

A decorative graphic consisting of three blue circles of varying sizes and two thin blue lines. One line starts from the top left and passes through the center of the top circle. Another line starts from the top left and passes through the center of the middle circle. A third line starts from the top right and passes through the center of the bottom circle.

Planta de producción de Acrilonitrilo

**Jordi
Laia Bellver Sanchis
Leonardo Esteban Carpio Bustamante
Marc Frau Suau**

Tutor: David Gabriel

Índice

11. Manual de cálculos	5
11.1 Diseño del reactor (R-301/302)	5
11.1.1 Introducción.....	5
11.1.2. Reacción	6
11.1.3. Diseño del intercambiador de calor	25
11.1.4. Diseño de la zona de reacción	29
11.1.5. Diseño de los ciclones y de la zona de recuperación.....	29
11.1.6. Diseño mecánico del reactor.....	34
11.1.7. Peso del reactor.....	37
11.2. Diseño de las torres de destilación (TD-401/403)	40
11.2.1. Diseño de la torre de eliminación de acetonitrilo (TD-401).....	40
11.2.2. Diseño de la torre de recuperación de HCN (TD-402).....	45
11.2.3. Diseño de la torre de recuperación de AN (TD-403)	49
11.2.4. Diseño mecánico de las columnas	58
11.2.5. Peso de las columnas	66
11.2.6. Aislamiento de las columnas	70
11.3. Diseño de los condensadores (CD-401, CD-402 y CD-403)	71
11.3.1. Diseño mecánico de los condensadores.....	80
11.3.2. Peso de los condensadores.....	81
11.4. Diseño de los reboilers (RB-401, RB-402 y RB-403).....	83
11.4.1. Diseño mecánico de los reboilers	90
11.4.2. Peso de los reboilers	92
11.5. Diseño de la Caldera (CV-601/607)	93
11.6. Diseño del separador bifásico (S-401).....	97
11.6.1. Descripción del equipo	98
11.6.2. Diseño del separador bifásico vertical S-401	99
11.6.3. Diseño mecánico del separador bifásico	101
11.6.4. Peso del separador bifásico	103
11.7. Diseño de la turbina (TB-701).....	106
11.8. Diseño de la incineradora térmica (IT-501)	110
11.8.1. Diseño de la chimenea para evacuación de los gases de la incineración .	115
11.9. Diseño de los tanques de almacenamiento de materias primas (T-101/127) ..	117

Planta de producción de Acrilonitrilo

11. Manual de cálculos

11.9.1. Diseño mecánico de los tanques	118
11.9.2. Peso de los tanques	122
11.10. Diseño de los tanques de almacenamiento de producto acabado (T-901/913)	125
11.10.1. Diseño mecánico de los tanques	126
11.10.2. Peso de los tanques	130
11.11. Diseño de los silos (SL-901/902)	132
11.11.1. Diseño mecánico de los silos	133
11.11.2. Peso de los silos	135
11.12. Diseño del absorbedor (SC-401)	138
11.12.1. Diseño mecánico del absorbedor	140
11.12.2. Peso del absorbedor	142
11.13 Diseño de los Separadores Trifásicos	145
11.13.1 Separador Trifásico D-401	145
11.13.2 Separador Trifásico D-402	149
11.13.3. Diseño mecánico de los separadores trifásicos.....	154
11.13.4. Peso de los separadores trifásicos.....	157
11.14. Diseño de los intercambiadores de calor (E-301/302 y E-401/415).....	160
11.14.1. Diseño mecánico de los intercambiadores.....	162
11.14.2. Peso de los intercambiadores.....	163
11.15. Diseño de los quench (Q-401/402).....	164
11.15.1. Diseño mecánico de los quench.....	168
11.15.2. Peso de los quench.....	170
11.16. Diseño de los tanques pulmón (TP-401/412)	173
11.15.1. Diseño mecánico de los tanques	173
11.15.2. Peso de los tanques	176
11.17. Diseño de los tanques de condensados (TC-401/403).....	178
11.17.1. Diseño mecánico de los tanques	178
11.17.2. Peso de los tanques	186
11.18. Diseño de los tanques de mezcla (M-401/404) y los agitadores (AG-401/404)	188
11.18.1. Diseño mecánico de los tanques	191
11.18.2. Peso de los tanques	199

