar las ropas contaminadas, aclarar la piel con agua abundante o ducharse y proporcionar asistencia médica.
• OJOS	Enrojecimiento, dolor, quemaduras profundas graves.	Pantalla facial o protección ocular combinada con la protección respiratoria.	Enjuagar con agua abundante durante varios minutos (quitar las lentes de contacto si puede hacerse con facilidad) y proporcionar asistencia médica.
• INGESTION	Dolor abdominal, náuseas, debilidad, sensación de quemazón, diarrea, vómitos y colapso.	No comer, ni beber ni fumar durante el trabajo. Lavarse las manos antes de comer.	Enjuagar la boca, NO provocar el vómito y proporcionar asistencia médica.
DERRAMAS Y FUGAS	ALMACENAMIENTO	ENVASADO Y ETIQUETADO	
Evacuar la zona de peligro. Consultar a un experto. Ventilar. Eliminar el gas con agua pulverizada. Traje hermético de protección química incluyendo equipo autónomo de respiración.	A prueba de incendio. Separado de alimentos y piensos. Ver Peligros Químicos. Mantener en lugar fresco y bien ventilado.	No transportar con alimentos y piensos. CE: símbolo T+, símbolo C R: 26/27/28-35 S: (12-)/7/9-26-36/37/39-45 Clasificación de Peligros NU: 8 Riesgos Subsidiarios NU: 6.1 Grupo de Envasado NU: I	
			

VEASE AL DORSO INFORMACION IMPORTANTE

ICSC: 0283	Preparada en el Contexto de Cooperación entre el IPCS y la Comisión de las Comunidades Europeas © CCE, IPCS, 2005
-------------------	---

Fichas Internacionales de Seguridad Química

FLUORURO DE HIDROGENO

ICSC: 0283

D A T O S I M P O R T A N T E S	<p>ESTADO FISICO; ASPECTO Gas o líquido humeante incoloro, de olor acre.</p> <p>PELIGROS FISICOS</p> <p>PELIGROS QUIMICOS La disolución en agua es un ácido fuerte, reacciona violentamente con bases y es corrosiva. Reacciona violentamente con muchos compuestos originando peligro de fuego y explosión. Ataca al metal, vidrio, plásticos, caucho y revestimientos.</p> <p>LIMITES DE EXPOSICION TLV (como F): 0.5 ppm como TWA, 2 ppm (valor techo) BEI (ACGIH 2005). MAK: 1 ppm, 0.83 mg/m³; Categoría de limitación de pico: I(2), Riesgo para el embarazo: grupo C; BAT: 7 mg/g creatinina (DFG 2005)</p>	<p>VIAS DE EXPOSICION La sustancia se puede absorber por inhalación y a través de la piel y por ingestión.</p> <p>RIESGO DE INHALACION Al producirse una pérdida de gas se alcanza muy rápidamente una concentración nociva de éste en el aire.</p> <p>EFFECTOS DE EXPOSICION DE CORTA DURACION La sustancia es corrosiva de los ojos, la piel y el tracto respiratorio. La inhalación del gas puede originar edema pulmonar (véanse Notas). La sustancia puede causar efectos en la calcemia, induciendo hipocalcemia. La exposición por encima del OEL puede producir la muerte. Los efectos pueden aparecer de forma no inmediata. Se recomienda vigilancia médica.</p> <p>EFFECTOS DE EXPOSICION PROLONGADA O REPETIDA La sustancia puede causar fluorosis.</p>
PROPIEDADES FISICAS	Punto de ebullición: 20°C Punto de fusión: -83°C Densidad relativa (agua = 1): 1.0 como líquido a 4°C	Solubilidad en agua: Elevada Presión de vapor, kPa a 25°C: 122 Densidad relativa de vapor (aire = 1): 0.7
DATOS AMBIENTALES		
NOTAS		
El valor límite de exposición laboral aplicable no debe ser superado en ningún momento por la exposición en el trabajo. Los síntomas del edema pulmonar no se ponen de manifiesto, a menudo, hasta pasadas algunas horas y se agravan por el esfuerzo físico. Reposo y vigilancia médica son por ello, imprescindibles. Debe considerarse la inmediata administración de un aerosol adecuado por un médico o persona por él autorizada. Con el fin de evitar la fuga de gas en estado líquido, girar la botella que tenga un escape manteniendo arriba el punto de escape. Está indicado un examen médico periódico dependiendo del grado de exposición. Otro número NU: 1790 (disolución de fluoruro de hidrógeno) clase de peligro 8, riesgo subsidiario 6.1, grupo de envasado I (> 60%) Código NFPA: H 3; F 0; R 2;		
INFORMACION ADICIONAL		
FISQ: 3-119 FLUORURO DE HIDROGENO		Los valores LEP pueden consultarse en línea en la siguiente dirección: http://www.insht.es/
ICSC: 0283	© CCE, IPCS, 2005	FLUORURO DE HIDROGENO
NOTA LEGAL IMPORTANTE:	Ni la CCE ni la IPCS ni sus representantes son responsables del posible uso de esta información. Esta ficha contiene la opinión colectiva del Comité Internacional de Expertos del IPCS y es independiente de requisitos legales.	

© INSHT

Fichas Internacionales de Seguridad Química

NAFTA (PETROLEO), ALQUILATO PESADO

ICSC: 1382


MINISTERIO DE TRABAJO Y ASUNTOS SOCIALES ESPAÑA


Nafta modificado de baja temperatura de ebullición

Nº CAS 64741-65-7
 Nº RTECS
 Nº ICSC 1382
 Nº NU 1268
 Nº CE 649-275-00-4



TIPOS DE PELIGRO/ EXPOSICION	PELIGROS/ SINTOMAS AGUDOS	PREVENCION	PRIMEROS AUXILIOS/ LUCHA CONTRA INCENDIOS
INCENDIO	Inflamable.	Evitar las llamas, NO producir chispas y NO fumar.	Agua pulverizada, espuma resistente al alcohol, polvo, dióxido de carbono.
EXPLOSION	Por encima de 44°C pueden formarse mezclas explosivas vapor/aire.	Por encima de 44°C, sistema cerrado, ventilación y equipo eléctrico a prueba de explosión.	En caso de incendio: mantener fríos los bidones y demás instalaciones rociando con agua.
EXPOSICION		¡EVITAR LA FORMACION DE NIEBLA DEL PRODUCTO!	
• INHALACION	Vértigo. Somnolencia. Dolor de cabeza. Náuseas. Pérdida del conocimiento.	Ventilación, extracción localizada o protección respiratoria.	Aire limpio, reposo. Proporcionar asistencia médica.
• PIEL	Piel seca.	Guantes protectores.	Quitar las ropas contaminadas. Aclarar la piel con agua abundante o ducharse.
• OJOS	Enrojecimiento.	Gafas ajustadas de seguridad.	Enjuagar con agua abundante durante varios minutos (quitar las lentes de contacto si puede hacerse con facilidad), después proporcionar asistencia médica.
• INGESTION	Tos. Diarrea. Dolor de garganta. Vómitos. (para mayor información, véase Inhalación).	No comer, ni beber, ni fumar durante el trabajo.	NO provocar el vómito. Proporcionar asistencia médica. Véanse Notas.

DERRAMES Y FUGAS	ALMACENAMIENTO	ENVASADO Y ETIQUETADO
Ventilar. Recoger, en la medida de lo posible, el líquido que se derrama y el ya derramado en recipientes herméticos. Absorber el líquido residual en arena o absorbente inerte y trasladarlo a un lugar seguro. NO verterlo al alcantarillado. (Protección personal adicional: filtro respiratorio para vapores orgánicos de bajo punto de ebullición).	A prueba de incendio. Separado de oxidantes fuertes. Bien cerrado.	NU (transporte): Ver pictogramas en cabecera. Clasificación de Peligros NU: 3 Grupo de Envasado NU: III CE: símbolo T R: 45-65 S: 53-45 Nota: H, P, 4



VEASE AL DORSO INFORMACION IMPORTANTE

ICSC: 1382

Preparada en el Contexto de Cooperación entre el IPCS y la Comisión Europea © CE, IPCS, 2003

Fichas Internacionales de Seguridad Química

NAFTA (PETROLEO), ALQUILATO PESADO

ICSC: 1382

D A T O S I M P O R T A N T E S	ESTADO FISICO; ASPECTO Líquido incoloro.	VIAS DE EXPOSICION La sustancia se puede absorber por inhalación del vapor y por ingestión.
	PELIGROS FISICOS El vapor es más denso que el aire y puede extenderse a ras del suelo; posible ignición en punto distante.	RIESGO DE INHALACION No puede indicarse la velocidad a la que se alcanza una concentración nociva en el aire por evaporación de esta sustancia a 20°C.
	PELIGROS QUIMICOS Reacciona con oxidantes fuertes, originando peligro de incendio y explosión.	EFFECTOS DE EXPOSICION DE CORTA DURACION El vapor irrita levemente los ojos. La ingestión del líquido puede dar lugar a la aspiración del mismo por los pulmones y la consiguiente neumonitis química. La sustancia puede causar efectos en el sistema nervioso central. La exposición a elevadas concentraciones de vapor puede producir pérdida del conocimiento.
	LIMITES DE EXPOSICION TLV no establecido. MAK no establecido.	EFFECTOS DE EXPOSICION PROLONGADA O REPETIDA El líquido desengrasa la piel. Véanse notas.
PROPIEDADES FISICAS	Punto de ebullición: 172-215°C Punto de fusión: -30°C Densidad: 0.75-0.79 g/cm ³ Solubilidad en agua: ninguna	Presión de vapor, kPa a 20°C: 0.1-0.2 Punto de inflamación: 44° C Temperatura de autoignición: 355 °C Límites de explosividad, % en volumen en el aire: 0.6-8.0
DATOS AMBIENTALES	La sustancia es tóxica para los organismos acuáticos.	
NOTAS		
<p>Dependiendo de la materia prima y del proceso de producción, la composición y las propiedades físicas de este solvente pueden variar considerablemente. Los síntomas de neumonitis química no se ponen de manifiesto hasta pasadas unas cuantas horas o incluso días. Isopar G / L / M, Shellsol T / TK / TD, Soltrol 100 / 130, entre otros, son nombres comerciales.</p> <p style="text-align: right;">Ficha de emergencia de transporte (Transport Emergency Card): TEC (R)-30G35 Código NFPA: H 1; F 3; R 0;</p>		
INFORMACION ADICIONAL		
Los valores LEP pueden consultarse en línea en la siguiente dirección: http://www.mtas.es/insht/practice/vlas.htm		Última revisión IPCS: 2001 Traducción al español y actualización de valores límite y etiquetado: 2003
ICSC: 1382		NAFTA (PETROLEO), ALQUILATO PESADO
© CE, IPCS, 2003		
NOTA LEGAL IMPORTANTE:	Esta ficha contiene la opinión colectiva del Comité Internacional de Expertos del IPCS y es independiente de requisitos legales. Su posible uso no es responsabilidad de la CE, el IPCS, sus representantes o el INSHT, autor de la versión española.	

 **GOULDS PUMPS**

Goulds 3620

API 610 11th Edition / ISO 13709 2nd Edition
API 682 Single-Stage, Between-Bearing, Radially Split



ITT

ENGINEERED FOR LIFE

Goulds 3620

A Leader in API Engineered Pump Package Solutions...

Proven API Leadership

ITT Goulds Pumps is a proven leader in API Pumps

- Over 20,000 units installed
 - Over 17,000 OH2 / OH3s
 - Over 3,000 BB1 / BB2 / BB3 pumps
- 40+ years of API expertise
- Participating member on API 610 and API 682 committees

Family of API Pumps

ITT Goulds Pumps has a family of proven API pumps:

- Overhung pumps
- Single and two-stage between-bearing
- Multistage between-bearing pumps – axially split
- Barrel multistage - radially split
- Vertical, double casing pumps
- Specialty pumps

Global Coverage

ITT Goulds Pumps has the global coverage needed to serve multi-national companies in any region.

Industry Leading Hydraulic Coverage

- We offer extensive coverage to meet your process needs.
- Better hydraulic fits can mean improved efficiency and long-term reliability and parts life.

8000 HP / 6000 kW Testing Capability

- Our expanded test facility can test your pump in the most demanding conditions.
- Testing at rated speeds is critical to assess the impact of dynamic conditions including vibration.

API Engineering Expertise

- We are experts in packaging engineered pumps that meet your demanding applications – with true conformance to the latest API specifications.
- We have extensive experience in nearly every type of driver, bearing, seal, piping configuration, nozzle configuration, flange and baseplate design to meet your application needs.
- ITT is a world leader in technology and engineering including hydraulics, materials science, mechanical design and fluid dynamics.

Broad Applications

- Petroleum refining, production and distribution
- Petrochemical and demanding chemical processing
- High temperature applications including boiler circulation
- General industrial requiring high temperature or high pressures



Goulds 3620



Goulds Model 3620 between-bearings radially split process pumps are designed for smooth, reliable operation and fully meet the specification requirements of ISO 13709 / API-610 to assure extended service life.



High Temperature and Pressure Process Pumps that Meet or Exceed 610 API 11th Edition / ISO 13709 2nd Edition

Safety, reliability, and versatility are the key words for our single stage, centerline mounted, between-bearing, radially split API 610 process pump (API BB2).

Safety and Reliability

We provide engineered solutions with true conformance to the latest API specifications including the stringent emissions containment per API 682. The result is a safe and rugged API process pump designed for a 20-year life.

Versatility

- Capacity to 20,000 GPM (4,540 m³/h)
- Total Dynamic Head to 1,500 feet (455 m)
- Temperature to 850° F (455° C)
- Pressure to 1,000 psig (70 bar)

Materials: Available in a wide range of materials including all API 610 constructions and custom application needs.

Engineered Hydraulics: Dense hydraulic coverage to better match your process for efficiency and reliability. Custom hydraulics are available.

Engineered Packaging with a wide range of drivers, seals, piping, nozzle configurations, flanges, baseplates, and QC testing.

Applications

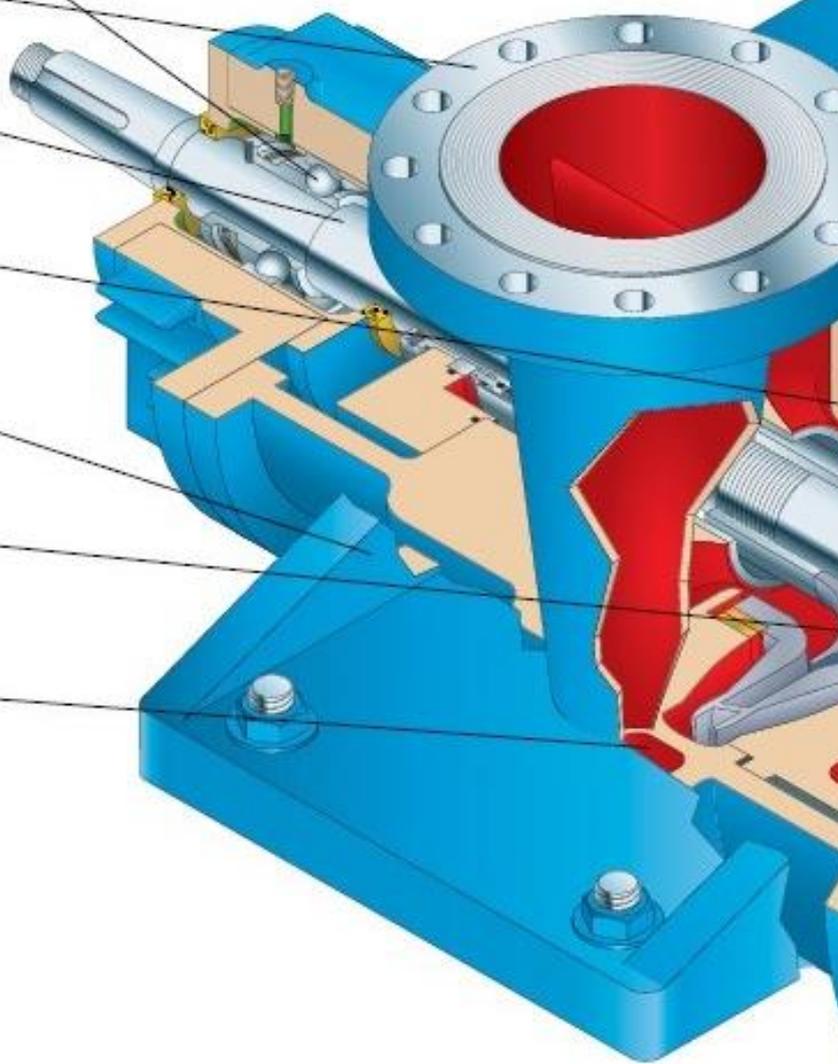
- **Refinery:** Tower bottoms, process feed, column reflux, circulation and pump around, process booster
- **Power Plant:** Boiler feed booster, boiler circulation, ash sluice

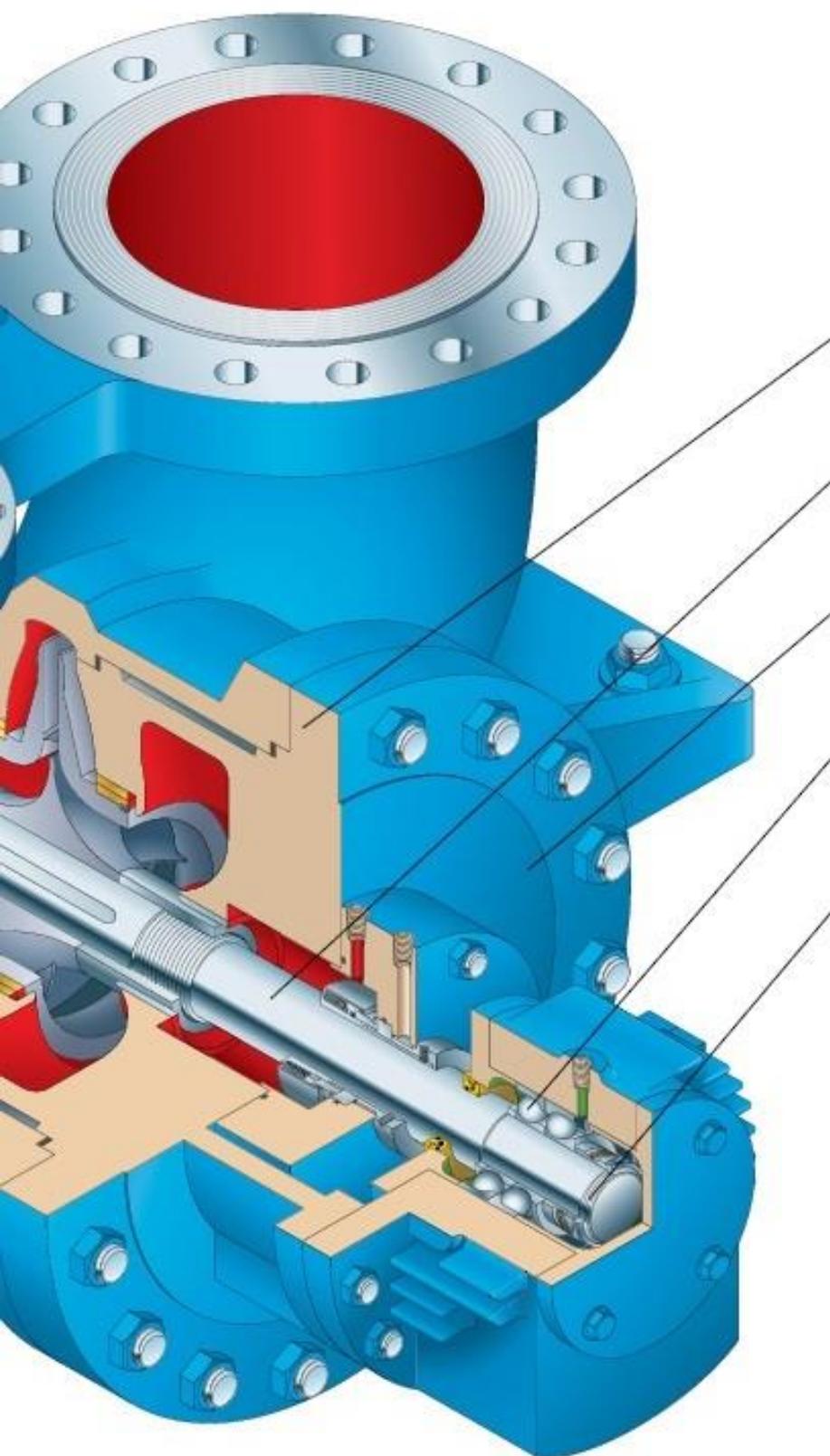
Goulds 3620 (API BB2)

API 610 11th Edition / ISO 13709 2nd Edition

API BB2 Single-Stage, Between-Bearing, Radially Split

- HEAVY DUTY RADIAL BEARINGS STANDARD
- CLASS 300 RF FLANGES STANDARD
Other classes and facings optional.
- HEAVY DUTY SHAFT
Minimum shaft deflection for extended seal and bearing life.
Sized to meet deflection and rotordynamics requirements of API 610 / ISO 13709.
- RENEWABLE WEAR RINGS
API 610 / ISO 13709 clearances. Positively locked.
Standard feature.
- CENTERLINE MOUNTED CASING
Heavy duty mounting extensions accept API 610 / ISO 13709
nozzle loads and maintain pump alignment under extreme
service conditions.
- DOUBLE SUCTION IMPELLER
Designed for low NPSH services. Hydraulically designed to balance
axial loads for increased bearing life. Rotor and impeller balanced
to stringent ISO 1940 Grade 1.0 (exceeds API minimum).
- DUAL VOLUTE CASING
Evenly balances radial forces for minimum shaft deflection,
increased bearing and seal life.





RADIALLY SPLIT CASING

Designed specifically for high pressure / high temperature services. Fully confined controlled compression gasket assures leak-proof sealing.

ENLARGED SEAL CHAMBERS

Conform to API 610 / ISO 13709 dimensional requirements. Allows use of wide range of API 682 / ISO 21049 cartridge mechanical seals to meet specific service conditions.

CASING HEAD ON OUTBOARD END

Allows removal of rotor without disturbing driver or suction and discharge piping. Single head standard. Double head design optional.

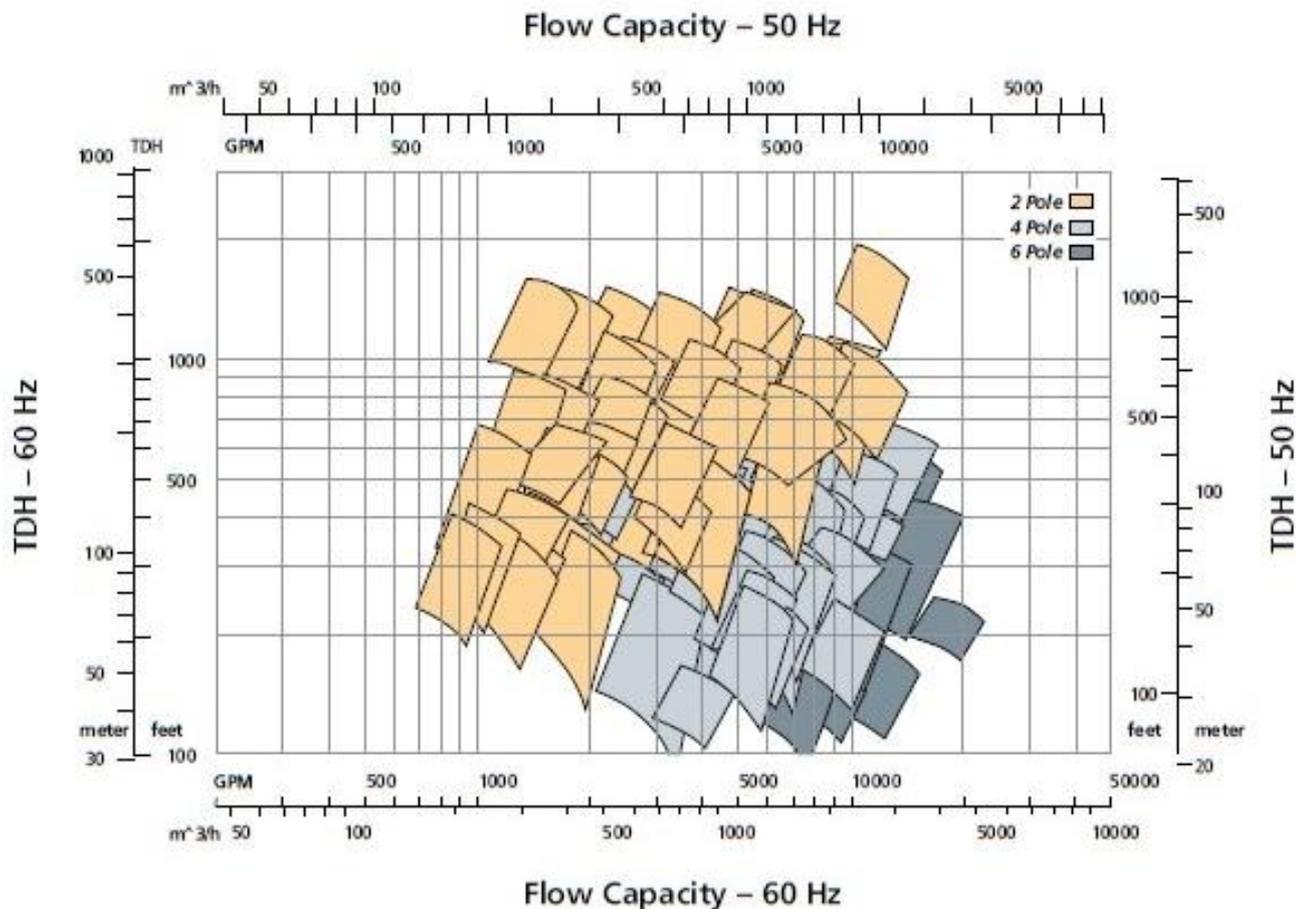
HEAVY DUTY THRUST BEARING

Duplex 40° angular contact thrust bearings and deep-groove (Conrad) radial bearings sized for minimum three (3) year bearing life under most severe operating conditions. Exceeds API 610 / ISO 13709 requirements.

LABYRINTH OIL SEALS

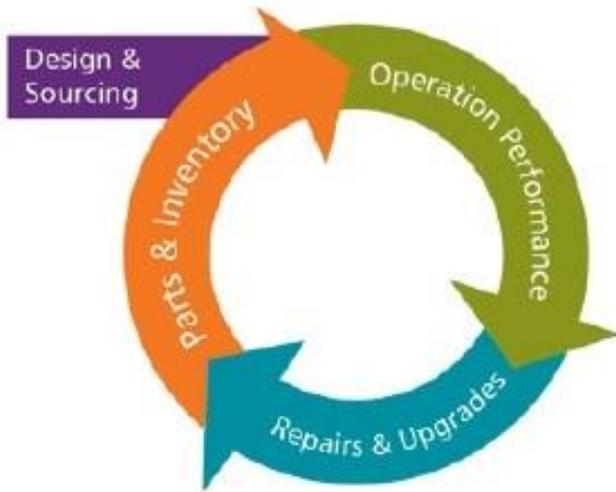
Labyrinth seal design prevents oil from leaking out and contaminants from intruding. Made from non-sparking metal.

Hydraulic Coverage



Custom Solutions

Model 3620 6 × 10-13 custom designed with side-top nozzles for fuel oil service in Saudi Arabia.



Reliability has no quitting time.

PRO Services provides an array of services focused on reducing equipment total cost of ownership (TCO) and increasing plant output, including predictive monitoring, maintenance contracts, field service, engineered upgrades, inventory management, and overhauls for pumps and other rotating equipment.



PRO Services provides OEM parts for Goulds Pumps, Bornemann Pumps, AC, Morris, Goyne, CB, HVC, UXN and ROV in a timely manner to meet end user requirements. Significant levels of inventory and quick response capability provides the necessary programs to meet all repair needs.

PRO Services provides programs of reliability services, energy assessments, asset management and training. These can be deployed as stand-alone or integrated solutions, tailored to the needs of your company.

PRO Services provides an array of repairs and upgrades services to extend equipment life. PRO Services helps customers develop effective maintenance and asset management programs to lower maintenance costs, improve uptime, reduce inventory costs and extend equipment life.

A Leader in API Engineered Pump Package Solutions

API Family of Pumps

Model 3700
OH-2



Model 3910
OH-3

Model 3620
3640
BB-2



Model 3610
BB-1



API Type	Goulds Model	Capacity GPM (M ³ /hour)	TDH Feet (Meters)	Temperature °F (°C)	Pressure PSIG (kg/cm ²)
OH-2	3700	8500 (1930)	1200 (360)	800 (425)	870 (60)
OH-3	3910	6000 (1360)	750 (230)	650 (340)	600 (42)
BB-1	3610	50000 (11355)	700 (215)	300 (150)	300 (21)
BB-2	3640	7500 (1700)	2500 (760)	850 (455)	1130 (75)
BB-2	3620	20000 (4540)	1500 (455)	850 (455)	1000 (70)
BB-3	3600	8500 (1930)	9000 (2740)	400 (205)	4000 (275)
BB-5	7200CB	4000 (910)	9000 (2740)	800 (425)	4000 (275)
V54	API 3171	3180 (720)	525 (160)	450 (232)	750 (50)
V51	VIT	70000 (14760)	3500 (1060)	500 (260)	2500 (175)
V56	VIC	70000 (14760)	3500 (1060)	500 (260)	2500 (175)



Model 3600
BB-3



Model 7200CB
BB-5



ENGINEERED FOR LIFE

240 Fall Street
Seneca Falls, NY 13148
www.itt.com

© 2012 Goulds Pumps, Incorporated
A subsidiary of ITT Corporation

Form B3620 04/13

Purchaser UNDEFINED
End User
Item No. ITEM 001
Service
Perf Std

Liquid Alimentación
Nom. Temperature 342.1 deg F
Spec. Gravity 0.650
Viscosity 0.274 cp
Vapor Press
Solids% / Size

Date 11/04/2014
Issued by:
Quotation No.
Job/Inq.No.
Order No.

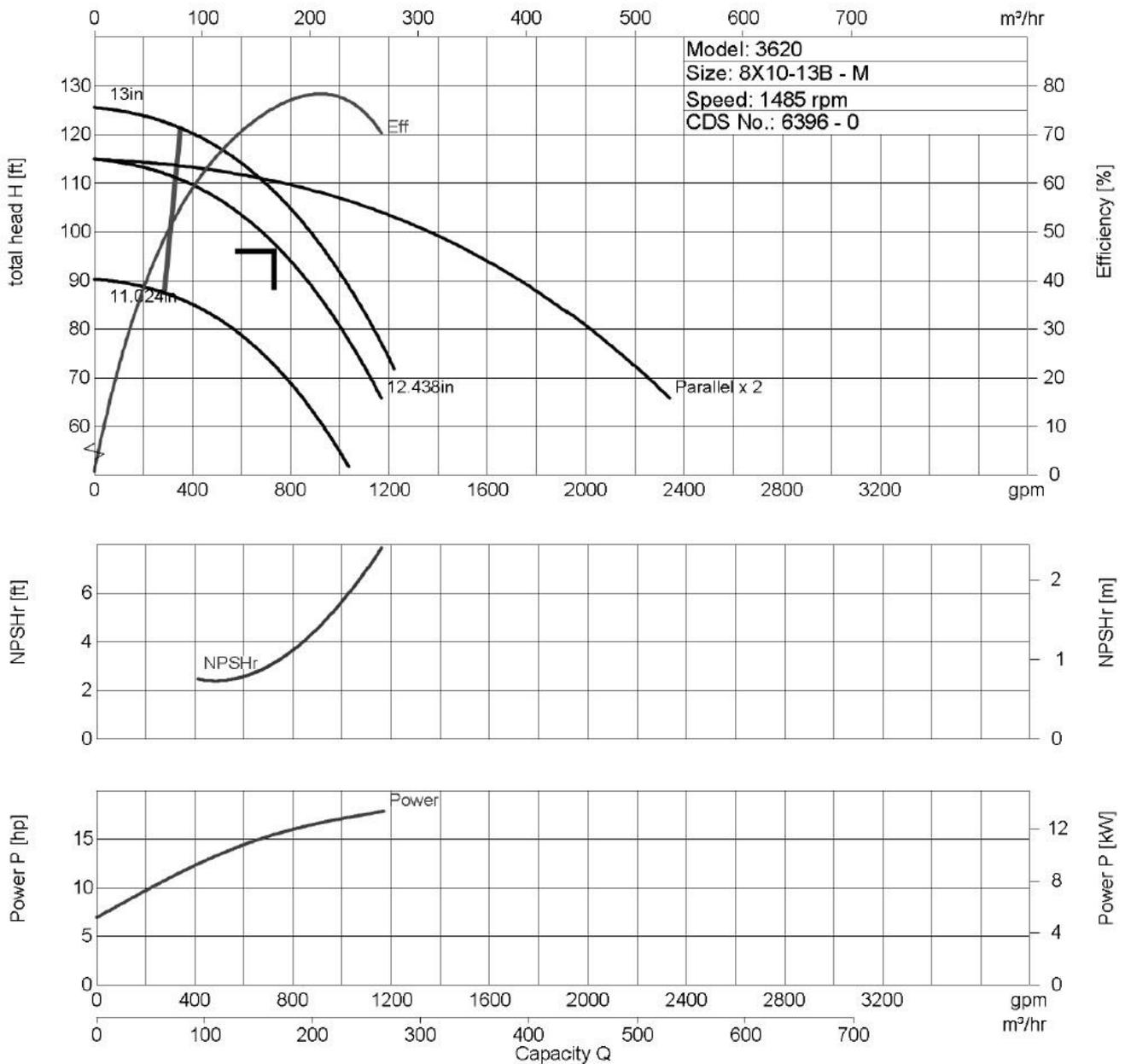
Rated Operating Point

Capacity 744.0 gpm
Head 96.5 ft
NPSHa 5.7 ft
NPSHr 3.3 ft
Rated Efficiency 75.5 %
Suction Spec. Speed 9,357 gpm(US) ft

Power - Pump 15.6 hp
Power - Loss 0.00 hp
Power - Others
Power - Totals 15.6 hp
Power - max. 17.9 hp

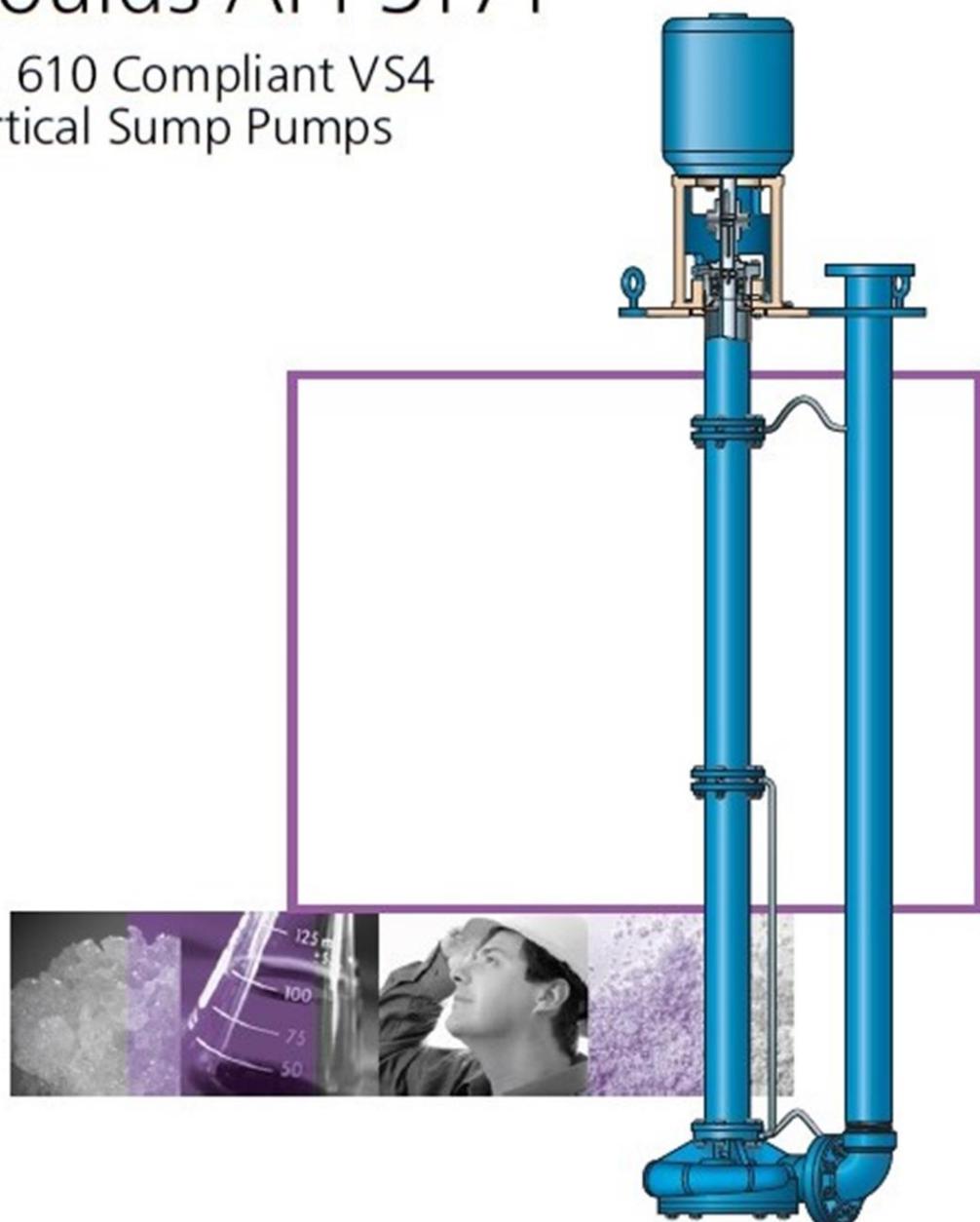
No. of Stages 1
Imp. Dia. 1st Stg: 12.4375 in
Imp. Dia. Adl Stg:
Min. Hydraulic Flow 333.4 gpm
Min. Thermal Flow N/A

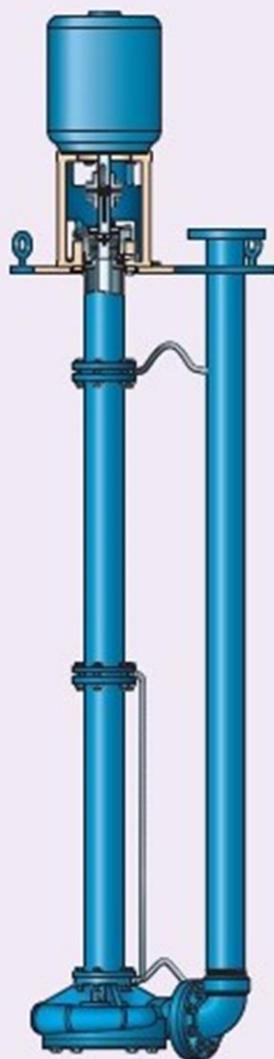
Notes: 1. The Mechanical seal increased drag effect on power and efficiency is not included, unless the correction is shown in the appropriate field above. 2. Magnetic drive eddy current on power and efficiency is not included. 3. Elevated temperature effects on performance are not included. 4. Non Overloading power does not reflect v-belt/gear losses.



Goulds API 3171

API 610 Compliant VS4
Vertical Sump Pumps





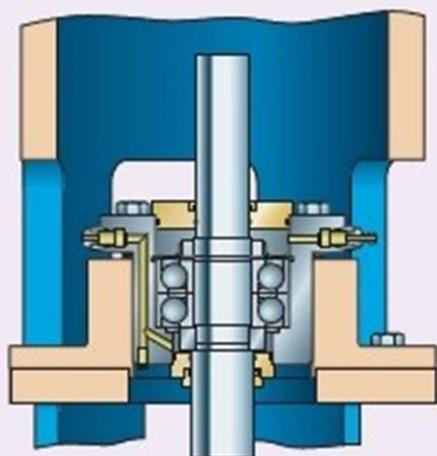
API 3171 — The reliable performer for all API sump services

Fully compliant with API 610 9th/10th edition, ISO 13709 VS4 sump pump

- ◆ Capacities to 3180 GPM (722 m³/h)
- ◆ Heads to 525 feet (160 m)
- ◆ Temperatures to 450° F (232° C)
- ◆ Pit Depths to 20 feet (6 m)

Design features

- ◆ Compliant thrust bearing arrangement
 - Grease or oil mist compatible
 - Duplex single row with machined brass cages
 - INPRO® bronze labyrinth seals
- ◆ Compliant disc coupling balanced to AGMA 9
- ◆ Fully compliant bearing spans
- ◆ 300# discharge flanges as standard
- ◆ ½" diameter lubelines for steady bearings
- ◆ Integral lifting eyes
- ◆ Many interchangeable parts with Model 3171

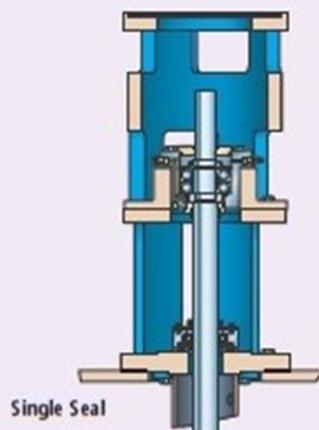


Thrust bearing arrangement

OPTIONAL FEATURES

Single Seal Vaporproof Construction

- ◆ Used where emissions control is required
- ◆ Gasketed fits and dry-running seal keep vapors in the sump



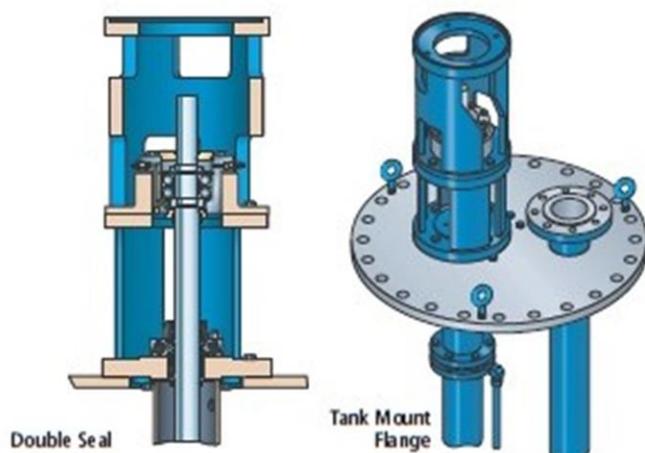
Single Seal

Double Seal Vaporproof Construction

- ◆ Double seal offers additional protection for critical services
- ◆ Optional flush plans are available

Common Options

- ◆ Optional bearings
- ◆ Optional soleplate (pit cover)
- ◆ Jacketed construction
- ◆ Tank flange support plate



Double Seal

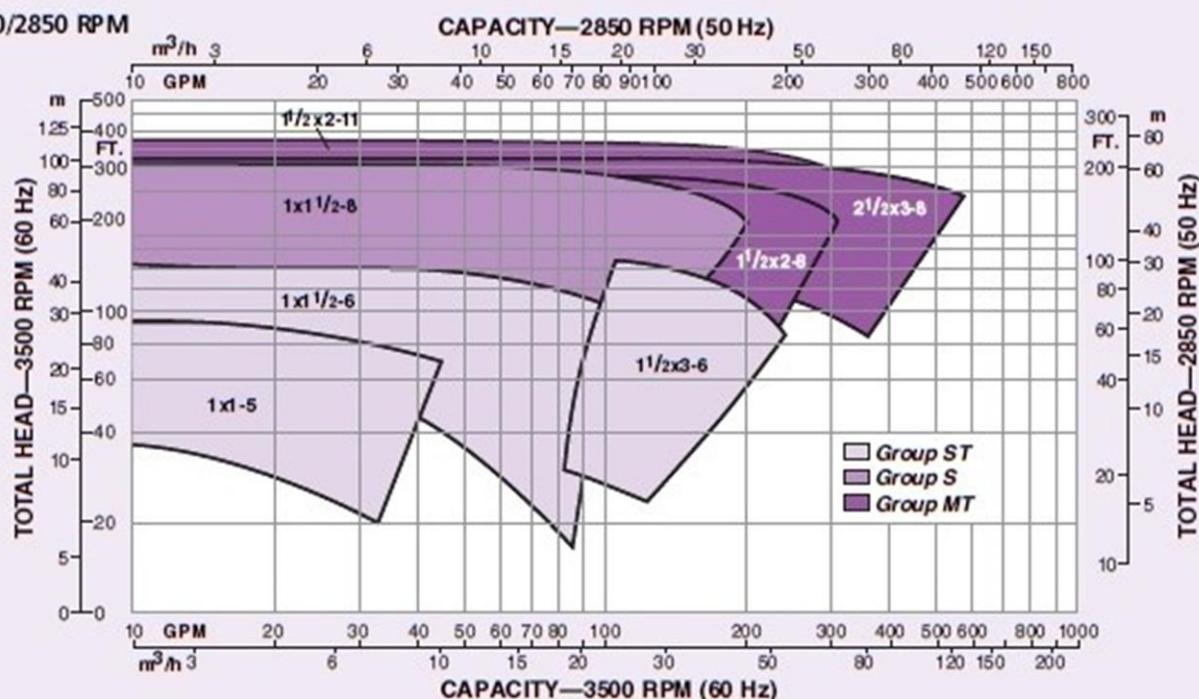
Tank Mount Flange

Parts List and Materials of Construction

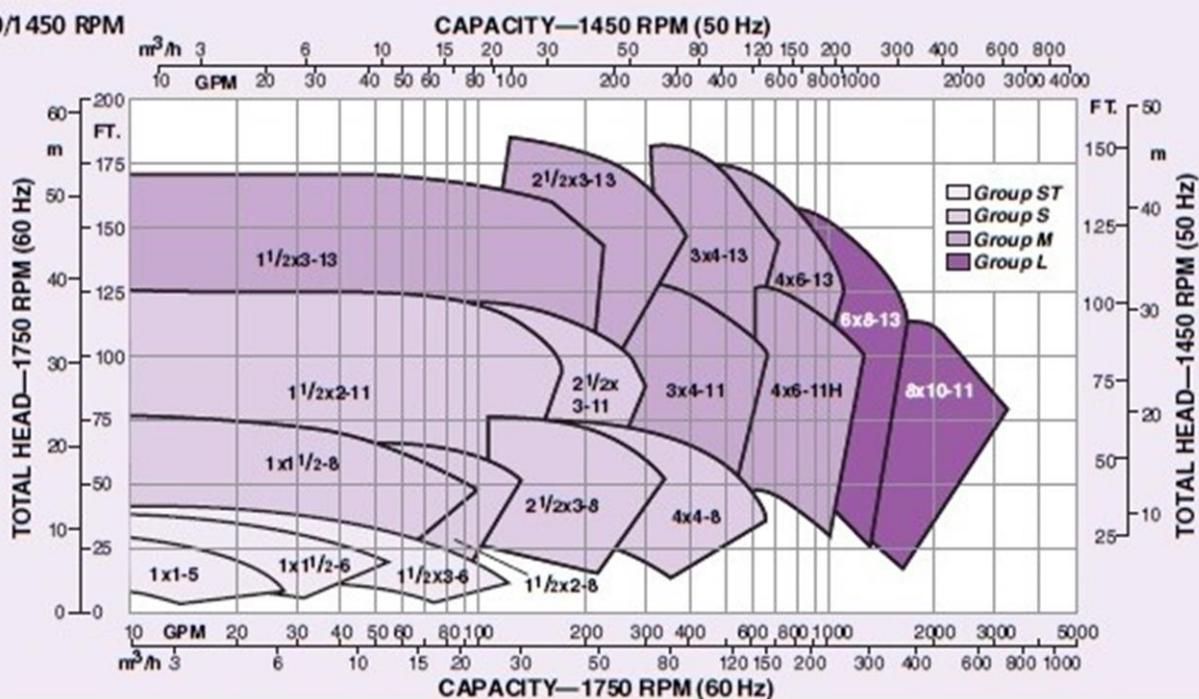
Part Name	S-1/S-4	S-3	S-5	S-6	S-8	A-8	D-1	D-2
Casing	A216 WCB					A743 CF8M	A890 Gr. 4A	A890 Gr. 5A
Impeller	A536 65-45-12	A436 Type 2	A216 WCB	A487 CAGNM	A743 CF8M	A743 CF8M	A890 Gr. 4A	A890 Gr. 5A
Thrust Bearings	40 Degree angular contact w/ machined brass cage							
Shaft	A582 S41600					A276 S31600	A276 S31803	A479 S32750
Bearing Shell	A216 WCB							
Suction Cover	A216 WCB					A743 CF8M	A890 Gr. 4A	A890 Gr. 5A
Strainer	316 plate						A890 Gr. 4A	A890 Gr. 5A
Support Plate	Carbon steel							
Flush Tubing	As specified							
Column	Carbon steel					A312 316L	A790 S31803	A790 S32750
Discharge Pipe	Schedule 40, A53 Gr. F					A312 316L	A790 S31803	A790 S32750
Steady Bearings	Carbon or as specified							
Motor Support	A48 Cast iron							
Discharge Elbow	A216 WCB					A351 CF3M	A890 Gr. 4A	A890 Gr. 5A
Labyrinth Seals	Bronze INPRO®							
Gaskets	Nitrile acrylic							
Bolt - Column to Casing	A193 B8M						B574 S10276	
Bolt - Elbow to Casing								

Hydraulic Coverage Charts

3500/2850 RPM



1750/1450 RPM



Visit our website at www.gouldspumps.com



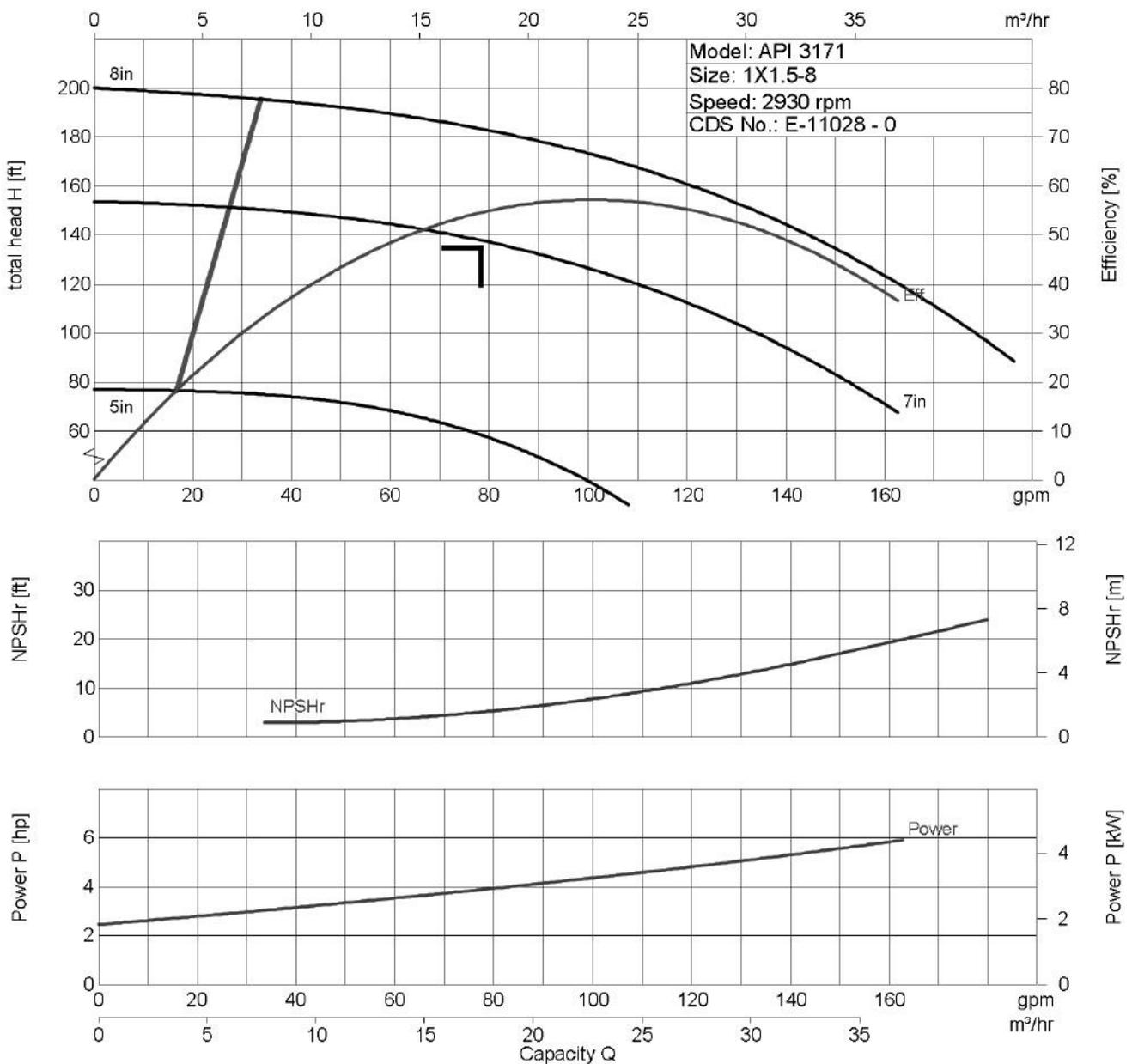


Model Speed	API 3171 2930 RPM	Size Frequency	1X1.5-8 50Hz
Purchaser End User Item No. Service Perf Std	UNDEFINED ITEM 001	Liquid Nom. Temperature Spec. Gravity Viscosity Vapor Press Solids% / Size	Reflujo 222.9 deg F 0.780 0.239 cp
		Date Issued by: Quotation No. Job/Inq.No. Order No.	11/04/2014

Rated Operating Point

Capacity Head NPSHa NPSHr Rated Efficiency Suction Spec. Speed	79.0 gpm 135.7 ft 6.7 ft 5.2 ft 54.5 % 7,777 gpm(US) ft	Power - Pump Power - Loss Power - Others Power - Totals Power - max.	3.9 hp 0.00 hp 3.9 hp 5.9 hp	No. of Stages Imp. Dia. 1st Stg: Imp. Dia. Adl Stg: Min. Hydraulic Flow Min. Thermal Flow	1 7.0000 in 28.2 gpm N/A
---	--	--	---	---	---------------------------------------

Notes: 1. The Mechanical seal increased drag effect on power and efficiency is not included, unless the correction is shown in the appropriate field above. 2. Magnetic drive eddy current on power and efficiency is not included. 3. Elevated temperature effects on performance are not included. 4. Non Overloading power does not reflect v-belt/gear losses.