11. Manual de cálculos

11.1 Diseño del reactor (R-301/302)

11.1.1 Introducción

El proceso Sohio que se ha utilizado en este proyecto para la obtención de acrilonitrilo propone que la reacción a partir de amoníaco, propileno y aire se lleve a término en un reactor de lecho fluidizado con catalizador. La principal ventaja de este tipo de reactores es que permite controlar muy bien la temperatura de reacción ya que las condiciones de trabajo evitan la formación de “zonas calientes” dentro del reactor. Por lo tanto, son ideales para trabajar con reacciones fuertemente exotérmicas, como es el caso que nos ocupa.

Las reacciones principales y secundarias que participan en la producción de acrilonitrilo se producen sobre un catalizador de Bi-Mo-O. Como se ha comentado, la reacción es fuertemente exotérmica, por lo que se dispondrá de un sistema de refrigeración que mantendrá la temperatura del reactor a 450 °C, operando este de forma isoterma a 2 atmosferas de presión. El vapor generado en la refrigeración será utilizado para la generación de energía eléctrica a partir de turbinas. Los reactivos entran a 70 °C pero son calentados enseguida a la temperatura de reacción debido al fuerte carácter exotérmico de la reacción.

El reactor dispone de dos ciclones conectados en serie que permitirán recoger las partículas de catalizador para ser regeneradas. La desorción de las partículas en el catalizador se realiza mediante aire.

Debido a la cantidad de energía que es necesario intercambiar para mantener la temperatura del reactor constante, se ha decidido implementar dos reactores en paralelo para que cada uno de ellos trate la mitad de caudal, y así reducir la instrumentación necesaria para el intercambiador de calor en cada reactor.

Los apartados siguientes tratarán el diseño de la zona de reacción, del intercambiador de calor que ésta incluye para mantener la temperatura constante, y de los ciclones utilizados para recuperar el catalizador. Los resultados que se muestran son para cada uno de los reactores.

11.1.2. Reacción

11.1.2.1. Datos para el diseño

En este apartado se presentan los diferentes datos utilizados para el diseño del reactor en forma de tablas.

La tabla 11.1.2.1 muestra las constantes que aparecen en las diferentes ecuaciones de diseño.

Tabla 11.1.2.1. Constantes utilizadas para el diseño del reactor.

Parámetro	Nomenclatura	Valor
Aceleración de la gravedad (m/s ²)	g	9.8 m/s ²
Constante universal de los gases ideales	R	$1.987 \frac{\text{cal}}{\text{mol}\cdot\text{K}} = 8.31 \frac{\text{J}}{\text{mol}\cdot\text{K}} = 0.082 \frac{\text{atm}\cdot\text{l}}{\text{mol}\cdot\text{K}}$
Peso molecular propileno (g/mol)	PM _P	42
Peso molecular amoníaco (g/mol)	PM _{AM}	17
Peso molecular oxígeno (g/mol)	PM _O	32
Peso molecular acrilonitrilo (g/mol)	PM _{AN}	53
Peso molecular agua (g/mol)	PM _W	18
Peso molecular acroleína (g/mol)	PM _{AL}	56
Peso molecular acetonitrilo (g/mol)	PM _{ACN}	41
Peso molecular CO ₂ (g/mol)	PM _{CO₂}	44
Peso molecular CO (g/mol)	PM _{CO}	28
Peso molecular ácido cianhídrico (g/mol)	PM _{H₂CN}	27

La tabla 11.1.2.2 muestra las condiciones de operación del reactor.

Tabla 11.1.2.2. Condiciones de operación y de entrada del reactor.