REDISEÑO DE UNA LÍNEA DE
FRACCIONAMIENTO DE ALQUILACIÓN DE
PARAFINAS.

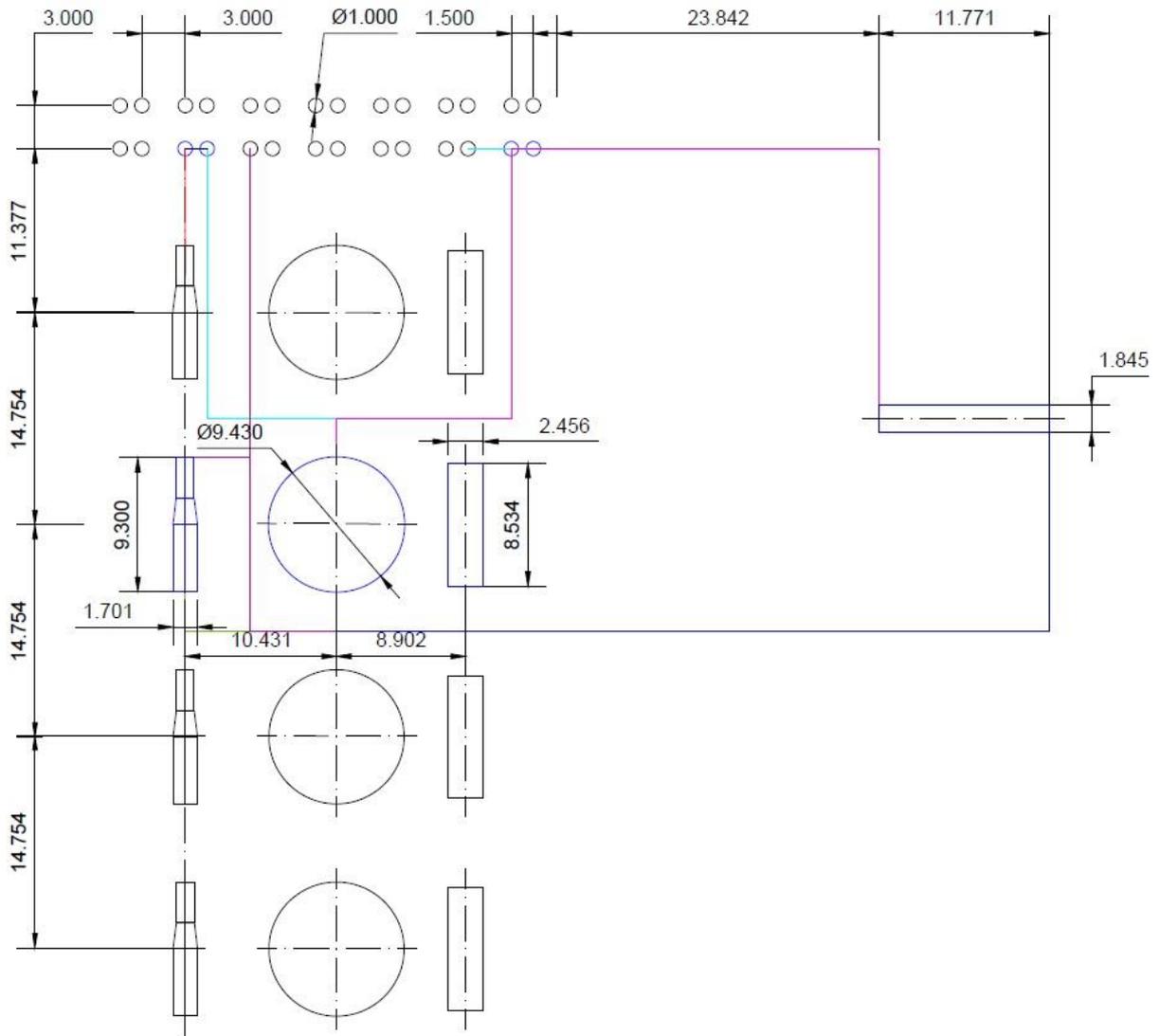
PARTE I: UNIDAD DE RECUPERACIÓN DE
BENCENO.

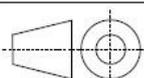
DOCUMENTO 3: PLANOS

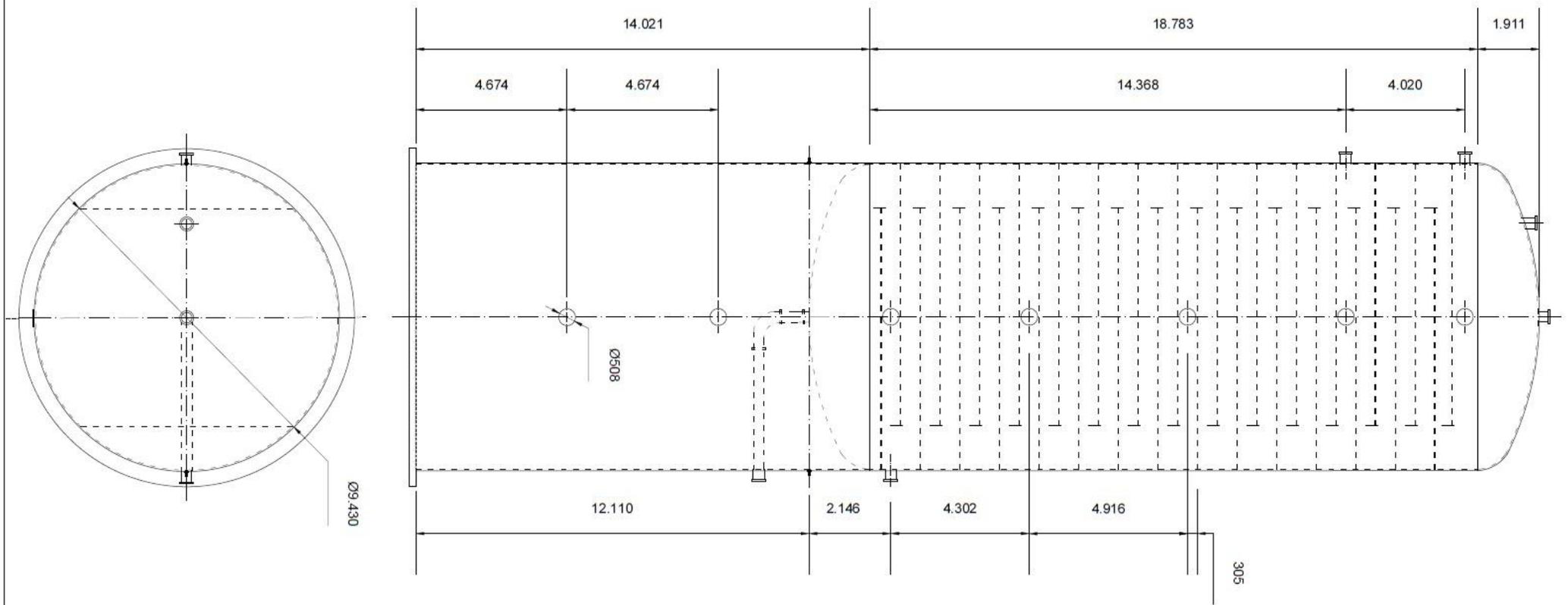
AUTORA: D^a. ROSA MARÍA BADANI PRADO

Índice Planos

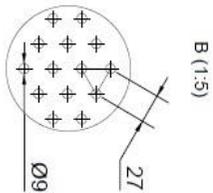
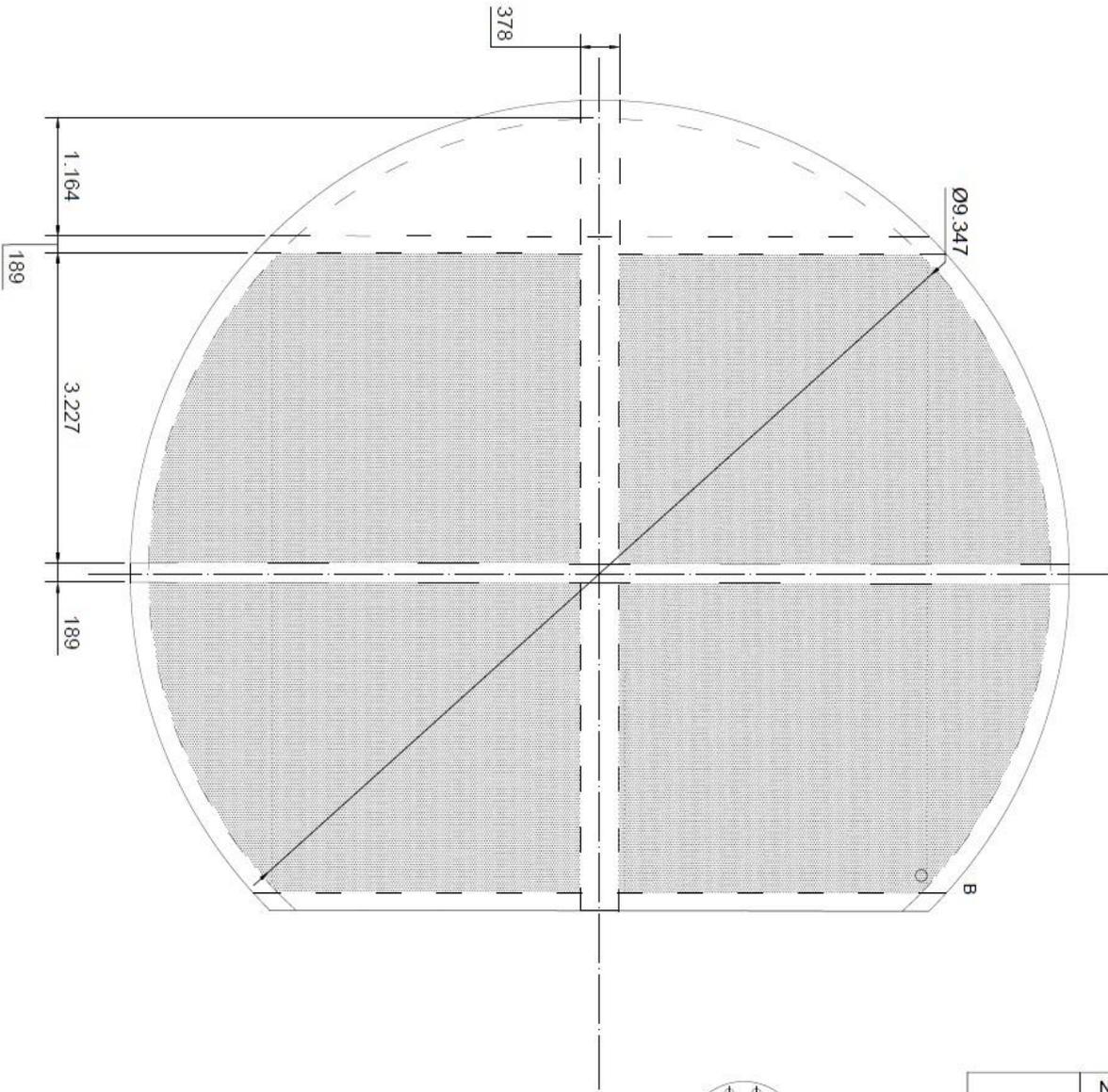
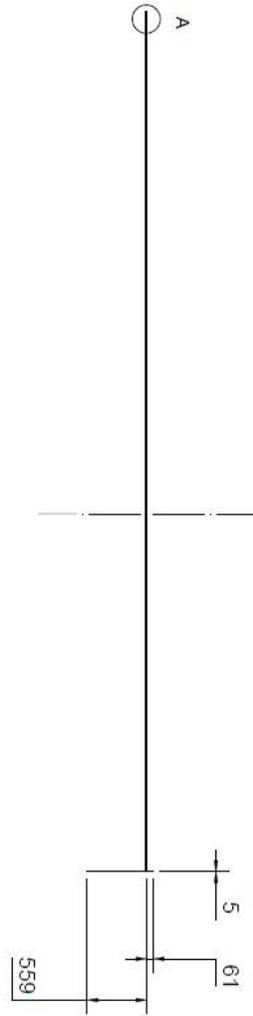
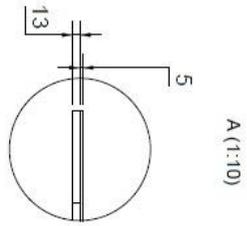
PLANO 1: DISTRIBUCIÓN EN PLANTA.	325
PLANO 2: COLUMNA DE DESTILACIÓN.	326
PLANO 3: PLATO DE DESTILACIÓN.....	327
PLANO 4: AERORREFRIGERADOR	328
PLANO 5: REHERVIDOR.	329
PLANO 6: ACUMULADOR DE REFLUJO.....	330



	NOMBRE	FECHA	FIRMA	FACULTAD DE CIENCIAS UNIVERSIDAD DE CÁDIZ
Dibujado	Rosa Maria Badani Prado	Noviembre 2014	<i>[Signature]</i>	
Comprobado				
ESCALA 1:500	DISTRIBUCIÓN EN PLANTA			Nº PLANO 1
				Sustituye a:
				Sustituido por:



	NOMBRE	FECHA	FIRMA	FACULTAD DE CIENCIAS UNIVERSIDAD DE CÁDIZ
Dibujado	Rosa María Badani Prado	Noviembre 2014	<i>[Firma]</i>	
Comprobado				
ESCALA 1:125	COLUMNA DE DESTILACIÓN			Nº PLANO 2
				Sustituye a:
				Sustituido por:



	NOMBRE	FECHA	FIRMA
Dibujado	Rosa María Badani Prado	Noviembre 2014	<i>[Signature]</i>
Comprobado			

FACULTAD DE CIENCIAS
UNIVERSIDAD DE CÁDIZ

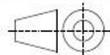
ESCALA
1:50

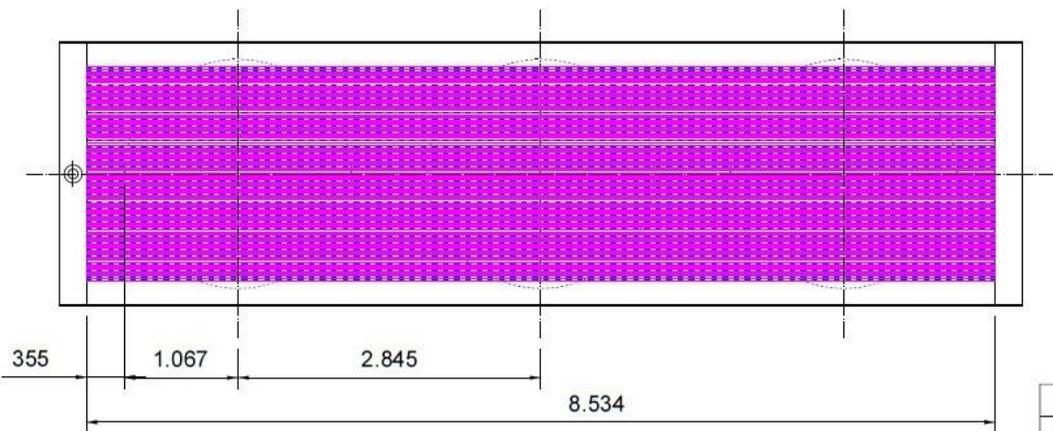
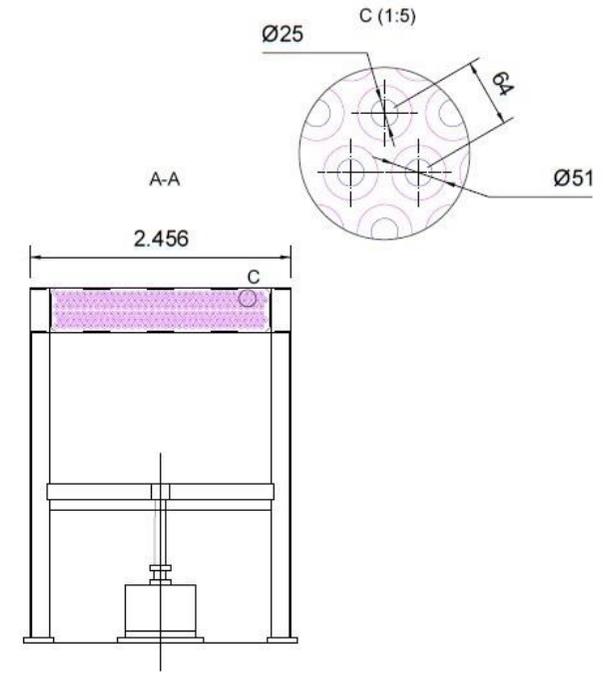
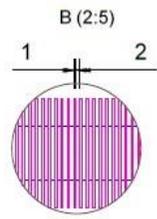
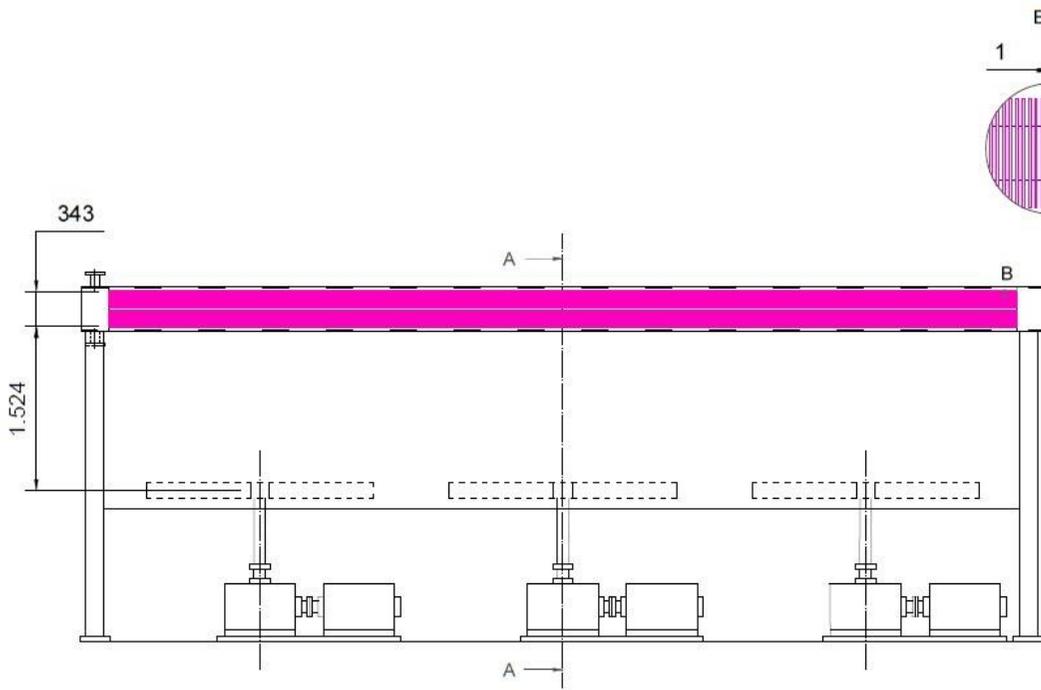
PLATO DE DESTILACIÓN

Nº PLANO 3

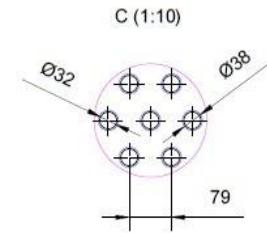
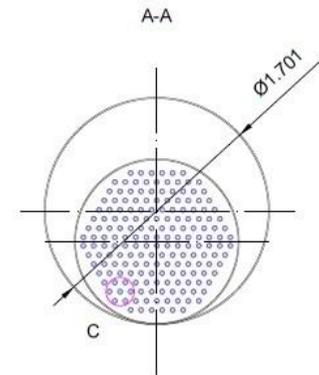
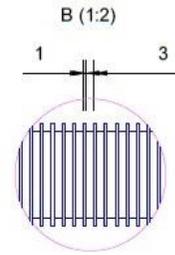
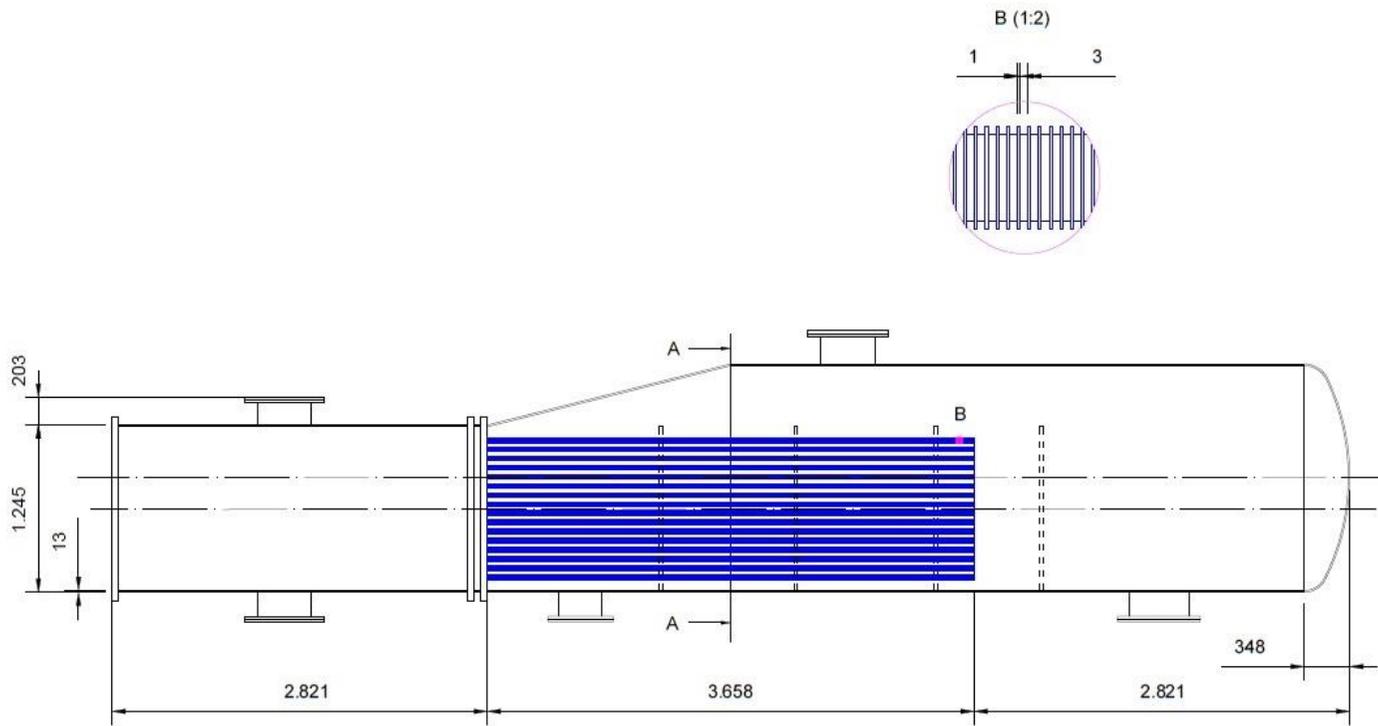
Sustituye a:

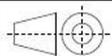
Sustituido por:

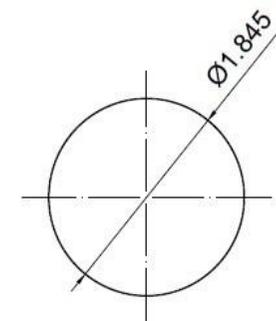
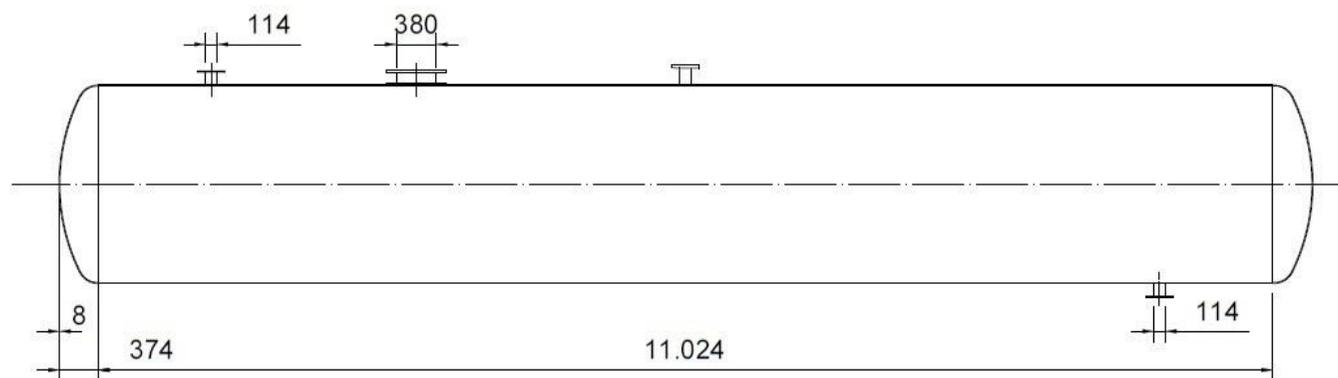


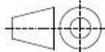


	NOMBRE	FECHA	FIRMA	FACULTAD DE CIENCIAS UNIVERSIDAD DE CÁDIZ
Dibujado	Rosa María Badani Prado	Noviembre 2014	<i>Rosa María</i>	
Comprobado				
ESCALA 1:50	AERORREFRIGERADOR			Nº PLANO 4
				Sustituye a:
				Sustituido por:



	NOMBRE	FECHA	FIRMA	FACULTAD DE CIENCIAS UNIVERSIDAD DE CÁDIZ
Dibujado	Rosa María Badani Prado	Noviembre 2014	<i>[Signature]</i>	
Comprobado				
ESCALA	REHERVIDOR			Nº PLANO 5
1:40				Sustituye a:
				Sustituido por:



	NOMBRE	FECHA	FIRMA	FACULTAD DE CIENCIAS UNIVERSIDAD DE CÁDIZ
Dibujado	Rosa María Badani Prado	Noviembre 2014	<i>Rosa María Badani Prado</i>	
Comprobado				
ESCALA 1:50	ACUMULADOR DE REFLUJO			Nº PLANO 6
				Sustituye a:
				Sustituido por:

REDISEÑO DE UNA LÍNEA DE
FRACCIONAMIENTO DE ALQUILACIÓN DE
PARAFINAS.

PARTE I: UNIDAD DE RECUPERACIÓN DE
BENCENO.

DOCUMENTO 4: PLIEGO DE CONDICIONES

AUTORA: D^a. ROSA MARÍA BADANI PRADO

Índice Pliego de Condiciones

CAPÍTULO 1: PLIEGO DE CLÁUSULAS ADMINISTRATIVAS.....	334
1.1 INTRODUCCIÓN.....	334
1.2 DISPOSICIONES GENERALES.....	334
1.2.1 Definición y alcance del pliego.....	334
1.2.2 Descripción y objetivo del proyecto.....	335
1.2.3 Emplazamiento.....	335
1.2.4 Documentos del proyecto que definen las obras.....	335
1.2.5 Normas, reglamentos y ordenanzas para los materiales y obras.....	336
1.2.6 Normas de edificación.....	337
1.2.7 Normas UNE.....	338
1.2.8 Normas ISO.....	338
1.3 DISPOSICIONES FACULTATIVAS.....	338
1.3.1 Partes que intervienen en el pliego. Términos del pliego de condiciones.....	338
1.3.2 Obligaciones y derechos del contratista.....	339
1.3.3 Facultades en la dirección de obra.....	341
1.3.4 Documentación del seguimiento de la obra.....	342
1.3.5 Replanteo.....	343
1.3.6 Condiciones generales del suministro de equipos y materiales.....	343
1.3.7 Discrepancias entre pliegos y normas.....	344
1.3.8 Control de recepción.....	344
1.3.9 Control de ejecución.....	344
1.3.10 Control de finalización.....	345
1.3.11 Ejecución de las obras.....	346
1.3.12 Partidas de alzada.....	347
1.3.13 Recepción y liquidaciones.....	347
1.3.14 Plazo de garantía.....	347
1.4 CONDICIONES ECONÓMICAS.....	348
1.4.1 Fianzas.....	348
1.4.2 Composición de precios unitarios.....	349
1.4.3 Capital de trabajo.....	351
1.4.4 Coste de puesta en marcha.....	351
1.4.5 Precios contradictorios.....	351
1.4.6 Mejoras y modificaciones.....	352
1.4.7 Revisión de precios.....	352
1.4.8 Valoración, medición y abonos de los trabajos.....	353
1.4.9 Penalizaciones.....	353
1.4.10 Seguros y conservación de la obra.....	353
1.4.11 Condiciones de pago.....	354
1.5 CONDICIONES LEGALES.....	355
1.5.1 Contratista.....	355
1.5.2 Contrato.....	356
1.5.3 Adjudicación.....	356
1.5.4 Arbitraje y jurisdicción competente.....	357
1.5.5 Responsabilidades del Contratista.....	357
1.5.6 Subcontrata.....	357
1.5.7 Accidentes de trabajo.....	358

1.5.8	Rescisión de contrato	358
CAPÍTULO 2: PLIEGO DE CONDICIONES PARTICULARES		360
2.1.	INTRODUCCIÓN	360
2.2.	DISPOSICIONES GENERALES	360
2.3.	CONDICIONES DE MATERIALES, EQUIPOS Y MAQUINARIA.	360
2.4.	CONDICIONES GENERALES DE EJECUCIÓN.	361
2.5.	PLIEGOS, INSTRUCCIONES Y NORMAS APLICABLES	362
2.5.1.	<i>Disposiciones de carácter particular.</i>	362
2.5.2.	<i>Materiales, equipos y maquinaria.</i>	362
2.5.3.	<i>Condiciones de ejecución.</i>	374

CAPÍTULO 1: Pliego de cláusulas administrativas.

1.1 Introducción.

Las disposiciones administrativas del pliego de condiciones desempeñan una parte del papel de cabecera de los 7 documentos que conforman el proyecto. Es un documento complementario que comprende las condiciones de índole general, facultativa y económica.

1.2 Disposiciones generales.

1.2.1 Definición y alcance del pliego.

Este escrito tiende a unificar criterios y establecer normas definidas en las obras implicadas, conteniendo la información necesaria para que el proyecto se pueda ejecutar de manera correcta.

Se pretende establecer las siguientes disposiciones generales:

- Reglamento de contratación de competencias locales.
- Ley, Reglamento y pliego de contrataciones del Estado.
- Pliego de cláusulas económico-administrativas particulares.
- Ordenanza laboral de seguridad e higiene en el trabajo, así como cualquier otra que, se dicte, de carácter general.
- Ley de contrato de trabajo y disposiciones vigentes que regulan las relaciones patrón-obrero.

El encargado de vigilar los trabajos cumpliendo las instrucciones descritas en el pliego de condiciones, así como intervenir y comprobar en los replanteos de acciones en cuanto a las obras, es el Contratista.

1.2.2 Descripción y objetivo del proyecto.

La unidad de diseño a la que el presente proyecto se dedica, se sitúa en la fase de fraccionamiento de la etapa de Alquilación en la producción de Sulfonato de Alquilbenceno Lineal (LAS).

El objetivo de la unidad es la recuperación del benceno y del resto de ácido fluorhídrico contenidos en el fluido de ingreso o alimentación, de forma que mediante la separación de componentes se logre obtener un producto emanado de fondo de columna que no sobrepase de 50 partes por millón (ppm) de benceno.

1.2.3 Emplazamiento.

La unidad de recuperación de benceno, al ser un rediseño de la línea de fraccionamiento de alquilación de parafinas y concretamente de las dos columnas que actualmente operan en el grupo CEPESA, encargadas de esta operación, va a situarse en la misma refinería donde éstas se ubican. La localización es barrio de Puente Mayorga, municipio de San Roque (Cádiz) al sur de España.

1.2.4 Documentos del proyecto que definen las obras.

Los documentos que definen el proyecto, y que por tanto, son de obligado cumplimiento, establecen las pautas de construcción de la unidad. En caso de que se realice un replanteamiento o modificación de algún punto de la obra, deberá ser autorizado antes de su ejecución y luego de su análisis y verificación. Los escritos son los siguientes:

- Documento 1: Memoria
- Documento 2: Anexos
- Documento 3: Planos
- Documento 4: Pliego de condiciones
- Documento 5: Estado de mediciones.
- Documento 6: Presupuesto.
- Documento 7: Estudios con entidad propia.

El orden de prioridad en caso de cualquier contradicción o anomalía entre alguno de los documentos expresados es: planos, pliego de condiciones,

presupuesto y memoria; y como documentos de carácter informativo se tienen los documentos anexos.

1.2.5 Normas, reglamentos y ordenanzas para los materiales y obras.

Deben observarse las disposiciones vigentes aplicables en construcción, así como las recogidas en la Memoria referidas a la seguridad e higiene y cuidado del medio ambiente.

Las disposiciones que se siguen referidas a materiales y obras se indican a continuación:

- **Real Decreto 315/2006**, de 17 de marzo, sobre la creación del consejo sobre la sostenibilidad, innovación y calidad de edificación.
- **Real Decreto 919/2006**, de 28 de julio, por el que se aprueba el reglamento técnico de distribución y utilización de combustibles gaseosos y sus instrucciones técnicas complementarias IDG 01 a 11.
- **Orden FOM/891/2004**, de 1 de marzo por la que se actualizan determinados artículos de pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes, relativos a firmes y pavimentos.
- **Real Decreto 1797/2003**, de 26 de diciembre, por el que se aprueba la instrucción para la recepción de cementos (RC-03).
- **Orden FOM/475/2002**, de 13 de febrero, por la que se actualizan determinados artículos del pliego de preinscripciones técnicas generales para la obra de carreteras y puentes relativos a hormigones y aceros.
- **Real Decreto 2267/2004**, de 3 de diciembre, por el que se aprueba el reglamento de seguridad contra incendios en los establecimientos industriales.
- **Real Decreto 1675/2008**, de 17 de octubre, por el que se modifica el Real Decreto 1371/2007, de 19 de octubre, por el que se aprueba el Documento Básico "DB-HR Protección frente al ruido".
- **Ley 6/2001**, de 8 de mayo, de modificación del Real Decreto Legislativo 1302/1986, de 29 de junio, de evaluación del impacto ambiental.
- **Real Decreto 1124/2000**, de 16 de junio, por el que se modifica el Real Decreto 665/1992, de 12 de mayo, sobre la protección de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición a

agentes cancerígenos durante el trabajo (B.O.E. núm 145 de 17 de junio de 2000).

- **Real Decreto 1299/2006**, de 10 de noviembre, por el que se aprueba el cuadro de enfermedades profesionales en el sistema de la seguridad social y se establecen criterios para su notificación y registro. (B.O.E. núm. 302 de 19 de diciembre)

1.2.6 Normas de edificación.

- Normas Básicas de Edificación (NBE).
- Normas Tecnológicas de Edificación (NTE)
 - Relativas a cimentaciones.
 - Relativas a estructuras de acero (EA).
 - Relativas a instalaciones de electricidad de puesta a tierra (JET).
 - Relativas a instalaciones de electricidad de red exterior (IR).
 - Relativas a instalaciones de electricidad de transformadores (IET).
 - Relativas a instalaciones de fontanería de abastecimiento (IFA).
 - Relativas a instalaciones de salubridad de alcantarillado (ISA).
 - Relativas a instalaciones de salubridad de humos y gases (ISH).
 - Relativas a instalaciones de salubridad de depuración de vertidos (ISD).
- Reglamento del agua.
- Instrucciones EH-91 y EP-80 para el proyecto y la ejecución de obras de hormigón en masa o armado.
- Instrucciones para la fabricación y suministro de hormigón preparado (EHPRE-72). (OM del 10 de mayo de 1973).
- Reglamento sobre recipientes y aparatos a presión, aprobado por el Decreto 1244/1979 de 4 de abril.
- Pliego de prescripciones técnicas generales para la recepción de cementos (RC-93).
- Normas I.N.T.A. (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial "Esteban Terradas") de la comisión 17 sobre pinturas, barnices, etc.
- Reglamento de la línea eléctrica de alta tensión. Decreto 3151/68, de 28 de noviembre.

1.2.7 Normas UNE.

Normas UNE (Una Norma Española) que afectan en relación a la seguridad y otras características de los materiales, equipos y unidades de obra incluidos en el proyecto.

1.2.8 Normas ISO.

Normas ISO (International Organization for Standardization) afectan a los materiales, equipos y unidades de obra incluidos en el proyecto.

1.3 Disposiciones facultativas.

Estas condiciones, determinan las funciones, responsabilidades y relaciones entre los distintos agentes de la edificación. Es decir:

- Delimitación de las funciones de los distintos agentes intervinientes.
- Obligaciones y derechos tanto del constructor como del contratista.
- Prescripciones relativas a trabajos, materiales y medios auxiliares.
- De las recepciones de edificios y obras anexas.

1.3.1 Partes que intervienen en el pliego. Términos del pliego de condiciones.

El significado de los términos desarrollados en el presente pliego es el siguiente:

Propiedad

Representada por una persona física, entidad pública o privada o un consorcio de varias de éstas. Los derechos de este proyecto pertenecen a la refinería del grupo CEPESA situada en San Roque, provincia de Cádiz (España).

Director de obra o director facultativo.

Es el representante de la propiedad, y velará por los intereses de éste ante el ejecutor del proyecto (contratista).

Contratista.

También llamado ejecutor del proyecto o contrata, ya que puede ser una persona física, entidad pública o privada o un consorcio de las mismas. Es el encargado de la ejecución y puesta en marcha del proyecto.

1.3.2 Obligaciones y derechos del contratista.

El contratista asume contractualmente ante el empresario principal, con medios humanos y materiales propios o ajenos, el compromiso de ejecutar la totalidad o parte de los trabajos con sujeción a un proyecto o un contrato [39].

Información.

La Propiedad debe facilitar al Contratista tres copias, libre de gasto, de todos los planos necesarios para la ejecución de la obra. En caso de que necesite más copias, el Contratista deberá abonar el coste de las mismas.

Contratación del personal.

Corresponde al Contratista, bajo su exclusiva responsabilidad, la contratación de toda la mano de obra que precise para la ejecución de los trabajos en las circunstancias y plazos previstos por el contrato y en las condiciones que fije la normativa laboral vigente.

Debe prestar máximo cuidado en la selección del personal que emplee, ya que por un lado deberá disponer del equipo técnico adecuado necesario para la correcta interpretación de los planos, para elaborar los planos de detalle, para efectuar los replanteos que le correspondan y para la ejecución de la obra de acuerdo con las normas establecidas, y por otro él mismo será el responsable de los fraudes o malversaciones que sean cometidas por su personal en el suministro o en el empleo de los materiales.

Obligaciones sociales y laborales.

El contratista tiene la obligación de haber inspeccionado y estudiado el emplazamiento y sus alrededores, la naturaleza del terreno, las condiciones hidrológicas y climáticas, la configuración y naturaleza del emplazamiento de las obras, el alcance y naturaleza de los trabajos a realizar y los materiales necesarios para la ejecución de las obras, los accesos a los emplazamientos y los medios que pueda necesitar.

Deberá constituir el órgano necesario con función específica de velar por el cumplimiento de las disposiciones vigentes sobre Seguridad e Higiene en el Trabajo y designará el personal técnico de seguridad que asuma las obligaciones correspondientes en cada centro de trabajo.

Adicionalmente, a su costa, debe establecer los servicios que requiera la eficiente explotación de sus instalaciones y la correcta ejecución de la obra, como: servicios técnicos (topografía, delineación, mediciones y valoración), de seguridad e higiene del trabajo, médicos y de primeros auxilios, de transportes, de comunicaciones, de vigilancia, de talleres (mecánicos, eléctricos, de carpintería, etc), de prevención y extinción de incendios, etc.

Así mismo, está obligado a evitar la contaminación del aire, cursos de agua y suelos o cualquier clase de bien público o privado que pueda producirse por la ejecución de las obras.

Vigilancia de obras.

El Contratista es responsable del orden, la limpieza y condiciones sanitarias de las obras objeto del contrato, por lo que deberá adoptar a su cargo y bajo su responsabilidad, las medidas que le sean señaladas por las Autoridades competentes, por los Reglamentos vigentes y por el Director.

Debe estar en todo momento en la obra, o puede nombrar un representante, aceptado previamente por Dirección de obra.

Registro de información.

El Constructor tendrá siempre en la oficina de obra y a disposición del Coordinador en materia de seguridad y salud, el libro de incidencias.

Así también, tendrá en la oficina, y a disposición de la Dirección facultativa, el libro de órdenes y asistencias.

1.3.3 Facultades en la dirección de obra.

Interpretación técnica.

El Director de obra es el agente que, formando parte de la dirección facultativa, dirige el desarrollo de la obra en los aspectos técnicos, estéticos, urbanísticos y medio-ambientales, de conformidad con el proyecto que la define, la licencia de edificación y demás autorizaciones preceptivas y las condiciones del contrato, con el objeto de asegurar su adecuación al fin propuesto.

Conjuntamente con la interpretación técnica del proyecto, que corresponde a la Dirección Facultativa, el Contratista tiene como misión la dirección y vigilancia de los trabajos que en las obras se realicen. Con la finalidad de evaluar y considerar que adoptar una resolución de modificación es útil y necesaria para la buena marcha de la obra, posee la autoridad técnica legal completa sobre las personas y cosas situadas en la obra y en relación con los trabajos para que la ejecución de las obras, e instalaciones anexas, se lleven a cabo.

Debe considerar que las modificaciones que realice no alteren las líneas generales del proyecto, que no exceda la garantía técnica, y estén justificadas de forma apropiada.

Actividades y deberes.

Se encarga así mismo, del reconocimiento de los materiales necesarios para la ejecución de las obras, realizando los análisis pertinentes de al menos dos muestras del material en consideración, reservándose el derecho a desechar aquellos que, a su juicio, no reúnan las características requeridas o deseables. Esos materiales se conservarán, como elementos de referencia para posteriores observaciones, junto con su certificación de admisión y análisis, retirando lo antes posible los materiales rechazados.

El Director de obra, o las personas delegadas por él, serán las únicas encargadas de dar orden al contratista acerca de las actividades relativas a la ejecución de la obra. De manera que, si alguna unidad de obra estuviera defectuosamente o incorrectamente ejecutada según el criterio del Director de obra, el Contratista está obligado a demolerla y a ejecutarla cuantas veces sean necesarias hasta que cumpla con las expectativas.

1.3.4 Documentación del seguimiento de la obra.

Documentación obligatoria del seguimiento de la obra.

Las obras de edificación dispondrán de una documentación de seguimiento que se compondrá, al menos del Libro de Órdenes y Asistencias, el Libro de Incidencias, el proyecto y sus anexos y modificaciones debidamente autorizadas por el Director de obra, la Licencia de Obras y el Certificado final de la obra.

Documentación del control de la obra.

El control de calidad de las obras realizado incluirá el control de recepción de productos, los controles de la ejecución y de la obra terminada. Una vez finalizada la obra, la documentación del seguimiento del control será entregada por el Director de la obra a las autoridades pertinentes.

Certificado final de obra.

El Director de obra certifica en este documento, haber dirigido la ejecución material de las actividades y controlado cuantitativa y cualitativamente la construcción y la calidad de lo edificado de acuerdo con el proyecto. Se adjuntan además, la descripción de las modificaciones que se hubiesen contemplado durante la obra y la relación de los controles realizados durante su ejecución.

1.3.5 Replanteo.

Se procede al replanteo de las obras a cargo de la Dirección de obra y en presencia del Contratista, señalando todos los puntos de referencia indispensables para su ejecución.

Debe extenderse un acta constatada o un proyecto reformado, por ambos agentes, que indique la concordancia del replanteo en el entorno a realizarse. Si se recurre a la primera opción, podrían iniciarse las obras, mientras que en la segunda, solamente se informará a la Propiedad.

En caso de que se realice un proyecto reformado, la Propiedad tomará la decisión final de aprobarlo o denegarlo, y la comunicará al Contratista, el cual deberá asumir la responsabilidad de cumplir con lo acordado y facilitar los medios para realizarlo. Se toma en cuenta que el aumento de presupuesto conseguido con la modificación, en su caso, no sobrepase un 10% del presupuesto de la obra [40].

1.3.6 Condiciones generales del suministro de equipos y materiales.

El contratista tiene libertad de seleccionar materiales y aparatos diferentes como le parezca conveniente, siempre que reúnan las condiciones exigidas en el contrato, que estén perfectamente preparados para el objeto para el que se apliquen, y sean empleados en obra conforme a las reglas del pliego de condiciones.

La excepción, radica cuando el pliego de condiciones especifique el origen preciso de los materiales y equipos, en cuyo caso, se tornará como requisito indispensable de cumplimiento salvo orden por escrito del Director de obra.

En todos los casos, el Contratista es obligado a presentar el Certificado de garantía o Documento de idoneidad técnica de los diferentes materiales destinados a la ejecución de la obra, así como los documentos de origen y hoja de suministro y etiquetado.

Todos los materiales y generalmente todos los aparatos, deben reunir las condiciones exigidas redactadas en el pliego de condiciones, caso contrario, pueden ser rechazados.

1.3.7 Discrepancias entre pliegos y normas.

Si se diera la ocasión de una discordancia entre el pliego redactado y las normas en las que se basa, esta puede justificarse, permaneciendo dominante lo escrito en el pliego.

El Contratista debe ejecutar el pliego de condiciones de una obra, sin omitir ningún detalle, y en caso de que haya alguna descripción errónea o falta de alguna especificación que es realizada de forma frecuente o habitual en el área, en planos o en el mismo pliego, debe subsanarlos y ejecutarlos como si los documentos se hubieran completado correctamente.

1.3.8 Control de recepción.

El suministrador proporcionará la documentación precisa sobre los distintivos de calidad que ostenten los productos, equipos o sistemas suministrados, que aseguren las características técnicas de los mismos exigidas en el proyecto, así como las evaluaciones técnicas de idoneidad para el uso previsto de productos, equipos y sistemas innovadores y la constancia del mantenimiento de sus características.

El Director de la ejecución de la obra, debe verificar esta documentación analizando si es suficiente para la aceptación de los productos, equipos y sistemas mediante ensayos o pruebas realizados en estos.

El Contratista, aun así, debe subsanar, reponer o reparar los equipos que no pasen el reconocimiento final. Todos los gastos originados por las pruebas y ensayos de materiales o elementos que intervengan en la ejecución de las obras, serán de cuenta de la contrata. Todo ensayo que no haya resultado satisfactorio o que no ofrezca las suficientes garantías podrá comenzarse de nuevo a cargo del mismo.

1.3.9 Control de ejecución.

Durante la construcción, el Director de ejecución controlará cada unidad de obra verificando su replanteo, los materiales empleados, la correcta ejecución y disposición de los elementos constructivos y de las instalaciones, así como las verificaciones y demás controles a realizar para comprobar su conformidad con

lo indicado en el proyecto, la legislación aplicable, las normas de buena práctica constructiva y las instrucciones de la dirección facultativa.

En la recepción de la obra, pueden tenerse en cuenta las certificaciones de gestión de calidad que ostenten los agentes que intervienen, así como las verificaciones que, en su caso, realicen las entidades de control de calidad de la construcción.

Se comprobará que se han adoptado las medidas necesarias para asegurar la compatibilidad entre los diferentes productos, elementos y sistemas constructivos.

En el control de ejecución de la obra se adoptarán los métodos y procedimientos que se contemplen en las evaluaciones técnicas de idoneidad para el uso previsto de productos, equipos y sistemas innovadores.

1.3.10 Control de finalización

Control de la obra

Se trata del control realizado en la obra terminada, sobre las diferentes partes y equipos que conforman la unidad. Deben realizarse comprobaciones y pruebas de servicio previstas en el proyecto u ordenadas por la dirección facultativa y las exigidas por la legislación aplicable.

Recepción provisional

Una vez terminada la totalidad de las obras, se procederá a la recepción provisional, para la cual será necesaria la asistencia de un representante de la Propiedad, de los Directores de las obras y del Contratista o su representante. Del resultado de la recepción se extenderá un acta por triplicado, firmada por los tres asistentes legales antes indicados.

Si las obras se encuentran en buen estado y han sido ejecutadas con arreglo a las condiciones establecidas, se darán por recibidas provisionalmente, comenzando a correr en dicha fecha el plazo de garantía de un año.

Cuando las obras no se hallen en estado de ser recibidas, se hará constar en el acta y se especificarán en la misma los defectos observados, así como las instrucciones al Contratista, que la Dirección Técnica considere necesarias para remediar los efectos observados, fijándose un plazo para subsanarlo, expirado el cual, se efectuará un nuevo reconocimiento en idénticas condiciones, a fin de proceder de nuevo a la recepción provisional de la obra.

Si el Contratista no hubiese cumplido, se considerará rescindida la contrata con pérdidas de fianza, a no ser que se estime conveniente se le conceda un nuevo e improrrogable plazo.

Será condición indispensable para proceder a la recepción provisional la entrega por parte de la contrata a la Dirección Facultativa de la totalidad de los planos de obra generales y de las instalaciones realmente ejecutadas, así como sus permisos de uso correspondientes.

1.3.11 Ejecución de las obras

El adjudicatario deberá dar comienzo a las obras dentro de los quince días siguientes a la fecha de adjudicación definitiva a su favor, dando cuenta de oficio a la Dirección Técnica, del día que se propone inaugurar los trabajos, quien acusará recibo.

Las obras deberán quedar total y absolutamente terminadas en el plazo que se fije en la adjudicación a contar desde igual fecha que en el caso anterior. No se considerará motivo de demora de las obras la posible falta de mano de obra o dificultades en la entrega de los materiales ya que todo debe haberse previsto por el Contratista.

En caso de que por fuerza mayor, no estuviesen perfectamente concluidas las obras y en disposición de inmediata utilización o puesta en servicio, dentro del plazo previsto, la Propiedad en vínculo con la Dirección Técnica, podrá reducir de las liquidaciones, fianzas o emolumentos de toda clase que tuviese en su poder las cantidades establecidas según las cláusulas del contrato privado entre Propiedad y Contrata.

1.3.12 Partidas de alzada

Para la ejecución material de las partidas alzadas deberá obtenerse la previa aprobación de la Dirección de obra. A tal efecto, antes de proceder a la ejecución, se someterá a su consideración el detalle desglosado del importe de las mismas, que en caso de resultar todo conforme a lo requerido se procede a su realización.

1.3.13 Recepción y liquidaciones

Finalizado el plazo de garantía se procederá a la recepción definitiva, con las mismas formalidades de la provisional. Si se encontraran las obras en perfecto estado de uso y conservación, se darán por recibidas definitivamente y quedará el Contratista relevado de toda responsabilidad administrativa quedando subsistente la responsabilidad civil.

1.3.14 Plazo de garantía

El plazo de garantía de las obras terminadas será de un año, transcurrido el cual, se efectuará la recepción definitiva de las mismas que, de resolverse favorablemente, relevará al Constructor de toda responsabilidad de conservación, reforma o reparación.

Dado el caso de hallarse anomalías y obras defectuosas, la Dirección Técnica concederá un plazo prudencial para que sean subsanadas, y si a la expiración del mismo resultase que aun el Constructor no hubiese cumplido su compromiso, se rescindirá el contrato, con pérdida de la fianza, ejecutando la Propiedad las reformas necesarias con cargo a la citada fianza.

El Contratista garantiza en general todas las obras que ejecute, así como los materiales empleados en ellas y su correcta manipulación. Si se diera la situación en que el Contratista no cumpliera con esta obligación, las reparaciones serán ejecutadas por la Propiedad con cargo a las retenciones.

La recepción final de los equipos conlleva la entrega de la lista de repuestos, precio y lugares de adquisición recomendados. El Contratista podrá contratar con la Propiedad un contrato de mantenimiento preventivo o de asistencia en caso de avería, que cubra el período de garantía y el tiempo posterior a éste.

Con relación a las cuentas pendientes de resolver, o que durante el periodo de garantía o en la ejecución de pruebas surgieran, incluyendo reparaciones, modificaciones o sustituciones de equipos, el Contratista queda obligado a mantener un representante con capacidad y obligación de firmar las actas que se levanten.

La garantía contra toda reclamación de terceras personas que tenga su origen en el incumplimiento de obligaciones económicas o de disposiciones legales relacionadas con la obra, es realizada por el Contratista hacia la Propiedad. Una vez aprobada la recepción y liquidación definitiva, la Propiedad devolverá, en su caso, las cantidades retenidas al Contratista en las certificaciones.

1.4 Condiciones Económicas

Estas condiciones regulan las relaciones económicas entre Propiedad y Contrata, y la función de control que ejerce la Dirección de obra.

Todos los que intervienen en el proceso de construcción tienen derecho a percibir puntualmente las cantidades devengadas por su correcta actuación, con arreglo a las condiciones contractualmente establecidas.

La Propiedad, el Contratista, y en su caso los técnicos, pueden exigirse recíprocamente las garantías adecuadas al cumplimiento puntual de sus obligaciones de pago.

1.4.1 Fianzas

El contratista prestará fianza con arreglo a alguno de los siguientes procedimientos según se estipule:

- Depósito previo, en metálico, valores o aval bancario, por importe entre el 4% y el 10% del precio total de contrata.
- Mediante retención en las certificaciones parciales o pagos a cuenta en igual proporción.

Se elige un depósito previo, por importe del 5% del precio total de contrata prestada por el Contratista. La fianza retenida, será devuelta al agente en un plazo que no exceda 30 días, una vez firmada el Acta de Recepción

Definitiva de la obra, siempre y cuando no existan penalizaciones de algún tipo por incumplimiento de algún apartado del contrato, en cuyo caso se descuenta de la fianza el valor de los mismos devolviendo el resto al Contratista en ese mismo plazo.

La propiedad podrá exigir que el contratista le acredite la liquidación y finiquito de sus deudas causadas por la ejecución de la obra, tales como salarios, suministros, subcontratos, etc.

1.4.2 Composición de precios unitarios

Todos los precios unitarios se entienden valorados para cada partida completamente terminada y, en el caso de equipos y maquinaria funcionando, están comprendidos en ella proporcional de costes de puesta a punto, permisos, boletines, licencias, tasas, suministros para pruebas, etc.

El cálculo de los precios de las distintas unidades, o inversión de capital fijo de obra es el resultado de sumar los costes directos, indirectos.

Todas las partidas que intervienen en el presupuesto tendrán su precio unitario descompuesto descrito de forma completa, de manera que queden determinadas cualitativa y cuantitativamente todas las características técnicas importantes de cada unidad a ejecutar, así como sus prestaciones en el caso de los equipos, y su precio final se presentará escrito en letras, expresado en euros con dos decimales.

Costes directos

Los costes directos son la suma del coste del material y de obra requerido para construir la planta completamente, considerando los costes de equipos dentro y fuera de los límites de la planta.

Los costes de equipos dentro de los límites de la planta corresponden a los costes de compra e instalación de los equipos que se muestran en el diagrama de flujo e incluye los siguientes puntos:

- Coste de compra e instalación de equipos: Equipos listados en el diagrama de flujo, equipos de repuesto, instalación de los mismos, soportes estructurales, aislamiento y pintura.

- Coste de instrumentación y control: Coste de compra instalación y calibración del equipo de instrumentación y control.
- Coste de tuberías: Tuberías, soportes, accesorios, válvulas y aislamiento.
- Coste de equipos y materiales eléctricos: Coste de compra e instalación del equipo eléctrico incluyendo motores, alambres, interruptores, alimentadores, paneles de iluminación y mano de obra asociada.

El coste fuera de los límites de la planta incluye los costos directamente relacionados con el proceso pero construidos en una localización separada de los equipos principales de proceso, estos son:

- Costo de edificios: Incluye la renovación del taller de mantenimiento con sus complementos, la sala de monitorización del proceso y la zona de recreación del personal con sus correspondientes escaleras, elevadores, laboratorios, tuberías, carpintería, instrumentos, calefacción, ventilación, teléfonos, intercomunicación, pintura, sistema de alarma, etc.
- Arreglo de áreas: Incluye aseo de áreas del taller, sala de monitorización y zona de recreación.
- Facilidades de servicio: Tomas de agua, planta de tratamiento de desechos y equipos de no proceso como amoblado de oficina, equipo de cafetería, equipo médico y de seguridad, equipo de laboratorio, extintores, mangueras, bombas de incendio, equipos de carga, rociadores de agua y sistema de extinción por espuma.

Costes indirectos

Son los costos relacionados con las construcciones temporales, personal de supervisión e imprevistos:

- Ingeniería y supervisión.
- Costes de construcción: construcciones temporales, equipos y herramientas de construcción, supervisión de construcción, contabilidad, seguridad y servicio médico, permisos, licencias especiales, impuestos, seguros e intereses.
- Pago a contratistas.

- Contingencias e imprevistos: Se contabiliza para compensar eventos no predecibles, tales como cambios de precios, modificaciones en el diseño, errores en las estimaciones, huelgas, tormentas, etc.

1.4.3 Capital de trabajo

Es el monto requerido para operar la planta, comprende las materias primas para un mes de suministro (vapor de agua, electricidad para los intercambiadores de calor y equipos auxiliares de la unidad), el costo de producción, el dinero a recibir correspondiente al tiempo que se da a los compradores para pagar el producto, dinero en efectivo para pagar gastos de operación, salarios, y pago de impuestos del primer mes.

1.4.4 Coste de puesta en marcha

El coste de puesta en marcha engloba las modificaciones del proceso necesarias para cumplir con las especificaciones del diseño, la mano de obra de partida o puesta en marcha y las pérdidas de producción o pérdidas mientras se pone en operación el proceso.

1.4.5 Precios contradictorios

Se producirán precios contradictorios sólo cuando la Propiedad, por medio del Director de obra, decida introducir unidades o cambios de calidad en alguna de las previstas, o cuando sea necesario afrontar alguna circunstancia imprevista. El Contratista está obligado a efectuar los cambios.

A falta de acuerdo, el precio se resolverá contradictoriamente entre el Director y el Contratista antes de comenzar la ejecución de los trabajos y en el plazo que determine el pliego de condiciones particulares. Si subsiste la diferencia se acudirá, en primer lugar, al concepto más análogo dentro del cuadro de precios del proyecto, y en segundo lugar al banco de precios de uso más frecuente en la localidad. Los contradictorios que hubiere se referirán siempre a los precios unitarios de la fecha del contrato.

1.4.6 Mejoras y modificaciones

No se admitirán mejoras de obra, más que en el caso en que el Director de obra haya ordenado por escrito la ejecución de trabajos nuevos o que mejores la calidad de los contratados, así como la de los materiales y aparatos previstos en el contrato. Tampoco se admitirán aumentos de obra en las unidades contratadas, salvo en casos de error en las mediciones del proyecto, a menos que el Director ordene, también por escrito, la ampliación de las contratadas.

En todos estos casos, será condición indispensable que ambas partes contratantes, antes de su ejecución o empleo, convengan por escrito los importes totales de las unidades mejoradas, los precios de los nuevos materiales o aparatos ordenados emplear y los incrementos que todas estas mejoras o aumentos de obra supongan sobre el importe de las unidades contratadas.

Se seguirá el mismo criterio y procedimiento, cuando el Director de obra introduzca innovaciones que supongan una reducción apreciable en los importes de las unidades de obras contratadas.

1.4.7 Revisión de precios

Contratándose las obras a riesgo y ventura, no se admitirá la revisión de los precios en tanto que el incremento no alcance, en la suma de las unidades que le falten por realizar de acuerdo con el calendario, un monto superior al 3% del importe total del presupuesto de contrato.

Caso de producirse variaciones en alza superiores a este porcentaje, se efectuará la correspondiente revisión de acuerdo con la fórmula establecida en el pliego de condiciones particulares, percibiendo el contratista la diferencia en más que resulte por la variación del IPC superior al 3%.

No habrá revisión de precios de las unidades que puedan quedar fuera de los plazos fijados en el calendario de la oferta.

1.4.8 Valoración, medición y abonos de los trabajos

Las valoraciones de las unidades de obra que figuren en el proyecto, se efectuarán multiplicando el número de aquellas por el precio unitario asignado a las mismas en el presupuesto.

En el precio unitario a que alude el párrafo anterior se consideran incluidos los gastos de transporte de materiales, indemnizaciones o pagos que deban realizarse por cualquier concepto, así como las cargas sociales o cualquier tipo de impuestos fiscales que graven los materiales, ya sea de origen estatal, autonómico o municipal. Es necesario agregar, que en el precio unitario se contemplan los costes de todos los materiales, accesorios y operaciones necesarias para dejar la obra terminada y en disposición de ser recibida.

Así mismo, los honorarios, tasas y otros gravámenes que se originen por inspecciones, aprobación y comprobación de las instalaciones con que esté dotado el local, serán cuenta del Contratista.

1.4.9 Penalizaciones

Finalizado el plazo de ejecución de obras, en la situación en que éstas no estén terminadas, se aplicarán los recargos que se mencionan a continuación hacia el Contratista:

- Por día natural de retraso, hasta los 30 días, el recargo es de un 0,1% de la fianza.
- Desde el día 31 hasta el 60, el recargo incrementa hasta un valor de 0,5% de la fianza.

Si se sobrepasan estos plazos, el contrato quedará rescindido, obligando al Contratista a responder por daños y perjuicios a la entidad afectada, y se procederá de igual manera, cuando el contrato entre ambos agentes se incumpla en algún aspecto afectando a la entidad.

1.4.10 Seguros y conservación de la obra

El contratista estará obligado a asegurar la obra contratada durante todo el tiempo que dure su ejecución hasta la recepción definitiva; la cuantía del

seguro coincidirá en cada momento con el valor que tengan por contrata los objetos asegurados.

El importe abonado por la sociedad aseguradora, en el caso de siniestro, se ingresará en cuenta a nombre del propietario, para que con cargo a ella se abone la obra que se construya, y a medida que ésta se vaya realizando.

El reintegro de dicha cantidad al contratista se efectuará por certificaciones, como el resto de los trabajos de la construcción. En ningún caso, salvo conformidad expresa del contratista, hecho en documento público, el propietario podrá disponer de dicho importe para menesteres distintos del de reconstrucción de la parte siniestrada.

La infracción de lo anteriormente expuesto será motivo suficiente para que el contratista pueda resolver el contrato, con devolución de fianza, abono completo de gastos, materiales acopiados, etc., y una indemnización equivalente al importe de los daños causados al contratista por el siniestro y que no se le hubiesen abonado, pero sólo en proporción equivalente a lo que suponga la indemnización abonada por la compañía aseguradora, respecto al importe de los daños causados por el siniestro, que serán tasados a estos efectos por el Director de obra.

En las obras de reforma o reparación, se fijarán previamente la porción de edificio que debe ser asegurada y su cuantía.

Los riesgos asegurados y las condiciones que figuren en la póliza o pólizas de seguros, los pondrá el contratista, antes de contratarlos, en conocimiento del propietario, al objeto de recabar de éste su previa conformidad o discordancia.

Además se han de establecer garantías por daños materiales ocasionados por vicios y defectos de la construcción.

1.4.11 Condiciones de pago

Las condiciones de pago tienen en cuenta cuatro aspectos fundamentales [41].

El primero de ellos es que los pagos se realizan mensualmente, abonando la totalidad del importe de la certificación aprobada respecto a unidades de obra completadas en ese periodo, es decir, gastos de aprovisionamiento, transporte, montaje, pruebas y ensayos, control de calidad, acabado de materiales, equipos

y obras necesarias, albañilería, electricidad, fontanería y de cualquier otra índole que sean precisas.

El segundo es que siempre que no se haya observado ningún defecto en la ejecución de los trabajos o la mala calidad de materiales, los montos o cantidades retenidas se reintegran, por la Propiedad al Contratista, una vez cumplido el plazo de garantía y firmado el acta de recepción definitiva.

El tercero, se presentan mensualmente, y en los primeros diez días de cada mes, a la representación de la Propiedad, el documento triplicado de las certificaciones que cuantifican por separado el importe de los trabajos realizados, reflejando el total acumulado de trabajo realizado hasta ese periodo.

Y el cuarto es que se presenta una última certificación, por parte del Contratista, mediante la cual conste con carácter definitivo la renuncia a toda reclamación por omisión de cantidades de trabajo no certificadas con antelación y que todos los precios de las unidades de trabajo realizadas son conformes.

1.5 Condiciones Legales

Dos partes se comprometen en sus diferencias, a una actividad mediadora y pacífica, designados uno de ellos por el Propietario, otro por el Contratista y tres arquitectos, uno de los cuales es el Director de la obra [42].

1.5.1 Contratista

El Contratista es responsable de la ejecución de las obras en las condiciones establecidas en el contrato y en los documentos que componen el Proyecto, excluida la memoria. Como consecuencia, vendrá obligado a la demolición y construcción de todo lo mal ejecutado durante las obras, aunque estas partidas hayan sido abonadas en liquidaciones anteriores.

El Contratista se obliga a lo establecido en la Ley de Contratos de Trabajo y, además, a lo dispuesto por la de Accidentes de Trabajo, Subsidio familiar y Seguros Sociales.

1.5.2 Contrato

Se pueden definir varios tipos de contrato. El contrato a precio alzado, en el que se estipula una cantidad determinada para las obras que no se modificarán por motivo alguno. El contrato por unidades de obra, que ocupa la mayoría de este proyecto. Y el contrato por administración, que consiste en una valoración de las obras sin partir de un presupuesto y de unas mediciones previas, no aplicable a este proyecto.

Este contrato se firma dentro de los diez días de notificada la adjudicación, tiempo a partir del cual, la Propiedad podrá extender la orden de inicio de obra. El Contratista no puede transferir ni ceder, en su totalidad o parcialmente el contrato a otra entidad, ni asociarse, para el cumplimiento de éste, sin autorización previa, y en su caso, por autorización escrita de la Propiedad.

1.5.3 Adjudicación

Se emplean las siguientes formas de adjudicación: precio más bajo, oferta económica más ventajosa o adjudicación directa. En la administración pública, el tipo de licitación se realiza con frecuencia a la baja sobre el precio de partida fijado. En el caso de entidades privadas, como el caso de este proyecto, la selección responde a diversos aspectos, como pueden ser la solvencia de la contrata, los plazos de ejecución etc., pero en forma de subasta cerrada.

Las ofertas son evaluadas sobre bases legales, técnicas, económicas y financieras, considerando la documentación técnica, las condiciones económico-financieras, el precio final y el tiempo de ejecución de la obra.

Se establece un rango razonable de precio de oferta, que se comprende entre el 10% y el 25% del precio estimado de ejecución de obra. Las ofertas que se encuentren por debajo de este rango, son consideradas de riesgo de ejecución. La Propiedad se reserva el derecho de rechazar alguna o todas las ofertas, incluidas las de menor precio, y para poder adjudicar la licitación, se debe contar con tres ofertas válidas entre las que se determine la de menor precio.

1.5.4 Arbitraje y jurisdicción competente

Se fijan las instancias a las que se ha de recurrir por las partes en caso de litigio o desavenencia. La Propiedad designa una Dirección Técnica, a la que el Contratista comunica por escrito el nombre del delegado del Contratista o jefe de obra; cualquier desacuerdo que surja entre ambas entidades sobre la interpretación o cumplimiento del contrato, es sometido a un arbitraje de equidad con arreglo a las normas que regulan el tipo de procedimiento.

1.5.5 Responsabilidades del Contratista

Se definen las responsabilidades que ha de asumir el Contratista durante la vigencia del contrato como el pago de materiales, jornales y otros gastos de calidad de ejecución, situación legal y laboral de personal, etc.

El Contratista es el único responsable ante Tribunales, de la situación legal, laboral, accidentes durante el trabajo y desperfectos de la obra, por lo que debe restaurar las últimas por su cuenta.

Proporciona a la Dirección Técnica o a sus auxiliares todas las facilidades para el replanteo, reconocimiento, mediciones y pruebas y ensayos de materiales e inspecciones visuales en la ejecución de las unidades de obra, con la finalidad de comprobar el cumplimiento de las condiciones del contrato.

Si se diera la situación del incremento del precio del material o unidades de obra, erradas maniobras durante la ejecución, no tiene derecho a indemnización alguna, siendo su responsabilidad y riesgo, independientemente de la inspección de la Dirección de obra.

1.5.6 Subcontrata

En las subcontratas, se regula la posible cesión de trabajos a otros suministradores o subcontratistas, y se establece una cláusula por la que el Contratista sigue siendo el único responsable del cumplimiento de todas las condiciones facultativas, económicas y legales del Pliego de Condiciones.

1.5.7 Accidentes de trabajo

Se exige el cumplimiento de la Ordenación de Higiene y Seguridad en el Trabajo, y de todas aquellas órdenes que regulan la ejecución de las obras, incluyendo el uso de prendas adecuadas, botiquín etc.

El Contratista es el responsable de los posibles daños al personal o a terceros que se puedan producir, teniendo la obligación de abonar todos los gastos que se produzcan. Está obligado a adoptar y hacer aplicar, a su costa, las disposiciones vigentes sobre la seguridad y medidas que pueda dictar la inspección de trabajo, organismos competentes y normas de seguridad que corresponden a las características de las obras.

1.5.8 Rescisión de contrato

En las causas de rescisión del contrato se desarrollan los motivos por los que la Propiedad puede rescindir el Contrato y en qué casos tiene derecho el Contratista a la devolución de la fianza y al cobro de las obras realizadas hasta el momento de la rescisión. Las causas son las siguientes:

- Muerte o incapacidad del Contratista
- Quiebra del Contratista
- Alteraciones del contrato por modificaciones en el proyecto, o alteraciones fundamentales, a juicio del Director de obras y, en cualquier caso, siempre que la variación del presupuesto de ejecución como consecuencia de estas modificaciones represente, más o menos, el 40% como mínimo, de alguna de las unidades del proyecto modificadas.
- Suspensión de obra comenzada, siempre que por causas ajenas a la Contrata, no se dé comienzo a obra adjudicada dentro del plazo de tres meses a partir de la adjudicación, es decir, en esta situación la devolución de la fianza será automática.
- La suspensión de obra comenzada, siempre que el plazo de suspensión haya excedido de un año; el no dar comienzo la Contrata a los trabajos dentro del plazo señalado en las condiciones particulares del proyecto.
- El incumplimiento de las condiciones del contrato cuando implique descuido con perjuicio de los intereses de la obra.

- La terminación del plazo de ejecución de la obra sin haberse llegado a ésta.
- El abandono de la obra sin causa justificada.
- Demora en la ejecución de los trabajos de forma intencionada, falta de observancia de las órdenes recibidas.
- Insubordinación.

Capítulo 2: Pliego de condiciones particulares

2.1. Introducción

Las condiciones técnicas particulares engloban las normas que cumplen los materiales, maquinaria y equipos que intervienen en las obras y su ejecución. Son estipulaciones complementarias al pliego de condiciones administrativas [43,44].

2.2. Disposiciones generales

El director de obras puede nombrar el número que crea preciso de vigilantes a pie de obra para garantizar la continua inspección de la misma. El Contratista no podrá rehusar a los vigilantes nombrados, quienes por el contrario, tendrán e todo momento libre acceso a cualquier parte de la obra.

Desde que se dé inicio a las obras hasta su recepción provisional, el Contratista o un representante suyo debidamente autorizado, deberá inexcusablemente residir en la zona de obra y no podrá ausentarse de ella sin ponerlo en conocimiento a la Dirección de obra y dejar quien le sustituya para las disposiciones, hacer pagos, continuar las obras y recibir las ordenes que se le comuniquen. En cualquier caso, el Contratista habrá de nombrar un Jefe de obra con la titulación requerida en el Pliego de cláusulas administrativas particulares, cuya personalidad puede coincidir con la del representante antes referido.

El Contratista, por sí o por medio de sus delegados, acompañará a la Dirección de obra, en las visitas que haga a las obras siempre que así fuese exigido.

2.3. Condiciones de materiales, equipos y maquinaria.

Todos los materiales que se empleen en las obras, reunirán las condiciones de calidad exigibles en la buena práctica de la construcción; la aceptación por la Dirección de obra de una marca, fábrica o lugar de extracción no exime al Contratista del cumplimiento de estas prescripciones.

Cumplida esta premisa, así como las que expresamente se prescriban para cada material en los siguientes puntos, queda de la total iniciativa del contratista la elección del punto de origen de los materiales:

- No se procederá al empleo de los materiales sin que antes sean examinados y aceptados en los términos y forma que prescribe la Dirección de obra o persona en quien delegue.
- Las pruebas y ensayos ordenados se llevarán a cabo bajo la supervisión de la Dirección de obra o técnico en quien delegue.
- Dichos ensayos podrán realizarse en los laboratorios de obra o en los que designe la Dirección de obra de acuerdo con sus instrucciones.
- Todos los gastos de pruebas y ensayos serán de cuenta del Contratista y se consideran incluidos en los precios de las unidades de obra, con la limitación máxima del 1% de los costes totales. Teniendo la Dirección de las obras la facultad de aplicar este 1% a la totalidad, en conjunto, de la obra.
- La dirección de obra se reserva el derecho de controlar y comprobar antes de su empleo la calidad de los materiales deteriorables tales como los conglomerados hidráulicos. Por consiguiente, podrá exigir al Contratista, que por cuenta de éste, entregue al laboratorio elegido por la Dirección la cantidad suficiente de materiales para ser ensayados; y éste lo hará con la antelación suficiente de materiales para ser ensayados evitando retrasos que por este concepto pudieran producirse y que en tal caso se imputará al Contratista.

2.4. Condiciones generales de ejecución.

Todos los trabajos incluidos en el presente proyecto se ejecutarán esmeradamente, de acuerdo a las especificaciones de los pliegos de condiciones, con arreglo a la buena práctica constructiva y cumpliendo estrictamente las instrucciones que imparta la Dirección Facultativa.

No puede por tanto servir de pretexto al contratista la baja subasta, para variar esa esmerada ejecución ni la primera calidad de las instalaciones proyectadas en cuanto a sus materiales y mano de obra, ni pretender proyectos adicionales.

2.5. Pliegos, instrucciones y normas aplicables

Las prescripciones de las siguientes instrucciones y normas serán de aplicación con carácter general, y en todo aquello que no contradiga o modifique el alcance de las condiciones que se definen en este documento para los materiales o la ejecución de las obras.

En caso de presentarse discrepancias entre las especificaciones impuestas por los diferentes pliegos, instrucciones o normas, se entenderá como válida la más restrictiva.

2.5.1. Disposiciones de carácter particular.

Las disposiciones de carácter particular y de ámbito técnico son:

- Normativa de AENOR (Asociación Española de Normalización).
- Normas tecnológicas de edificación (NTE):
 - Instalaciones de fontanería. Abastecimiento (IFA).
 - Instalaciones de salubridad. Alcantarillado (ISA).
 - Instalaciones eléctricas. Puesta a tierra (IEP).

2.5.2. Materiales, equipos y maquinaria.

Se nombran los comités que recogen todas las normas UNE asociadas a la construcción general [44]:

AEN/CTN 14 – Soldadura y técnicas conexas.

Normalización de:

- El soldeo por todos sus procedimientos, así como todas las técnicas conexas, incluyendo terminología, definición y representación de las uniones soldadas, equipos para soldar, materias primas (gas, metales base y de aportación), procesos y reglas de soldadura, métodos de ensayo y verificación, diseño y cálculo de las uniones soldadas y cualificación de soldadores.
- Con exclusión de: seguridad de los equipos eléctricos utilizados en soldadura.

AEN/CTN 41 – Construcción.

Normalización de:

Los aspectos horizontales relacionados con la construcción, entre ellos:

- La terminología utilizada en la construcción.
- Las características y métodos de ensayo comunes a diferentes productos de construcción; la coordinación modular y sus principios fundamentales; los pavimentos peatonales y los techos.
- Los materiales empleados en la construcción y conservación de carreteras, pistas aeroportuarias y otras áreas abiertas a la circulación de vehículos, incluyendo la terminología, métodos de ensayo y clasificación de los materiales que componen el firme, así como las características superficiales del pavimento y sus productos complementarios.
- Las características, los productos y los métodos de ensayo relativos a la fábrica de albañilería y sus revestimientos; los recrecidos de suelos y pavimentos fabricados in situ.
- Las características, los productos y los métodos de ensayo relativos a cubiertas y tabiques pluviales.
- Las especificaciones de accesibilidad en el entorno construido.
- La reparación, rehabilitación, restauración y conservación de edificios, incluyendo el Patrimonio Cultural.
- Las características, productos y métodos de ensayo de los materiales específicos para la edificación con tierra cruda.
- Los aspectos generales de la resistencia al deslizamiento de superficies peatonales.
- La organización de modelos de información relativos a la edificación y a la obra civil.
- La prevención del crimen mediante la planificación urbana y el diseño de edificios.
- Con exclusión de: aquellos aspectos relacionados con la construcción que entren dentro del campo de actividad de un comité específico, como por ejemplo los ensayos de carácter general y aquellos temas específicos que sean competencia de otros comités, tales como el comportamiento frente al fuego, las propiedades de los áridos, la piedra natural, los productos prefabricados de cemento y de hormigón, los materiales cerámicos de arcilla cocida, los morteros, los cementos, las cales, los

materiales de aislamiento térmico, los materiales impermeabilizantes para la construcción, la resistencia al deslizamiento de los materiales específicos, etc. Aquellos aspectos de la accesibilidad que sean competencia de otros comités, tales como el uso y gestión y los productos de apoyo. Aquellos temas relativos a la reparación, rehabilitación, restauración y conservación de edificios y del Patrimonio Cultural que sean competencia de otros comités, tales como los métodos de transporte y envasado.

AEN/CTN 58 – Maquinaria de elevación y transporte.

Normalización de:

- Aparatos pesados de elevación (grúas).
- La maquinaria de manutención continúa.
- Aparatos de transporte por cable de mercancías y/o personas.
- Las carretillas de manutención, manuales y motorizados, y sus remolques.
- Ruedas y ruedecillas utilizadas en manutención.
- Las cadenas de eslabones de acero

AEN/CTN 77 – Medio ambiente.

Normalización de:

- Terminología, muestreo, medición y expresión de las características del aire, del agua, del suelo, de los residuos sólidos, del ruido y de los productos de impacto ambiental en lo que se refiere a la calidad del medio ambiente.
- Con exclusión de: ambiente laboral; contaminación radiactiva; fijación de los límites máximos de contaminación.

AEN/CTN 83 – Hormigón.

Normalización de:

- Hormigón y mortero en sus aspectos de terminología, componentes específicos, características, métodos de ensayo, recomendaciones de uso y condiciones de suministro.
- Estructuras de hormigón en masa, de hormigón armado y de hormigón pretensado en sus aspectos de diseño, cálculo y ejecución.
- Con exclusión de: aspectos relacionados con el cálculo de estructuras de hormigón incluidas en los Eurocódigos; áridos para hormigón y mortero.

AEN/CTN 100 – Climatización.

Normalización de:

- Instalaciones, equipos y componentes de climatización, incluidas bombas de calor y ventilación, en sus aspectos de terminología, definiciones, clasificación, diseño y cálculo (incluyendo datos climáticos, zona de bienestar, etc.) características tanto a la aptitud a la función como de seguridad y métodos de ensayo, así como características exigibles a los dispositivos de control y seguridad utilizados.
- Con exclusión de: ventiladores eléctricos para usos domésticos y análogos; exigencias de seguridad y fiabilidad de los componentes eléctricos y electrónicos.

AEN/CTN 115 - Maquinaria para la construcción, obra civil y edificación.

Normalización de:

Maquinaria y equipos en la construcción, obra civil y edificación, así como para la producción y proceso de los materiales de construcción de origen mineral, en sus aspectos de terminología, clasificación, requisitos de seguridad y de aptitud a la función y métodos de ensayo incluyendo:

- Maquinaria para movimiento de tierras.
- Equipos de pilotaje.

- Equipos de perforación.
- Máquinas para túneles.
- Máquinas para la construcción de carreteras.
- Máquinas y equipos para el proceso de materiales para edificación (portátiles, manuales y guiadas, montadas sobre bastidor, sobre raíles o autopropulsadas).
- Equipos para la preparación y manipulación de hormigón.

AEN/CTN 132 – Instalaciones y equipos de pintura para tratamiento de superficies.

Normalización de:

- Las instalaciones y equipos de pintura en sus aspectos de terminología, clasificación, dimensiones, métodos de ensayo, exigencias de seguridad y aptitud a la función, teniendo en cuenta los riesgos de incendios y de explosión y protección del medio ambiente.
- Con exclusión de: los aparatos y dispositivos para controlar los contaminantes en el ambiente laboral, así como la determinación de las concentraciones de éstos; los medios generales de prevención y protección que puedan afectar a la seguridad del trabajador y al medio en el que se desenvuelve.

AEN/CTN 135 – Equipamiento para la señalización vial.

Normalización de:

Aquellos elementos o equipos destinados a la señalización, seguridad, balizamiento y tráfico destinados a la información, ordenación y seguridad vial (carreteras y vías urbanas), tales como:

- Señales de tráfico (placas, carteles y pórticos).
- Marcas viales.
- Barreras de seguridad (metálicas y de hormigón).
- Control y ordenación del tráfico.
- Captafaros y ojos de gato.
- Pantallas anti-deslumbrantes y anti-ruídos.
- Postes de auxilio y teléfonos SOS.

- Alumbrado.
- Señalización provisional (obras, etc.)

Todo en sus aspectos de terminología y definiciones, clasificación, características, ensayos, diseño, etc., incluyendo sus soportes y cimentaciones.

- Con exclusión de: la normalización de los elementos primarios o materias primas, competencia de otros comités.

AEN/CTN 150 – Gestión ambiental.

Normalización de:

- Sistemas y herramientas de gestión medioambiental que ahora y en el futuro demanda la sociedad.
- Con exclusión de: muestreo, medición y expresión de las características, del agua, aire, suelo, residuos sólidos, ruido y ecotoxicología que son competencias de otros comités.

Se nombran los comités que recogen las normas UNE asociadas a los Materiales de equipos y maquinaria [44]:

AEN/CTN 9 – Equipos a presión: Calderas

Normalización de:

- Calderas.
- Equipos a presión, incluyendo sus elementos y equipos auxiliares específicos (válvulas, quemadores, etc.) en sus aspectos de terminología, características, diseño, cálculo, mantenimiento y métodos de inspección y ensayo.
- Con exclusión de: botellas y botellones para gas y sus componentes; aparatos, equipos y componentes eléctricos y electrónicos; calderas marinas, calderas de vapor que utilizan combustibles nucleares y calderas locamóviles; calderas de calefacción de agua caliente cuyo producto $P \times V$ sea menor o igual a 10, donde P es la presión efectiva en bar y V el volumen de agua en metros cúbicos.

AEN/CTN 16 – Herramientas.

Normalización de:

- Las herramientas utilizadas, manualmente o incorporadas a máquinas, incluyendo terminología, especificaciones y métodos de ensayos.
- Con exclusión de: características del aislamiento para seguridad eléctrica de las herramientas manuales para trabajo bajo tensión eléctrica; herramientas para el tallado de engranajes.

AEN/CTN 36 – Siderurgia.

Normalización de:

- Las técnicas, sistemas, procedimientos y códigos de buena práctica utilizados en la siderurgia.
- Los productos brutos, semiproductos, productos acabados y de primera transformación y derivados elaborados por las industrias siderúrgicas y de primera transformación, las materias primas empleadas en la fabricación de arrabio y acero y las ferroaleaciones en sus aspectos de terminología y definiciones, clasificación, proceso de producción, características, ensayos tanto físicos como químicos (análisis) y condiciones de su muestreo e inspección.
- Con exclusión de fundición de hierro y sus productos; carbón y coque; materiales de hierro; los productos sinterizados; los cables de acero para minería.

AEN/CTN 62 – Bienes de equipos industriales y equipos a presión.

Coordinación de las normas de transporte de mercancías peligrosas y normalización de:

- Botellas, botellones y otros recipientes destinados a almacenar gases comprimidos, licuados y disueltos a presión.
- Bombas, compresores y centrífugas industriales.
- Tanques y recipientes destinados a almacenar y transportar productos químicos.
- Material y equipo para la industria del petróleo y del gas natural.

- Redes de tuberías industriales.

Así como de sus accesorios en sus aspectos e terminología, características, diseño, construcción y métodos de ensayo.

AEN/CTN 92 – Aislamiento térmico.

Normalización de:

- Materiales y sistemas de aislamiento térmico y sus componentes en sus aspectos de diseño y cálculo, terminología, características y métodos de ensayo.
- Con exclusión de: las especificaciones y métodos de ensayo de materiales que no utilizados exclusivamente como aislantes térmicos son competencia de otros comités.

AEN/CTN 116 – Sistemas industriales automatizados.

Normalización de:

- Los sistemas de automatización industrial e integración relacionados con la fabricación de componentes discretos, abarcando la aplicación de múltiples tecnologías, como por ejemplo: sistemas de información y control, máquinas y equipos y sus componentes.
- Normalización en el ámbito de la fabricación aditiva (Additive Manufacturing) en relación con los procesos, términos y definiciones, sistemas de fabricación (materiales, hardware y software), procedimientos de ensayo, parámetros de calidad, contratos de servicio y cualquier otro tipo de fundamentos.
- Con exclusión de: la seguridad eléctrica de los equipos y los componentes eléctricos y electrónicos.

AEN/CTN 124 – Generadores y emisores de calor.

Normalización de:

- Intercambiadores de calor.
- Acumuladores de agua caliente sanitaria.

Incluyendo sus elementos y equipos auxiliares específicos (válvulas, quemadores, etc.) en sus aspectos de terminología, características, diseño, cálculo, mantenimiento y métodos de inspección y ensayo.

- Con exclusión de: estufas y cocinas a gas; bombas de calor, aparatos, equipos y componentes eléctricos o electrónicos; las calderas de vapor, de agua sobrecalentada y de fluido térmico sea cual sea su presión y volumen respectivos.

AEN/CTN 163 – Atmósferas potencialmente explosivas. Prevención y protección contra las explosiones.

Normalización de:

- Los métodos de ensayo, equipos para uso en atmósferas potencialmente explosivas y dispositivos y sistemas para prevención y protección contra las explosiones.
- Con exclusión de: material eléctrico para atmósferas potencialmente explosivas.

AEN/CTN 201 – Aparamenta y accesorios de baja tensión.

Normalización de:

- Aparamenta para baja tensión.
- Conjuntos de aparamenta para baja tensión.
- Pequeña aparamenta (Clavijas, bases e interruptores, sistemas de conducción de cables, dispositivos de conexión).
- Ensayos relativos a los riesgos del fuego.
- Transformadores, reactancias y fuentes de alimentación de baja potencia y especiales (requisitos de seguridad).
- Equipos para el soporte, protección e instalación de cables.

AEN/CTN 206 – Producción de energía.

Normalización de:

- Turbinas a vapor.
- Materiales eléctricos.
- Sistemas de conversión fotovoltaica de la energía solar.

AEN/CTN 200 – Normas básicas eléctricas.

Normalización de:

- Estructuras de la información, documentación y símbolos gráficos.
- Principios fundamentales y de seguridad para la interfaz hombre-máquina, el mercado y la identificación.
- Magnitudes, unidades y sus símbolos literales.
- Confiabilidad.
- Materiales magnéticos tales como sus aleaciones y acero.
- Electrostática y seguridad de los equipos de pulverización electrostática.
- Condiciones ambientales, clasificación y métodos de ensayo.
- Aspectos medioambientales de tipo general para productos y sistemas eléctricos y electrónicos.
- Seguridad funcional.
- Guías electrotécnicas.
- Grados de protección proporcionados por las envolventes.
- Con exclusión de: los aspectos medioambientales de productos normalizados por otros AEN/CTN.

AEN/CTN 203 – Equipamiento eléctrico y sistemas automáticos para la industria.

Normalización de:

- Máquinas rotativas eléctricas.
- Electrónica de potencia.
- Soldadura eléctrica.
- Electrotermia industrial.
- Condensadores de potencia.
- Seguridad de las máquinas: aspectos electrotécnicos.
- Seguridad de las herramientas eléctricas portátiles a motor.
- Medida y control de procesos industriales.
- Sistemas de alarma.
- Tecnología del montaje en superficie y electrónica impresa.
- Equipos para los sistemas electrotécnicos de transporte en superficie: aspectos electrotécnicos.

AEN/CTN 204 – Seguridad eléctrica.

Normalización de:

- Equipos y herramientas para trabajos en tensión.
- Seguridad de las personas en las instalaciones de alta tensión.

Se nombran los comités que recogen todas las normas UNE asociadas a los Sistemas de seguridad [44]:

AEN/CTN 23 – Seguridad contra incendios.

Normalización de:

- Aparatos, equipos, productos, sistemas e instalaciones de prevención y lucha contra incendios.
- Tecnología del fuego: terminología, clasificación, símbolos, señalización.
- Equipo personal de uso exclusivo en la lucha contra incendios.
- Comportamiento ante el fuego de los materiales, elementos y estructuras de construcción, su clasificación y métodos de ensayo, incluyendo también indicaciones sobre la aplicación de estos ensayos.
- Los vehículos utilizados en la lucha contra incendios incluyendo el carrozado, prestaciones, accesorios y dotación.
- La instalación, uso y mantenimiento de los anteriormente mencionados, aparatos, equipos, productos, sistemas, instalaciones, materiales y estructuras.
- Con exclusión de: equipo de protección individual competencia de otros comités; los elementos propios del autobastidor de los vehículos.

AEN/CTN 74 – Acústica.

Normalización de:

- El campo de la acústica, en sus aspectos de terminología, métodos de medida de los fenómenos acústicos, su generación, transmisión y recepción y todos los aspectos sobre sus efectos en el hombre y su medio ambiente.

Con exclusión de: electroacústica; especificaciones de las características de los instrumentos de medida para fines acústicos.

AEN/CTN 81 – Prevención y medios de protección personal y colectiva en el trabajo.

Normalización de:

- Los equipos de protección personal y colectiva en el trabajo.
- Los medios de seguridad a incorporar en las máquinas así como los necesarios a incorporar en el entorno al puesto de trabajo.
- Los aparatos y dispositivos para controlar los contaminantes en el ambiente laboral así como la determinación de las concentraciones de éstos.
- Los principios ergonómicos, las medidas antropométricas y demás factores relacionados con la adaptación hombre-máquina-hombre.
- Los medios generales de prevención y de protección que puedan afectar a la seguridad del trabajador y al medio en el que se desenvuelve, en sus aspectos de terminología, exigencias de seguridad y de aptitud a la función, las instrucciones de uso mantenimiento, dimensiones, los métodos de ensayo, la clasificación y el mercado.
- Con exclusión de: los medios de protección personal y colectiva en el trabajo relacionados con la seguridad nuclear, la seguridad minera y la seguridad eléctrica; los medios de protección personal específicos de máquina a máquina; seguridad máquina a máquina competencia de otros comités.

AEN/CTN 109 – Seguridad en el almacenamiento, manipulación y procesos con productos químicos.

Normalización de:

- Operaciones de almacenamiento y manipulación de productos químicos y los productos intermedios de reacción, incluyendo carga y descarga.
- Los aspectos relativos a la seguridad de las reacciones químicas en procesos industriales y laboratorios.
- La gestión de los riesgos en los procesos químicos.

- Caracterización, clasificación, catalogación, definiciones y terminología de la seguridad de las reacciones químicas y de los riesgos inherentes a los procesos de reacción.
- Seguridad en las plantas de almacenamiento.
- Medidas de protección y seguridad de las instalaciones de almacenamiento, manipulación y procesos con productos químicos.
- Designación y clasificación de los productos químicos por su grado de peligrosidad en relación con su almacenamiento y manipulación.
- Elementos y sistemas de almacenamiento de productos químicos ajo el punto de vista de la seguridad.
- Manipulación de productos químicos.
- Quedan excluidos de este comité todos aquellos aspectos de almacenamiento y seguridad en atmósferas potencialmente explosivas, normalizadas en el AEN/CTN 163 y todos aspectos de prevención y medios de protección personal y colectiva en el trabajo, normalizados en el AEN/CTN 81.

2.5.3. Condiciones de ejecución.

Además de las condiciones de ejecución generales se considerarán los siguientes puntos [45]:

- Movimientos de tierra.

El movimiento de tierra incluye la preparación del terreno, replanteo y nivelación, preparación de los trabajos, sondeo y catas en el terreno, relleno y compactación, calidad de los materiales, apertura de zanjas y pozos, demoliciones, voladuras, mediciones y valoración según los planos o indicaciones del ingeniero.

- Obras de saneamiento.

Las obras de saneamiento consideran el reconocimiento del terreno y fijación de pendiente, tuberías (materiales, uniones), solera y anillado de canalizaciones, relleno y nivel de compactación, arquetas de registro, materiales, dimensiones y ejecución, medición y valoración.

- Cimentaciones.

Las cimentaciones tienen en cuenta la resistencia del terreno y coeficientes de seguridad, cimentaciones adecuadas al terreno, cimentaciones ordinarias, hormigones (fabricación, encofrado y cimbras, desencofrado, vibrado y puesta en obra, ensayos y controles), cimentaciones especiales, acero para armaduras (características, resistencia, soldabilidad, ensayos y control), su medición y valoración.

- Estructuras.

Estructura metálica (calidad de aceros, preparación y montaje, protección del material, limpieza e imprimación, ensayos de control), hormigón armado, otras estructuras (mampostería, fábrica, prefabricados), su medición y valoración.

- Albañilería.

La albañilería incluye la verificación de los materiales, morteros, yesos, ejecución y acabados, fábrica (dimensiones, calidad, tipo, ladrillos), tabiquería, obras complementarias, su medición y valoración.

- Cerrajería y carpintería metálica.

La cerrajería y carpintería metálica engloba los materiales, normas, dimensiones, estanqueidad, pinturas y sistemas de protección, herrajes, control, medición y valoración.

- Aislamientos.

Tiene en cuenta el aislamiento acústico, contra vibraciones, térmico, protecciones antihumedad, su medición y valoración.

- Instalaciones eléctricas y de alumbrado.

Incluye las condiciones generales, materiales, canalizaciones, conductores, adecuación a la normativa, sistemas de protección, cuadros de control y mando, lámparas y luminarias, tomas de tierra y pararrayos, subestación transformadora, su medición y valoración.

- Instalaciones de fontanería y saneamiento.

Se tiene en cuenta los materiales, las instalaciones de agua caliente y su medición y valoración de obras.

- Otras instalaciones.

Instalaciones de aislamiento, estanqueidad, automatización, ventilación, transporte y otras que no hayan sido mencionadas o que durante la ejecución de la obra sean necesarias y no estuviese especificada en este pliego, el Contratista quedará obligado a ejecutarlas con arreglo a las instrucciones que reciba del ingeniero quien a su vez cumplirá con la normativa vigente.

REDISEÑO DE UNA LÍNEA DE
FRACCIONAMIENTO DE ALQUILACIÓN DE
PARAFINAS.

PARTE I: UNIDAD DE RECUPERACIÓN DE
BENCENO.

DOCUMENTO 5: ESTADO DE MEDICIONES

AUTORA: D^a. ROSA MARÍA BADANI PRADO

Índice Estado de Mediciones

CAPÍTULO 1: ESTADO DE MEDICIONES.....	379
1.1. INTRODUCCIÓN.....	379
1.2. EQUIPOS PRINCIPALES.....	379
1.3. EQUIPOS AUXILIARES.....	380
1.4. ELEMENTOS COMPLEMENTARIOS.....	380

CAPÍTULO 1: Estado de mediciones.

1.1. Introducción.

El estado de mediciones determina las unidades de obra que conforman la instalación. Se define la cantidad, características, modelo, tipo y dimensiones de cada elemento constituyente.

En los siguientes apartados, se realizan las mediciones o determinación de las dimensiones de cada unidad de obra, se indican sus particularidades y se tienen en cuenta los costes de instalación y el montaje que implica su adquisición.

1.2. Equipos principales.

A continuación se detallan las unidades que conforman la instalación.

Tabla EM.1. Equipos principales.

Unidad	Características	Cantidad
Columna de rectificación	De acero al carbono SA-285 C; de diámetro externo 9,43 m; altura 22,60 m; espesor de carcasa 41 mm; 30 platos de acero SA-285 C de 5 mm de espesor y espaciamiento entre platos de 0,61 m; fondos tipo Klopper.	1
Condensador	Aerorrefrigerador de acero al carbono SA-285 C de 8,53 m de longitud; 2,46 m de ancho y 1,52 m de alto; potencia 8,94 kW; 3 ventiladores; 186 tubos de acero SA-106 B con aletas transversales rectangulares de aluminio.	1
Rehervidor	Rehervidor tipo Kettle de acero al carbono SA-285 C de 3,66 m de longitud; 1,25 m de diámetro externo inferior y 1,70 m de diámetro externo superior; espesor de carcasa 13 mm; 180 tubos de acero SA-106 B con aletas transversales rectangulares de aluminio.	1
Acumulador de reflujo	De acero al carbono SA-285 C de 1,84 m de diámetro externo; 11,77 m de longitud; de 8 mm de espesor.	1

1.3. Equipos auxiliares.

Tabla EM.2. Equipos auxiliares.

Unidad	Características	Cantidad
Bomba de impulsión	Centrífuga; Modelo Goulds Pumps 3620 8X10-13B; 1485 rpm; 11,63 kW; 50 Hz.	4
	Centrífuga; Modelo Goulds Pumps API 3171 1X1,5-8; 2930 rpm; 2,91 kW; 50 Hz.	2

1.4. Elementos complementarios.

Tabla EM.3. Tuberías.

Diámetro nominal (mm)	Schedule	Longitud (m)
64	80S	68
76	40S	83
102	40S	43
102	80S	57
254	80S	106
305	60	54
356	10S	50
406	60	34
457	60	30

Tabla EM.4. Aislamiento equipos.

Unidad de referencia	Características	Área (m ²)
Columna de rectificación	Aislante de lana de roca de 80 mm de espesor con recubrimiento de aluminio.	669,64
Rehervidor	Aislante de lana de roca de 80 mm de espesor con recubrimiento de aluminio.	19,54
Acumulador de reflujo	Aislante de lana de roca de 60 mm de espesor con recubrimiento de aluminio.	68,22

Tabla EM.5. Aislamiento tuberías.

Características	Diámetro nominal (mm)	Longitud (m)	Área (m²)
Aislante de lana de roca de 30 mm de espesor con recubrimiento de aluminio.	64	68	15,60
	76	83	23,18
	102	100	35,91
Aislante de lana de roca de 80 mm de espesor con recubrimiento de aluminio.	254	106	90,93
	305	54	54,94
	356	50	55,86
	457	30	43,09
Aislante de lana de roca de 100 mm de espesor con recubrimiento de aluminio.	406	34	43,41

Tabla EM.6. Válvulas y accesorios de tuberías.

Diámetro nominal (mm)	Sch.*	Codo 90°	Reducciones	Tes	Válvula de Compuerta	Válvula de Globo	Válvula de Retención
64	80S	5	1	1	0	1	1
76	40S	0	0	0	0	1	1
102	40S	4	1	1	1	0	0
102	80S	6	0	0	0	0	1
254	80S	10	2	2	0	2	2
305	60	8	3	2	2	1	0
356	10S	6	0	0	0	0	0
406	60	6	1	0	0	0	0
457	60	3	0	0	0	0	0

(*) Sch.: Schedule o espesor de pared.

REDISEÑO DE UNA LÍNEA DE
FRACCIONAMIENTO DE ALQUILACIÓN DE
PARAFINAS.

PARTE I: UNIDAD DE RECUPERACIÓN DE
BENCENO.

**DOCUMENTO 6:
PRESUPUESTO**

AUTORA: D^a. ROSA MARÍA BADANI PRADO

Índice Presupuesto

CAPÍTULO 1: PRESUPUESTO.	384
1.1. INTRODUCCIÓN.	384
1.2. MÉTODO DE CÁLCULO.	384
1.2.1. Costo de la columna de rectificación.	385
1.2.2. Costo de los intercambiadores de calor.	388
1.2.3. Costo del acumulador de reflujo.	390
1.3. PRESUPUESTOS PARCIALES.	391
1.4. INVERSIÓN TOTAL DE CAPITAL.	392
1.4.1. Inversión de capital fijo.	392
1.4.2. Capital de trabajo.	397
1.4.3. Coste de puesta en marcha.	397
1.4.4. Inversión total.	397
CAPÍTULO 2: ESTUDIO ECONÓMICO.	398
2.1. INTRODUCCIÓN.	398
2.2. CONCEPTOS PREVIOS.	398
2.3. REVALORIZACIÓN DEL PRODUCTO.	399
2.3.1. Benceno.	399
2.3.2. Alquilbenceno Lineal (LAB).	400
2.3.3. Revalorización de productos.	401
2.4. AHORRO ECONÓMICO.	401
2.4.1. Costos totales de la unidad.	401
2.4.2. Costos de las dos columnas a suplir.	402
2.4.3. Ahorro.	403

CAPÍTULO 1: Presupuesto.

1.1. Introducción.

En este capítulo se van a determinar los costes individuales y globales de los equipos, complementos y servicios necesarios para la operación de la unidad de recuperación de benceno.

Se aplican métodos de cálculo basados en índices de precios y distintos porcentajes para el cálculo de los costes de todos los elementos que conforman la planta.

1.2. Método de cálculo.

El inicio de una operación industrial implica la inversión de una cantidad de dinero determinada. La inversión comprende el monto destinado al capital fijo directo, de manufactura, de trabajo, de servicios auxiliares y de no-manufacturas.

El cálculo del monto necesario de inversión se realiza mediante costos disponibles de diseños preliminares. Debido a que los costos cambian con el tiempo por las condiciones económicas mundiales y locales, se deben emplear métodos de actualización de las cifras. Los métodos utilizados se basan en correlaciones y la aplicación de índices de costos; las correlaciones más conocidas son las de Chilton (1949), Guthrie (1968), Peters y Timmerhaus (2003) y ASPEN [46].

El monto de inversión relacionado con los equipos de la Unidad de Recuperación de Benceno se va a determinar mediante las correlaciones de Guthrie y los índices de costos IPC²³ y de Marshall & Swift [47,48].

²³ IPC: Índice de Precios de Consumo

1.2.1. Costo de la columna de rectificación.

1.2.1.1. Costo de compra.

El costo de compra (CC) de la columna viene dado por la siguiente expresión en dólares (\$):

$$CC = \left(\frac{M\&S}{280}\right) 101,9 \cdot D^{1,066} \cdot H^{0,82} \cdot F_C \quad [Ec. P. 1]$$

Dónde:

- D: Diámetro de columna exterior (ft). Igual a 30,94 ft (9,43 m).
- H: Altura de columna (ft). Igual a 113,89 ft (34,71 m) incluyendo el faldón.
- M&S: Índice de costos de Marshall & Swift. Considera como año base a 1.968, y el dato más reciente conseguido de Marshall & Swift es de agosto del año 2.008 igual a 1.449,3.
- Fc: Factor de costo.

$$F_C = F_m \cdot F_p \quad [Ec. P. 2]$$

Dónde:

- Fm: Factor de material de la envolvente [46].

Material	CS ²⁴	SS ²⁵	Monel	Titanio
Fm(encamisada)	1,00	2,25	3,89	4,25
Fm(sólida)	1,00	3,67	6,34	7,89

La columna en diseño emplea acero al carbono SA-285 C, por tanto, el valor de Fm es 1,00.

- Fp: Factor de presión [46].

Presión (psi)	Hasta 50	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
Fp	1,00	1,25	1,55	2,00	2,40	2,80	3,00	3,25	3,80	4,00	4,20

²⁴ CS: Carbon Steel (Acero al carbono)

²⁵ SS: Stainless Steel (Acero inoxidable)

La presión de diseño de la columna es de 66,83 psi (4,55 atm) por lo que el factor de presión es 1,25.

Reemplazando datos en la ecuación [Ec.P.2] se tiene:

$$F_C = 1,00 \cdot 1,25 = 1,25$$

Y sustituyendo valores en [Ec.P.1]²⁶:

$$CC = \left(\frac{1.449,3}{280}\right) 101,9 \cdot (30,94 \text{ ft})^{1,066} \cdot (113,89 \text{ ft})^{0,82} \cdot 1,25 = 1.242.420,28 \$$$

$$CC = 983.783,58 €$$

1.2.1.2. Costo de instalación.

El costo de instalación (CI) de la columna se determina mediante la ecuación:

$$CI = \left(\frac{M\&S}{280}\right) 4,7 \cdot D^{1,55} \cdot H \cdot F_{CI} \quad [Ec. P. 3]$$

- D: Diámetro de columna exterior (ft). Igual a 30,94 ft (9,43 m).
- H: Altura de columna (ft). Igual a 74,16 ft (22,60 m).
- M&S: Índice de costos de Marshall & Swift. Igual a 1.449,3.
- F_{CI}: Factor de costo.

$$F_{CI} = F_s + F_t + F_m \quad [Ec. P. 4]$$

Dónde:

- F_s: Factor relacionado con el espaciamiento entre platos [46]:

Espaciamiento entre platos (in)	24	18	12
F_s	1,0	1,4	2,2

²⁶ El cambio de dólares a euros para el 12 de octubre de 2.014: 1,2629\$ equivalen a 1€.

La columna tiene un espaciado entre platos de 24 in (0,61 m) y por tanto un factor igual a 1,0.

- Ft: Factor relacionado con el tipo de plato [46].

Tipo de plato	Platos	Platos perforados	Válvula	Capucha	Koch Kaskade
Ft	0,0	0,0	0,4	1,8	3,9

La columna en diseño emplea platos perforados, por lo que el factor adquiere el valor 0,0.

- Fm: Factor relacionado con el material del plato [46].

Material de plato	CS	SS	Monel
Fm	0,0	1,7	8,9

La columna utiliza platos de acero al carbono SA-285 C, con lo cual, el factor del material es 0,0.

Sustituyendo los datos en la ecuación [Ec.P.4] y [Ec.P.3] se tiene:

$$F_{CI} = 1,0 + 0,0 + 0,0 = 1,0$$

$$CI = \left(\frac{1.449,3}{280} \right) 4,7 \cdot (30,94 \text{ ft})^{1,55} \cdot (74,16 \text{ ft}) \cdot 1,0 = 368.577,48 \$ = 291.850,09 €$$

1.2.1.3. Coste total columna.

Finalmente se suman los montos del equipo y de la instalación, y se corrige el precio mediante la variación del IPC, ya que se ha tomado como referencia el año 2.008 para el índice de Marshall & Swift.

La variación del IPC desde el año 2.008 es de un 8,0% y por tanto, el precio se multiplica por 1,08.

Como consecuencia, el costo de la columna para el año 2014 es:

$$C = (CC + CI) \cdot 1,08 \quad [Ec. P. 5]$$

$$C = (983.783,58 € + 291.850,09 €) \cdot 1,08 = 1.377.684,37 €$$

1.2.2. Costo de los intercambiadores de calor.

El costo de los intercambiadores de calor de carcasa y tubos comprende la determinación del condensador y del rehervidor y se calcula mediante las mismas ecuaciones.

El costo total incluye el costo de compra (CC) y el costo de instalación (CI) del equipo.

$$CC = \left(\frac{M\&S}{280} \right) 101,3 \cdot A^{0,65} \cdot F_c \quad [Ec. P. 6]$$

Dónde:

- M&S: Índice de costos de Marshall & Swift. Igual a 1.449,3.
- A: Área de intercambio (ft²). Para áreas entre 200 y 5.000 ft².
- Fc: Factor de costo.

$$F_c = (F_d + F_p) F_m \quad [Ec. P. 7]$$

Dónde:

- F_d: Factor de diseño [46].

Tipo de diseño	F _d
Kettle, rehervidor	1,35
Cabeza flotante	1,00
Tubos en U	0,85
Haz fijo de tubos	0,80

- F_p: Factor de presión [46].

Presión de diseño (psi)	F _p
Hasta 150	0,00
300	0,10
400	0,25
800	0,52
1.000	0,55

- Fm: Factor del material [46].

Carcasa	CS	CS	CS	CS	SS	CS	Monel	Ti
Tubos	CS	Latón	Mo	SS	SS	Monel	Monel	Ti
F_m	1,00	1,30	2,15	2,81	3,75	3,10	4,25	13,05

Y el costo de instalación viene definido por:

$$\begin{aligned}
 CI &= \left(\frac{M\&S}{280}\right) 101,3 \cdot A^{0,65} \cdot (2,29 + F_{CI}) \quad [Ec.P.8]
 \end{aligned}$$

Expresión que utiliza los mismos parámetros que [Ec.P.6].

1.2.2.1. Costo del condensador.

El área de intercambio de calor del aerorrefrigerador tiene un valor de 2.726,90 ft² (253,34 m²), con tubos en U de acero al carbono, una presión de diseño de 64,18 psi (4,37 bar) y cabezales de acero al carbono.

Tomando datos de las anteriores tablas, según las características del intercambiador, y sustituyendo en las ecuaciones [Ec.P.7], [Ec.P.6] y [Ec.P.8] se llega al resultado:

$$F_c = (0,85 + 0,00) \cdot 1,00 = 0,85$$

$$CC = \left(\frac{1.449,3}{280}\right) 101,3 \cdot (2.726,90 ft^2)^{0,65} \cdot 0,85 = 76.245,44 \$$$

$$CC = 60.373,30 €$$

$$CI = \left(\frac{1.449,3}{280}\right) 101,3 \cdot (2.726,90 ft^2)^{0,65} \cdot (2,29 + 0,85)$$

$$= 281.659,62 \$$$

$$CI = 223.026,07 €$$

El coste total del aerorrefrigerador según la ecuación [Ec.P.5] es:

$$C_{Condensador} = (60.373,30 \text{ €} + 223.026,07 \text{ €}) \cdot 1,08 = 306.071,32 \text{ €}$$

1.2.2.2. Costo del rehervidor

El área de intercambio de calor del rehervidor tipo Kettle tiene un valor de 706,86 ft² (65,67 m²), una presión de diseño de 813,11 psi (55,33 atm) y el material de los tubos y de la carcasa es acero al carbono.

Tomando datos de las anteriores tablas, según las características del intercambiador, y sustituyendo en las ecuaciones [Ec.P.7], [Ec.P.6] y [Ec.P.8] se tiene:

$$F_c = (1,35 + 0,55) \cdot 1,00 = 1,90$$

$$CC = \left(\frac{1.449,3}{280} \right) 101,3 \cdot (706,86 \text{ ft}^2)^{0,65} \cdot 1,90 = 70.864,60 \$$$

$$CC = 56.112,60 \text{ €}$$

$$CI = \left(\frac{1449,3}{280} \right) 101,3 \cdot (706,86 \text{ ft}^2)^{0,65} \cdot (2,29 + 1,90)$$

$$= 156.275,10 \$$$

$$CI = 123.743,05 \text{ €}$$

El coste total del rehervidor según la ecuación [Ec.P.5] es:

$$C_{Condensador} = (56.112,60 \text{ €} + 123.743,05 \text{ €}) \cdot 1,08 = 194.244,10 \text{ €}$$

1.2.3. Costo del acumulador de reflujo.

Al ser un recipiente a presión, su costo de compra se determina igual que la columna de platos, mediante la ecuación [Ec.P.1] y [Ec.P.2] utilizando los mismos parámetros.

Al emplear como material acero al carbono y considerar una presión de diseño de 59,75 psi (4,07 atm), un diámetro externo de 6,05 ft (1,84 m) y una longitud de 38,62 ft (11,77 m), se tiene:

$$F_C = 1 \cdot 1,25 = 1,25$$

$$CC = \left(\frac{1.449,3}{280}\right) 101,9 \cdot (6,05 \text{ ft})^{1,066} \cdot (38,62 \text{ ft})^{0,82} \cdot 1,25 = 89.902,49 \$$$

$$CC = 71.187,34 €$$

Y el costo de instalación se define por la siguiente expresión:

$$CI = \left(\frac{M\&S}{280}\right) 101,9 \cdot D^{1,066} \cdot H^{0,802} (2,18 + F_{CI})$$

Que emplea los mismos parámetros que la ecuación [Ec.P.1]:

$$CI = \left(\frac{1.449,3}{280}\right) 101,9 \cdot (6,05 \text{ ft})^{1,066} \cdot (38,62 \text{ ft})^{0,802} (2,18 + 1,25) = 230.990,12 \$$$

$$CI = 182.904,52 €$$

Y por tanto, mediante la expresión [Ec.P.5]:

$$C_{Acumulador} = (71.187,34 € + 182.904,52 €) \cdot 1,08 = 274.419,21 €$$

1.3. Presupuestos parciales

Tabla P.1. Costo de equipos principales.

Unidad	Cantidad	Precio unitario (€)	Precio (€)
Columna de rectificación	1	1.377.684,37	1.377.684,37
Condensador	1	306.071,32	306.071,32
Rehervidor	1	194.244,10	194.244,10

Acumulador de reflujo	1	274.419,21	274.419,21
Total (€)			2.152.419,00

Tabla P.2. Costo de equipos auxiliares.

Unidad	Cantidad	Precio unitario (€)	Precio (€)*
Bomba centrífuga; Modelo Goulds Pumps 3620	4	4.980	19.920
Bomba centrífuga; Modelo Goulds Pumps API 3171	2	2.326	4.652
Total (€)			24.572

(*)Precios de bombas de características similares [49].

1.4. Inversión total de capital.

La inversión total de capital se conforma por la inversión de capital fijo, el capital de trabajo y el costo de puesta en marcha. En este apartado se procede a cuantificar estos montos.

1.4.1. Inversión de capital fijo.

El costo requerido de construcción o inversión de capital fijo (ICF) es la suma de los costos directos (CD) y de los costos indirectos (CIn).

1.4.1.1. Costos directos (CD).

Es la suma del costo del material y de obra requerido para construir la planta completamente. Se trata de un 17% a un 80% de ICF.

- **Costo de equipos dentro de los límites de la planta.**

El costo de equipos dentro de los límites de la planta (CDLP) corresponde a los costos de compra e instalación de los equipos que se muestran en el diagrama de flujo.

- **Costo de compra e instalación de los equipos:** Incluye todos los equipos listados en un diagrama de flujo, además de los equipos de repuesto y la instalación de los mismos, englobando soportes estructurales, aislamiento y pintura.

Es aproximadamente entre un 27,3 y un 66% de ICF.

Considerando que se trata del 40% de ICF, y que tiene un valor total de:

$$C_{Equipos} = 2.152.419,00 \text{ €} + 24.572,00 \text{ €}$$

$$C_{Equipos} = 2.176.991,00 \text{ €}$$

Entonces, el total de ICF sería:

$$ICF' = \frac{2.176.991,00 \text{ €}}{40} \cdot 100 = 5.442.477,49 \text{ €}$$

- **Costo de instrumentación y control:** Es el costo de compra, instalación y calibración del equipo de instrumentación y control.

Es entre un 2,5% y un 7,0% de ICF.

Considerando que es un 5% de ICF, adquiere el valor siguiente:

$$C_{Ins.Control} = \frac{5 \cdot 5.442.477,49 \text{ €}}{100} = 272.123,87 \text{ €}$$

- **Costo de tuberías:** Incluye las tuberías, los soportes, los accesorios, las válvulas y el aislamiento.

Se considera entre un 3% a un 15% del ICF.

Teniendo en cuenta que se trata de un 12% de ICF:

$$C_{Tub,acc,válv} = \frac{12 \cdot 5.442.477,49 \text{ €}}{100} = 653.097,30 \text{ €}$$

- **Costo de equipos y materiales eléctricos:** Comprende el costo de compra e instalación del equipo eléctrico incluyendo motores, alambres, interruptores, alimentadores, paneles de iluminación y mano de obra asociada.

Es entre un 2,5% y un 9,0% de ICF.

Se considera un 3% de ICF, por tanto:

$$C_{Eléctrico} = \frac{3 \cdot 5.442.477,49 \text{ €}}{100} = 163.274,32 \text{ €}$$

Como resultado se tiene un costo de equipos dentro de los límites de la planta de:

$$C_{CDLP} = 3.265.486,49 \text{ €}$$

- **Costo fuera de los límites de la planta.**

Los costos fuera de los límites de la planta (CFLP) incluyen los costos directamente relacionados con el proceso pero construidos en una localización separada de los equipos principales de proceso, como edificios de procesos, auxiliares, talleres de mantenimiento y de servicios, así como el arreglo de áreas y caminos, las facilidades de servicios y el terreno. Comprende entre un 8% y un 20% de ICF.

- **Costo de edificios:** Incluye edificios de procesos, auxiliares, y de servicios, talleres de mantención con sus correspondientes escaleras, elevadores, laboratorios, tuberías, carpintería, instrumentos, calefacción, ventilación, teléfonos, intercomunicación, pintura, sistema de alarma, etc. Comprende entre un 6% y un 20% de ICF.

Considerando un 6% del ICF ya que solamente se tiene en cuenta la renovación del taller de mantenimiento con sus complementos, la sala de monitorización del proceso y la zona de recreación del personal:

$$C_{Edificios} = \frac{6 \cdot 5.442.477,49 \text{ €}}{100} = 326.548,65 \text{ €}$$

- **Arreglo de áreas:** Incluye aseo de áreas, caminos, líneas férreas, áreas de estacionamiento, áreas de recreación, etc. Entre 1,5% y 5% de ICF. Se tiene en cuenta solamente el aseo de las pocas zonas que se consideran en el anterior punto:

$$C_{Arreglo} = \frac{1,5 \cdot 5.442.477,49 \text{ €}}{100} = 81.637,16 \text{ €}$$

- **Facilidades de servicios:** Suministros (vapor, agua, electricidad, refrigeración, aire comprimido, combustible), facilidades (incineradores, pozos, tomas de agua, torres de enfriamiento, estanques de agua, subestación eléctrica, planta de refrigeración, planta de aire, planta de tratamiento de desechos), equipos de no-proceso (amoblado de oficina, equipo de cafetería, equipo médico y de seguridad, equipo de laboratorio, extintores, mangueras, bombas de incendio, equipos de carga, rociadores de agua y sistema de extinción por espuma), equipo de distribución y empaque (equipo para el manejo de materia prima y productos, equipo para empaque, de mezcla, equipo de carga, etc) y el terreno que comprende entre 1% y 2% de ICF. Entre 1,5% y 5% de ICF.

Solamente se tiene en cuenta el agua y el equipo de no-proceso con un 2% de ICF (Véase Documento 7: Capítulo 1):

$$C_{Servicios} = \frac{2 \cdot 5.442.477,49 \text{ €}}{100} = 108.849,55 \text{ €}$$

Dando un total de costos fuera de los límites de la planta:

$$C_{CFLP} = 517.035,36 \text{ €}$$

Como resultado final se obtiene un valor de costos directos de:

$$CD = 3.265.486,49 \text{ €} + 517.035,36 \text{ €} = 3.782.521,85 \text{ €}$$

1.4.1.2. Costos indirectos (CIn).

Son los costos relacionados con las construcciones temporales, personal de supervisión e imprevistos. Comprenden entre un 15% y un 30% de ICF.

- **Ingeniería y supervisión.**

Los costos de ingeniería y supervisión comprenden entre un 4% y un 21% de ICF. Considerando un 8%, se tiene:

$$C_{Ingeniería} = \frac{8 \cdot 5.442.477,49 \text{ €}}{100} = 435.398,20 \text{ €}$$

- **Costos de construcción.**

Se debe a las construcciones temporales, equipos y herramientas de construcción, supervisión de construcción, contabilidad, seguridad y servicio médico, permisos, licencias especiales, impuestos, seguros e intereses.

Toma entre un 4,8% y un 22,0% de ICF. Considerando un 5%:

$$C_{Construcción} = \frac{5 \cdot 5.442.477,49 \text{ €}}{100} = 272.123,87 \text{ €}$$

- **Pago a contratistas.**

Comprende entre un 1,3% y un 3% de ICF el pago a contratistas.

Se tiene en cuenta un 2% de ICF, por tanto:

$$C_{Contratistas} = \frac{2 \cdot 5.442.477,49 \text{ €}}{100} = 108.849,55 \text{ €}$$

- **Contingencias e imprevistos.**

Se contabiliza para compensar eventos no predecibles, tales como cambios de precios, modificaciones en el diseño, errores en las estimaciones, huelgas, tormentas, etc. Es de un 5% a un 20% de ICF.

Considerando un 5% de ICF, se tiene:

$$C_{Cont,impvistos} = \frac{5 \cdot 5.442.477,49 \text{ €}}{100} = 272.123,87 \text{ €}$$

Por tanto, el coste indirecto es el siguiente:

$$CIn = 1.088.495,50 \text{ €}$$

1.4.1.3. Inversión de capital fijo.

Como resultado final se suman los montos de costos directos e indirectos, obteniendo:

$$ICF = CD + CIn$$

$$ICF = 3.782.521,85 \text{ €} + 1.088.495,50 \text{ €} = 4.871.017,35 \text{ €}$$

La inversión de capital fijo supone del 70% al 82% de la inversión total. Estimando que ICF es un 72%, la inversión total sería:

$$IT = \frac{4.871.017,35 \text{ €}}{72} \cdot 100 = 6.765.301,88 \text{ €}$$

1.4.2. Capital de trabajo.

El capital de trabajo (CAPT) es el monto requerido para operar la planta, fluctúa entre un 10% y un 20% de la inversión total de capital (IT).

Comprende las materias primas para un mes de suministro (vapor de agua, electricidad para los intercambiadores de calor y equipos auxiliares de la unidad), el costo de producción, el dinero a recibir correspondiente al tiempo que se da a los compradores para pagar el producto, dinero en efectivo para pagar gastos de operación, salarios, y pago de impuestos del primer mes.

Se considera un 20%:

$$CAPT = \frac{20 \cdot 6.765.301,88 \text{ €}}{100} = 1.353.060,38 \text{ €}$$

1.4.3. Coste de puesta en marcha.

El costo de puesta en marcha (CPM) engloba las modificaciones del proceso necesarias para cumplir con las especificaciones del diseño, la mano de obra de partida o puesta en marcha y las pérdidas de producción o pérdidas mientras se pone en operación el proceso. Es entre un 8 y un 10% de IT, y entre un 8 y 10% de ICF.

El porcentaje que queda sobre la inversión total por contar es de un 8%, por tanto:

$$CPM = \frac{8 \cdot 6.765.301,88 \text{ €}}{100} = 541.224,15 \text{ €}$$

1.4.4. Inversión total

La inversión total de la unidad de recuperación de benceno es:

$$IT = ICF + CAPT + CPM$$

$$IT = 4.871.017 \text{ €} + 1.353.060 \text{ €} + 541.224 \text{ €}$$

$$IT = 6.765.302 \text{ €}$$

El costo total de la instalación asciende a seis millones setecientos sesenta y cinco mil trescientos dos euros.

CAPÍTULO 2: Estudio económico.

2.1. Introducción.

En el estudio económico del proyecto se define la revalorización del producto obtenido por el proceso al que se somete, y el ahorro que significa la sustitución de dos columnas de operación por una sola unidad de recuperación de benceno.

Es necesario recordar que no es posible determinar los beneficios, el valor actual neto relacionado con la amortización del proyecto, o la tasa interna de recuperación, debido a que el proceso de rectificación se encuentra como una etapa intermedia en la producción de LAS y por tanto no cuenta con ingresos directos de venta de productos.

2.2. Conceptos previos

Antes de examinar los puntos anteriores, se comentan conceptos importantes para su comprensión:

- **Ahorro económico:** Debido a que el objetivo del proyecto es la sustitución de dos columnas de separación por una sola, que realice la misma función y sea capaz de operar con el mismo caudal con el que operan las dos torres de CEPESA actuales, se procede a la determinación del monto monetario de ahorro en material, operación, mantenimiento y costos mensuales.

- **Estudio económico:** No es posible determinar los beneficios, el valor actual neto relacionado con la amortización del proyecto, o la tasa interna de recuperación, debido a que el proceso de rectificación se encuentra como una etapa intermedia en la producción de LAS y por tanto no cuenta con ingresos directos de venta de productos.

2.3. Revalorización del producto.

2.3.1. Benceno.

El precio del benceno para una pureza del 99% es de 1.012 € por tonelada, sin embargo, cuando la pureza es menor, el precio de la sustancia disminuye notablemente.

La corriente de alimentación de la columna, presenta una concentración de benceno del 11,98% y por tanto el precio de éste desciende hasta alcanzar 122,39 € por tonelada.

Si ingresa a columna un caudal másico de 26.400 kg·h⁻¹ de benceno (BZ), el precio por año es:

$$\begin{aligned} \text{Precio BZ ingreso} &= 26.400 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ día}} \cdot \frac{330 \text{ días}}{1 \text{ año}} \cdot \frac{1 \text{ ton}}{1.000 \text{ kg}} \cdot 122,39 \frac{\text{€}}{\text{ton}} \\ &= 25.590.704,88 \frac{\text{€}}{\text{año}} \end{aligned}$$

Y si la corriente de salida del proceso por la corriente de cabeza presenta un caudal de 26.392,08 kg·h⁻¹ de benceno al 99,06% en peso, se tiene:

$$\begin{aligned} \text{Precio BZ salida} &= 26.392,08 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ día}} \cdot \frac{330 \text{ días}}{1 \text{ año}} \cdot \frac{1 \text{ ton}}{1.000 \text{ kg}} \cdot 1.012 \frac{\text{€}}{\text{ton}} \\ &= 211.524.506,82 \frac{\text{€}}{\text{año}} \end{aligned}$$

Como consecuencia el producto obtenido en cabeza de columna se revaloriza cuantitativamente en:

$$\text{Revalorización Benceno} = 211.524.506,82 \frac{\text{€}}{\text{año}} - 25.590.704,88 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

$$\text{Revalorización Benceno} = 185.933.801,94 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

2.3.2. Alquilbenceno Lineal (LAB).

Al igual que el benceno, el precio de LAB es mayor a mayor pureza, en concreto el precio LAB para una pureza del 99% es de 1.405 € por tonelada.

Si ingresa a columna un caudal másico de 25.300 kg·h⁻¹ de LAB al 11,48%, el precio desciende hasta 163,01 € por tonelada y se obtiene un monto por año de:

$$\begin{aligned} \text{Precio LAB ingreso} &= 25.300 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ día}} \cdot \frac{330 \text{ días}}{1 \text{ año}} \cdot \frac{1 \text{ ton}}{1.000 \text{ kg}} \cdot 163,01 \frac{\text{€}}{\text{ton}} \\ &= 32.662.345,52 \frac{\text{€}}{\text{año}} \end{aligned}$$

Y si la corriente de salida de fondo de columna, presenta un caudal de 25.300 kg·h⁻¹ de benceno al 13,06% en peso, se tiene:

$$\begin{aligned} \text{Precio LAB salida} &= 25.300 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ día}} \cdot \frac{330 \text{ días}}{1 \text{ año}} \cdot \frac{1 \text{ ton}}{1.000 \text{ kg}} \cdot 185,42 \frac{\text{€}}{\text{ton}} \\ &= 37.154.708,03 \frac{\text{€}}{\text{año}} \end{aligned}$$

Como consecuencia el producto obtenido en cabeza de columna se ha revalorizado cuantitativamente en:

$$\text{Revalorización LAB} = 37.154.708,03 \frac{\text{€}}{\text{año}} - 32.662.345,52 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

$$\text{Revalorización LAB} = 4.492.362,51 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

2.3.3. Revalorización de productos

Para obtener el monto anual de revalorización de los productos en su conjunto, se suma la cantidad de benceno y de LAB revalorizadas:

$$\text{Revalorización productos} = 185.933.801,94 \frac{\text{€}}{\text{año}} + 4.492.362,51 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

$$\text{Revalorización productos} = 190.426.164,45 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

2.4. Ahorro económico.

En este apartado se realiza la determinación del ahorro económico debido a la sustitución de dos columnas de operación por una unidad de la misma capacidad, reduciendo material, costos en operaciones y mantenimiento y energía.

2.4.1. Costos totales de la unidad.

Los costos totales de la unidad son la suma de los costes fijos y de los costes variables.

- **Costes fijos**

- Los costes fijos de la unidad están comprendidos por el capital de trabajo (CAPT) determinado en el Capítulo 1 de este mismo documento, incluyendo las materias primas para un mes de suministro (vapor de agua, electricidad para los intercambiadores de calor y equipos auxiliares de la unidad), el costo de producción, el dinero a recibir correspondiente al tiempo que se da a los compradores para pagar el producto, dinero en efectivo para pagar gastos de operación, salarios, y pago de impuestos del primer mes, con un valor de 1.353.060,38 € por mes.
- El capital de puesta en marcha (CPM), también determinado anteriormente, ya que debe contarse con este monto cada vez que se realice una parada de la planta, es decir, una vez al año para realizar el mantenimiento, por lo que se dividirá la cantidad total

en 12, para fijar el dinero que es necesario por cada mes de operación. Obteniendo un valor de 45.102,01 € por mes.

- Los costes destinados a contingencias e imprevistos con un valor de 22.676,99 € por mes, calculados en apartados anteriores.

Resultando un monto total de:

$$CF = 1.353.060,38 \frac{\text{€}}{\text{mes}} + 45.102,01 \frac{\text{€}}{\text{mes}} + 22.676,99 \frac{\text{€}}{\text{mes}}$$

$$CF = 1.420.839,38 \frac{\text{€}}{\text{mes}}$$

- **Costes variables**

Los costes variables se reducen a una parte de las facilidades de servicio definidas en apartados anteriores. Alcanza un valor de 54.424,77 € por mes. El vapor y electricidad utilizado en los equipos no se considera en los costes variables ya que la alimentación ingresa a columna a caudal constante, sin embargo, si se produjera alguna variación de caudal, disminuirían o incrementarían tanto los costes variables como los fijos.

- **Costos totales**

Los costos totales, por tanto, adquieren el siguiente valor:

$$\text{Costes Totales} = 1.420.839,38 \frac{\text{€}}{\text{mes}} + 54.424,77 \frac{\text{€}}{\text{mes}} = 1.475.264,15 \frac{\text{€}}{\text{mes}}$$

2.4.2. Costos de las dos columnas a suplir

Para la determinación de los costos totales de dos columnas, las cuales se sustituirán por la diseñada en este proyecto, se tienen en cuenta los mismos factores, materiales y capacidad que la columna diseñada, sin embargo, se consideran los siguientes puntos:

- Para cada columna: Se consideran unas dimensiones tales que cada columna mantiene el diámetro pero reduce a la mitad la altura de la torre diseñada para asegurar la separación de componentes.
Obteniendo un costo para ambas columnas de 1.488.432,51 €.
- Acumulador de reflujo: Se consideran dos acumuladores, del mismo diámetro que el diseñado, pero de la mitad de la altura.
El costo por ambos es de 313.694,69 €.
- El rehervidor: Para cada columna, es necesaria la mitad del área empleada en el diseño de cada rehervidor.
El costo para ambos calderínes es de 247.575,89 €.
- El condensador: Se requiere para cada columna un condensador, que tenga la mitad del área empleada en el diseño de la unidad para asegurar el intercambio de calor requerido.
El costo para estos dos aparatos es de 390.106,45 €.
- En cuanto a las bombas, la capacidad de cada una de éstas se reduce a la mitad, y por tanto el costo, pero se necesita el doble de bombas.
Se requieren 8 bombas, y el costo total es de 14.612 €.

El resumen de los resultados es el siguiente:

$$\begin{aligned}
 C_{Equipos} &= 2.454.421,54 \text{ €} \\
 ICF &= 5.491.768,19 \text{ €} \\
 CAPT &= 1.525.491,17 \text{ €} \\
 CPM &= 610.196,47 \text{ €} \\
 IT &= 7.627.455,83 \text{ €} \\
 \text{Costes totales} &= 1.688.835,19 \text{ €}
 \end{aligned}$$

2.4.3. Ahorro

Se utilizan las mismas relaciones y ecuaciones empleadas en el Capítulo 1 de este mismo documento para el cálculo de costos directos, indirectos, de trabajo de puesta en marcha y costos totales para las dos columnas que van a ser sustituidas. Se compara con los gastos que se obtienen por la columna diseñada y se llega a las siguientes conclusiones:

Ahorro de materia prima a la producción de LAS = Precio BZ salida

$$= 211.524.507 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

Ahorro de material

= Equipos y complementos 2 torres

– Equipos y complementos unidad

$$\text{Ahorro de material} = 2.454.421,54 \text{ €} - 2.176.991,00 \text{ €} = 277.431 \text{ €}$$

Ahorro operaciones y mantenimiento = 2 torres – Unidad diseñada

$$\text{Ahorro operaciones y mantenimiento} = \frac{610.196,47}{12} \frac{\text{€}}{\text{mes}} - 45.102,01 \frac{\text{€}}{\text{mes}} = 5.748 \frac{\text{€}}{\text{mes}}$$

Ahorro costos totales = Costos totales 2 torres – Costos totales unidad

$$\text{Ahorro costos totales} = 1.688.835,19 \frac{\text{€}}{\text{mes}} - 1.475.264,15 \frac{\text{€}}{\text{mes}} = 213.571 \frac{\text{€}}{\text{mes}}$$

REDISEÑO DE UNA LÍNEA DE
FRACCIONAMIENTO DE ALQUILACIÓN DE
PARAFINAS.

PARTE I: UNIDAD DE RECUPERACIÓN DE
BENCENO.

DOCUMENTO 7: ESTUDIOS CON ENTIDAD PROPIA

AUTORA: D^a. ROSA MARÍA BADANI PRADO

Índice Estudios con Entidad Propia

CAPÍTULO 1: SEGURIDAD E HIGIENE.....	407
1.1 INTRODUCCIÓN.....	407
1.2 LEGISLACIÓN APLICABLE.....	407
1.3 RIESGO QUÍMICO.....	407
1.4 RIESGO FÍSICO.....	409
1.4.1 Ruido.....	409
1.4.2 Energía térmica.....	410
1.4.3 Riesgo eléctrico.....	411
1.5 RIESGO DE EXPLOSIÓN E INCENDIO.....	412
1.6 RIESGOS EN LA UNIDAD DE RECUPERACIÓN DE BENCENO.....	414
1.7 EQUIPOS DE SEGURIDAD.....	415
1.7.1 Equipos de protección individual.....	415
1.7.2 Equipos de protección colectiva.....	415
1.8 GESTIÓN DE SEGURIDAD.....	417
1.8.1 Coordinación.....	417
1.8.2 Registro de la información.....	418
1.8.3 Formación.....	419
 CAPÍTULO 2: EVALUACIÓN DE IMPACTO MEDIOAMBIENTAL.....	 420
2.1. INTRODUCCIÓN.....	420
2.2. LEGISLACIÓN.....	420
2.3. GESTIÓN DE RESIDUOS.....	421
2.3.1. Emisiones de líquidos.....	421
2.3.2. Emisiones de sólidos.....	421
2.3.3. Emisiones de gases.....	421
2.3.4. Ruido.....	422

CAPÍTULO 1: Seguridad e higiene.

1.1 Introducción.

La Unidad de Recuperación de Benceno, comprende situaciones de riesgo que pueden atentar hacia la seguridad y salud de los operarios y del medio en el que se encuentra situada, debido a la utilización de agentes químicos y operación de equipos de gran tamaño en condiciones de presión y temperatura elevadas.

Es por esta razón, que debe realizarse un estudio de seguridad e higiene en la planta, pues se debe evitar al máximo los accidentes en todos los sectores.

1.2 Legislación aplicable.

Además de conocer los riesgos que tienen los compuestos con los que se opera en la instalación, se deben seguir ciertas indicaciones para minimizar los riesgos inherentes a éstos.

Conviene recordar que los compuestos presentes en la instalación son los siguientes: ácido fluorhídrico, benceno, n-decano, n-undecano, n-dodecano, n-tridecano, n-tetradecano, n-decyl-benceno, n-undecyl-benceno, n-dodecyl-benceno, n-tridecyl-benceno, n-tetradecyl-benceno y alquilatos pesados.

La legislación aplicada en planta es la mencionada en el apartado 3.3.2 incluido en el Capítulo 3 del Documento 1: Memoria, pues tiene en cuenta todas las medidas vigentes que debe cumplir el personal y la misma planta.

1.3 Riesgo químico.

Se trata del riesgo al que se está expuesto por la manipulación o trasiego de agentes químicos y se puede producir debido a las siguientes causas:

- Ingestión, o contacto por la piel, tejidos, mucosas y ojos, de sustancias tóxicas, irritantes, corrosivas o nocivas.

- Grado de inflamabilidad de la sustancia.
- Capacidad de la sustancia de liberar energía.

Riesgo.

Por lo que se toma en cuenta las características siguientes de los compuestos:

- Sustancias tóxicas: el ácido fluorhídrico (mortal) y el benceno (peligroso).
- Sustancias de riesgo para la salud: undecano, dodecano, tridecano, tetradecano, undecilbenceno, dodecilbenceno, tridecilbenceno, tetradecilbenceno y el alquilato pesado (poco peligrosos).
- Sustancia corrosiva: ácido fluorhídrico.
- Reactividad de la sustancia: el ácido fluorhídrico es inestable en caso de cambio químico violento.
- Sustancias inflamables: benceno ($<37^{\circ}\text{C}$), undecano y dodecano ($T < 93^{\circ}\text{C}$) y los demás compuestos, excepto el ácido fluorhídrico, de menor inflamabilidad.

Prevención.

Luego de observar algunas cualidades muy importantes sobre los compuestos, se procede a mencionar las estrategias para prevenir los riesgos químicos.

- Desarrollo de procedimientos de trabajo que expongan claramente las actividades de los operarios, horas de trabajo y tiempo de aseo personal antes de abandonar el lugar.
- Desarrollo de un plan de seguridad.
- Disposición de equipos de primeros auxilios.
- Cumplimiento de las medidas de seguridad de protección individual, de los equipos, procesos y de la planta.
- Capacitación del personal sobre los riesgos existentes, y disposición y accesibilidad de fichas de seguridad de los compuestos y productos utilizados.
- Evaluaciones médicas periódicas a los trabajadores dependiendo del nivel de exposición a los compuestos peligrosos.

- Señalización adecuada de la instalación que indique los peligros y sustancias presentes.
- Mantenimiento adecuado de equipos para disminuir los posibles riesgos.

1.4 Riesgo físico.

Es el riesgo al que se está expuesto por la manipulación o ingestión de gases o partículas radioactivas, exposición a radiaciones ionizantes o no ionizantes, exposición a ruidos y vibraciones o a una carga calórica sobre la superficie corporal.

En la planta en la que se desarrolla este trabajo, principalmente se encuentran presentes el ruido y las vibraciones debidos a las máquinas y exposición a la energía térmica.

1.4.1 Ruido.

Riesgo.

El ruido es un sonido consistente en un movimiento ondulatorio producido en un medio por una fuente de vibración. Estos pueden llegar a ser tan intensos y superar el límite de tolerancia del oído humano, que dañan el sentido auditivo.

El ruido se encuentra principalmente en la sección de las bombas en la unidad de recuperación de benceno.

Se conoce que un sonido de 100 a 120 decibelios (dB), ya es incómodo para el oído humano; con un ruido entre 120 y 130 dB ya se pueden sentir crujidos; de 130 a 140 dB la sensación se hace dolorosa y a los 160 dB el efecto es devastador.

Prevención.

Con la finalidad de prevenir estos efectos, un trabajador no ha de soportar más de 87 dB como nivel equivalente de ruido, siendo 140 dB el pico

máximo de exposición, por lo que se adoptan medidas de seguridad a partir de un nivel mayor a 80-85 dB.

Para ello se debe seguir el siguiente plan:

- Cuando se sobrepase el límite permitido de ruido en un trabajo de 8 horas diarias, se debe reducir el tiempo de exposición.
- Utilizar protecciones auditivas personales adecuadas. Estas protecciones pueden ser cascos especiales, auriculares o tapones, certificados con la marca "CE" (Comunidad Europea) y apropiados para el nivel de ruido.
- Se debe distribuir adecuadamente el tiempo de trabajo de los operadores expuestos al ruido, minimizándolo y cambiando de rutina de trabajo al personal.
- Si se actúa sobre la fuente de ruido, se debe realizar la inspección y mantenimiento adecuado de los equipos en cuanto a su lubricación para reducir al máximo el impacto y la fricción en caso que corresponda.
- La distancia existente entre operador y fuente debe ser la mayor posible.
- Se debe aislar acústicamente la fuente de ruido y el local en el que se encuentren.

1.4.2 Energía térmica.

Riesgo.

En una instalación pueden darse temperaturas extremas, frías o calientes, sin embargo, debido a que en la Unidad de Recuperación de Benceno el condensador es de tipo aerorrefrigerado y utiliza el aire ambiente como fluido de servicio, este equipo no produce temperaturas frías extremas que signifiquen un problema para los operarios. A pesar de esto, los tubos calientes del aerorrefrigerador que conducen el vapor, así como el rehervidor, la columna, las tuberías e incluso el acumulador de reflujo, portan en ellos temperaturas muy elevadas que pueden presentarse como perjudiciales para los operarios.

El hombre necesita mantener una temperatura interna de 36-37°C para mantener un estado de equilibrio, para ello, posee mecanismos fisiológicos que hacen que ésta termorregulación se mantenga automáticamente.

En el momento en que la temperatura del ambiente se vuelve más alta que la del cuerpo humano, incrementa el calor por convección, conducción y radiación, a los que se añade el calor impreso por la actividad muscular de la persona, superando la temperatura fisiológica del ser humano.

La temperatura alcanzada debe disiparse mediante la evaporación de fluidos corporales, como el sudor, produciendo el enfriamiento del organismo. A fin de que esto ocurra, la velocidad de transpiración aumenta, la vasodilatación de la piel permite que gran cantidad de sangre llegue a la superficie del cuerpo eliminando una parte del calor, el ritmo cardiaco se eleva, y la fatiga y el cansancio son parte del organismo.

Prevención.

Para evitar esta situación de desequilibrio se procede de la siguiente manera:

- Disminuir tiempos de exposición a los equipos correspondientes.
- Aclimatar al personal de nuevo ingreso, dosificando los tiempos de exposición a estos riesgos.
- Realizar evaluaciones médicas iniciales y periódicas a los trabajadores expuestos a esta temperatura.
- Utilizar vestimenta adecuada contra la alta temperatura.
- Establecer periodos de descanso e hidratación constante con el fin de reponer las pérdidas hídricas.

1.4.3 Riesgo eléctrico.

Riesgo.

El riesgo eléctrico en una instalación puede producir desde quemaduras en el personal hasta la detención de los equipos que trabajan con líneas eléctricas.

Por un lado, el proceso depende de bombas e instrumentos de control que basan su funcionamiento en las corrientes eléctricas, con lo cual su fallo tiene como consecuencia la detención de la producción.

Por otro lado, pueden producirse incendios y explosiones por la generación de cortocircuitos en los aparatos, generando quemaduras y otros problemas en el personal.

Y finalmente, por descarga eléctrica. Debido a la corrosión de puentes metálicos y fallo de conexión a tierra, se puede producir la electrocución por el contacto directo entre el operador y la fuente eléctrica.

Prevención.

Para evitar las graves alteraciones que pueden provocar las descargas eléctricas al personal y el fallo del proceso, se siguen las siguientes medidas de precaución:

- Acceso a los aparatos eléctricos solamente a personas entrenadas y especializadas en el campo, declarando esta área restringida.
- El personal autorizado debe llevar vestimenta adecuada y especial para operar con los equipos (guantes aislantes, calzados dieléctricos, casco de seguridad aislante eléctrico, ropa de trabajo ignífuga y gafas protectoras).
- Señalización adecuada de la instalación que indique los peligros presentes.
- Los elementos activos de equipos y herramientas se deben encontrar eléctricamente aislados.
- Los equipos y elementos que hayan estado conectados a una fuente eléctrica, deberán desconectarse antes de realizar trabajos de mantenimiento en ellos.
- La desconexión de los equipos debe ser de corte visible, se inmovilizará con candados y las partes activas puestas a tierra.

1.5 Riesgo de explosión e incendio.

Riesgos.

Debido a que se opera con compuestos inflamables, se origina un alto riesgo de incendio, añadiendo que las condiciones de equipos con los que se trabaja son de alta temperatura y presión.

Las principales fuentes de ignición son las superficies calientes como es el rehervidor, las tuberías de fluidos calientes o simplemente la fricción de origen mecánico producida en las bombas.

Adicionalmente, los compuestos son de naturaleza explosiva al entrar en contacto con el aire en mezclas de vapor/aire, por lo que se toman las siguientes medidas necesarias para evitar los riesgos.

Prevención.

- Situar las unidades de operación respetando la distancia de seguridad requerida dependiendo del proceso, las condiciones y los compuestos con los que trabaja.
- Limitar la cantidad de sustancias inflamables, es decir, reducir en lo posible su almacenamiento en grandes volúmenes o por mucho tiempo.
- Instalación de dispositivos de seguridad de liberación de presión y eliminación de energía térmica.
- Mantenimiento e inspecciones adecuadas para evitar fugas en los equipos.
- Los operadores deben llevar la vestimenta adecuada (ropa y calzados) de manera que no den lugar a descargas electrostáticas que puedan generar atmósferas explosivas.
- Los equipos y dispositivos de conexión deben ponerse en marcha con el pertinente certificado de protección contra explosiones.
- Señalización óptica adecuada de la planta que indique los peligros presentes, y alarmas acústicas y luminosas que permitan el desalojo del lugar en el menor tiempo posible y en condiciones de seguridad.
- Sería ineficaz colocar extintores de incendio en diferentes puntos de la instalación ya que en caso de fuego o explosión éstos podrían dañarse quedando inoperativos, por lo que se protegen los equipos de la siguiente manera [50,51]:

Bombas: se protegen mediante sistemas de agua pulverizada, o nebulizada.

Intercambiadores de calor: se protegen prestando atención a las bridas de los cabezales, mediante boquillas de agua pulverizada de alta velocidad para desplazar las llamas.

Columna de separación: protegida mediante rociadores de agua pulverizada o espuma.

Acumulador de reflujo: Protegido mediante sistema de extinción de espuma.

1.6 Riesgos en la Unidad de Recuperación de Benceno

La planta de recuperación de benceno contiene los siguientes componentes: la columna de separación, el aerorrefrigerador, el rehervidor, el acumulador de reflujo, el sistema de tuberías y el sistema de impulsión y el de control.

Todos los dispositivos anteriores conllevan riesgos de varios tipos, es decir, no solamente se presentan riesgos químicos o físicos, si no que pueden producirse situaciones peligrosas simultáneas o en cadena. Estas situaciones son: explosiones, incendios, reacciones violentas, liberación de sustancias o vapores tóxicos, resultando en lesiones en el personal, el ambiente y la producción.

Con el fin de disminuir estos riesgos, además de centrar la atención en cada equipo, se debe tener en cuenta principalmente que los aparatos que contienen una gran cantidad de compuestos peligrosos y que se encuentran en condiciones de presión y temperatura elevadas, como la columna, el acumulador de reflujo, el rehervidor y el aerorrefrigerador, deben respetar las distancias de seguridad además de tomar las precauciones relacionadas con el riesgo químico, físico y de explosión e incendio.

Así mismo, los sistemas de tuberías, de impulsión y control deben estar en constante supervisión para evitar que se produzcan fugas y provoquen los accidentes comentados.

En cuanto a la inspección y mantenimiento del sistema, se debe verificar antes de realizar cualquier actividad, la desconexión total de la corriente eléctrica en caso que proceda, la corriente nula de fluidos en caso de que se trate de tuberías o sistemas de control, y condiciones de presión y temperatura ambientales para evitar inconvenientes y accidentes.

Referido a la puesta en marcha del sistema, se debe comprobar las conexiones entre equipos y sistemas de seguridad y control, así como la corriente eléctrica y condiciones de operación establecidas, garantizando la reanudación y el correcto funcionamiento del proceso.

1.7 Equipos de seguridad.

Los accidentes en planta pueden producirse en el momento menos esperado, ya que los riesgos están siempre presentes. Por estos motivos, se deben tomar precauciones mediante equipos de seguridad que protejan al personal y a su entorno además de cumplir con las prevenciones descritas anteriormente.

1.7.1 Equipos de protección individual.

Los equipos de protección individual (EPI) son elementos que cada operador debe utilizar como medio de protección, con el objetivo de reducir las consecuencias de los riesgos producidos en su entorno.

Dependiendo en la zona en la que se encuentren realizando actividades de inspección o mantenimiento y los equipos a los que esté manipulando deberá portar:

- Guantes aislantes o protectores
- Trajes térmicos o vestimenta de protección especial contra las temperaturas altas.
- Vestimenta complementaria como chalecos contra agresiones químicas y mecánicas, chalecos termógenos y reflectantes, cinturones y brazaletes.
- Calzados especiales anti golpes, deslizamientos, electricidad o productos agresivos químicos.
- Protectores oculares con protección lateral.
- Pantallas faciales.
- Protecciones auditivas como tapones, orejeras o cascos antiruido. Los cuales reducen respectivamente ruidos en 8 decibelios, 15 db y 20 db.
- Equipos respiratorios autónomos en casos excepcionales de contacto, por averías o fugas, con las sustancias tóxicas.

1.7.2 Equipos de protección colectiva

Estas protecciones son complementarias a las individuales, es decir, no eximen a los operarios de utilizar los EPI y protege al conjunto de trabajadores cuando no se han podido evitar o reducir los riesgos. Sin embargo, es el primer

paso hacia su protección, pues comprenden las señales de seguridad, los andamios y cables de sujeción para trabajos en altura, pasarelas, vallas de limitación y protección, tomas de tierra de equipos y sus correspondientes protecciones y aislamiento.

- **Señalización de seguridad**

La señalización pretende estimular los sentidos de las personas incitándolas a actuar frente a la situación de peligro de manera adecuada, en otras palabras, que alerte de las amenazas presentes o los dirija hacia un lugar seguro para evitar o reducir el efecto del riesgo o accidente.

Paneles visuales

Son superficies de formas y tamaños diversos y normalizados, las cuales portan colores llamativos, con una simbología simple con la finalidad de definir la situación de seguridad de la forma más clara posible.

El color rojo significa prohibición, y si se encuentra en paneles de forma rectangular se trata de equipos de lucha contra incendios.

El color azul significa obligación. Se utiliza generalmente para que los operarios tengan la vestimenta o accesorios necesarios para esa zona concreta de trabajo.

El color amarillo significa advertencia e informa acerca de los peligros existentes sobre sustancias o condiciones de trabajo como riesgos de caídas o temperaturas extremas.

El color verde, da información sobre la localización de salidas de socorro y equipos de primeros auxilios.

Iluminación

Iluminación en la zona de trabajo

El alumbrado en el lugar de trabajo de los operarios es muy importante, pues si la iluminación es insuficiente provoca desde cansancio hasta graves accidentes por la disminución de la visión.

En lo posible se debe usar la luz natural, y en caso de ser deficiente, se recurre a la luz artificial uniforme, no intermitente, con niveles y contrastes de luminancia adecuados a las operaciones realizadas y sus exigencias visuales.

Al tiempo de utilizar la luz artificial, se debe tener especial cuidado en los deslumbramientos indirectos que pueden ser producidos por superficies reflectantes que se encuentren cerca de la zona de operación.

Iluminación de emergencia

El alumbrado de emergencia debe garantizar la información para el acceso a lugares seguros o evacuación del personal aunque se produzca el corte de suministro eléctrico. Debe acompañar por tanto, a todas las señales de salida y puntos de reunión dejando visualizar claramente las vías seguras de evacuación sin ningún tipo de elementos adicionales que puedan producir confusión en su indicación.

1.8 Gestión de seguridad

Con el propósito de que las medidas de seguridad propuestas se cumplan y tengan resultados positivos, en otras palabras, que brinden seguridad a los trabajadores y al medio de forma eficaz, se deben coordinar y establecer protocolos que aseguren la comprensión de las medidas tomadas por todo el personal y el correcto procedimiento de todas ellas.

1.8.1 Coordinación

Se trata la organización de los trabajadores y la correcta operación y funcionamiento de la planta mediante un coordinador o delegado que sea el responsable de coordinar dichas tareas.

El o los encargados de la prevención de riesgos laborales se asignan de la siguiente manera:

- 50-100 trabajadores: 2 Delegados de Prevención
- 101-500 trabajadores: 3 Delegados de Prevención
- 501-1000 trabajadores: 4 Delegados de Prevención
- 1001-2000 trabajadores: 5 Delegados de Prevención
- 2001-3000 trabajadores: 6 Delegados de Prevención
- 3001-4000 trabajadores: 7 Delegados de Prevención
- 4001 trabajadores en adelante: 8 Delegados de Prevención

Debido a que en la planta de recuperación de benceno se tienen pocos equipos y menos de 50 trabajadores en planta, se tiene 1 delegado de prevención en riesgos laborales.

1.8.2 Registro de la información.

Con el objetivo de poseer información para evitar o disminuir accidentes futuros que puedan ocurrir en las instalaciones, la información referente a la seguridad de la planta debe ser registrada tanto en forma física (papel y con copia) como en forma informática.

El delegado o coordinador de la seguridad, debe tener a su disposición toda la información pertinente, así como cualquier persona que ante una situación desfavorecida deba tomar alguna decisión sobre seguridad.

Dentro de la información requerida, se encuentra el plan de seguridad, las fichas de incidencias, los informes de accidentes y la relación de permisos de trabajo.

- **Plan de seguridad**

El plan de seguridad se elabora cada vez que exista un nuevo proyecto de ejecución y debe ser aprobado por el coordinador de seguridad.

Este documento debe contener la información acerca del mantenimiento de la obra en buen estado de orden y limpieza, la elección del emplazamiento de los puestos y áreas de trabajo, la manipulación de materiales y utilización de medios auxiliares, el mantenimiento, control de puesta en servicio y el control periódico de las instalaciones, así como la delimitación y acondicionamiento de las zonas de almacenamiento y depósitos de sustancias peligrosas, recogida de materiales, almacenamiento y eliminación de residuos.

- **Fichas de incidencias**

Las fichas de incidencias son realizadas por el coordinador y tienen información básica sobre las incidencias de la planta.

- **Informes de accidentes**

Es la información recolectada durante la vida de la instalación referida a los accidentes producidos, sus causas y consecuencias con la finalidad disminuir o evitar su incidencia.

- **Relación de permisos de trabajo**

Se trata de la información relacionada con el acceso a los sectores de trabajo permitidos a determinados operarios.

1.8.3 Formación.

El personal debe recibir la información adecuada con respecto a las sustancias y equipos con los que cuenta la planta. El objetivo de la formación es anunciar los materiales con los que se trabaja y sus posibles riesgos, la forma de combatirlos y los equipos de protección con los que se dispone para su seguridad.

CAPÍTULO 2:

Evaluación de impacto medioambiental.

2.1. Introducción.

La unidad diseñada, como bien indica su nombre, tiene como objetivo principal la recuperación o valorización de benceno de la corriente fluida, el cual es utilizado como reactivo principal en la síntesis de Alquilbenceno Lineal (LAB) materia prima de Sulfonato de Alquilbenceno Lineal (LAS), con la finalidad de retornarlo a la etapa de reacción de alquilación del producto.

El propósito del proyecto es, por un lado, el aprovechamiento de uno de los residuos generados en el proceso de obtención de LAS y con ello un menor consumo relativo de materia prima, por otro, una reducción de equipos y por tanto, una reducción del consumo energético del proceso, y finalmente la utilización de fluidos de servicio respetuosos con el medio como son el aire y el agua.

Todo esto, tiene como consecuencia la atenuación del impacto medioambiental del proceso, convirtiéndolo en un proyecto actualizado en el concepto del cuidado ecológico y haciendo hincapié en la metodología de la producción.

Sin embargo, a continuación se realiza el estudio medioambiental general de la unidad, para evaluar las consecuencias de su proyección.

2.2. Legislación

Este estudio se basa en la Ley 11/2014, de 3 de julio, por la que se modifica la ley 26/2007, de 23 de octubre, de responsabilidad medioambiental; así como la Ley 21/2013, de 9 de diciembre, de evaluación ambiental.

2.3. Gestión de residuos.

Como proceso industrial, la recuperación de benceno puede realizar diferentes emisiones a la atmósfera, al agua o al suelo, a continuación se menciona las situaciones que pueden darse.

2.3.1. Emisiones de líquidos

A pesar de que todas las corrientes de salida del proceso son líquidas, se envían ya sea para su reutilización, como es el benceno y ácido fluorhídrico como producto destilado, o bien, para su tratamiento hacia el siguiente proceso perteneciente a otra columna. Por tanto, no se producen vertidos directos del proceso hacia el medio exterior.

En cuanto a las fugas que pueden ocasionarse en los equipos, estas se recogerán de manera apropiada por una red externa de drenaje para su posterior tratamiento luego de ser analizadas.

2.3.2. Emisiones de sólidos

El proceso no implica sustancias sólidas, por lo que no se producirá la emisión de esta clase de residuos.

2.3.3. Emisiones de gases

En la unidad se pueden percibir dos corrientes de vapor, una que sale por cabeza de columna y otra que retorna al fondo de la columna. Estas corrientes no son enviadas a ningún otro proceso ni son eliminadas, sino que forman parte de la operación, por tanto, no se producen emisiones directas de éstas a la atmósfera.

Por lo que se refiere al fluido de servicio, vapor de agua de alta presión, éste se recircula a refinería donde se somete a procesos de tratamiento adecuados.

En cuanto a las fugas y en las situaciones del incremento de la presión de la columna que tenga que aliviarse mediante un escape controlado, éstas corrientes se dirigirán a un proceso de purificación debido a la toxicidad de los compuestos con los que se opera.

2.3.4. Ruido

El proceso implica máquinas rotativas y por tanto se producirá ruido, no obstante, se han definido los límites tanto de exposición a éste, como al máximo permitido que corresponde a 140 dB, por lo que se realizarán las mediciones rutinarias y aplicarán las acciones pertinentes explicadas en el apartado 1.4.1 de este mismo capítulo para minimizar el impacto.