Parámetro	Nomenclatura	Valor
Temperatura de reacción (K)	T _r	743
Temperatura de entrada (K)	T ₀	343
Temperatura de referencia (K)	T _{ref}	298
Presión (atm)	P	2
Caudal de propileno entrada (kg/s)	m _p	1.0694
Caudal de amoníaco entrada (kg/s)	m _{AM}	0.4444
Caudal de oxígeno entrada (kg/s)	m _O	0.9722
Caudal de nitrógeno entrada (kg/s)	m _N	3.2002
Caudal volumétrico entrada (m ³ /s)	Q	3.90

En la tabla 11.1.2.3 se encuentran recogidos los parámetros cinéticos necesarios para el cálculo de las velocidades de reacción. Las reacciones a las que se hace referencia se encuentran en el apartado 11.1.2.2.

Tabla 11.1.2.3. Parámetros cinéticos de las reacciones principales y secundarias.

Parámetro	Nomenclatura	Valor
Energía de activación de la reacción 1 (cal/mol)	Ea ₁	19000
Energía de activación de la reacción 2 (cal/mol)	Ea ₂	19000
Energía de activación de la reacción 3 (cal/mol)	Ea ₃	7000
Energía de activación de la reacción 4 (cal/mol)	Ea ₄	7000

Planta de producción de Acrilonitrilo

11. Manual de cálculos

Energía de activación de la reacción 5 (cal/mol)	E_{a5}	19800
Energía de activación de la reacción 6 (cal/mol)	E_{a6}	7000
Constante cinética de la reacción 1 a 470°C	$k_{1,ref}$	0.40556 s^{-1}
Constante cinética de la reacción 2 a 470°C	$k_{2,ref}$	0.00973 s^{-1}
Constante cinética de la reacción 3 a 470°C	$k_{3,ref}$	0.01744 s^{-1}
Constante cinética de la reacción 4 a 470°C	$k_{4,ref}$	6.81341 s^{-1}
Constante cinética de la reacción 5 a 470°C	$k_{5,ref}$	0.16222 s^{-1}
Constante cinética de la reacción 6 a 470°C	$k_{6,ref}$	0.07300 s^{-1}

La tabla 11.1.2.4 muestra las propiedades físicas de la corriente de entrada al reactor y del catalizador utilizado.

Tabla 11.1.2.4. Propiedades físicas del gas y características del catalizador.

Parámetro	Nomenclatura	Valor
Densidad del gas (kg/m^3)	ρ_F	2.702
Viscosidad del gas ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)	μ	$2.04 \cdot 10^{-5}$
Viscosidad cinemática del gas (m^2/s)	ν	$7.55 \cdot 10^{-6}$
Coefficiente de difusión del gas en el catalizador (m^2/s)	D_e	10^{-5}
Densidad de la partícula de catalizador (kg/m^3)	ρ_p	1100
Diámetro de las partículas de catalizador (m)	d_p	$7 \cdot 10^{-5}$
Relación caudal entrada-masa catalizador (h^{-1})	WWH	0.085

La tabla 11.1.2.5 presenta las características del lecho fluidizado que se han obtenido para garantizar una producción óptima de acrilonitrilo.

Tabla 11.1.2.5. Características del lecho.

Parámetro	Nomenclatura	Valor
Diámetro del lecho (m)	D_L	4.2
Sección del lecho (m^2)	A_L	4.91
Altura del lecho (m)	H_L	5
Volumen del lecho (m^3)	V_L	26.42
Carga de catalizador (kg)	M_{cat}	$4.53 \cdot 10^4$
Fración vacía	ϵ_p	0.5
Número de orificios en el aspersor	N_{or}	2114

En la tabla 11.1.2.6 se recogen los valores de las constantes utilizadas para el cálculo de las capacidades caloríficas específicas de los diferentes componentes que participan en las reacciones.

Tabla 11.1.2.6. Constantes para el cálculo de las capacidades caloríficas específicas.

Componente	α	β	γ	z
Nitrógeno (N_2)	30.78	$-1.178 \cdot 10^{-2}$	$2.390 \cdot 10^{-5}$	$-1.000 \cdot 10^{-8}$
Monóxido de carbono (CO)	30.87	$-1.285 \cdot 10^{-2}$	$2.789 \cdot 10^{-5}$	$-1.272 \cdot 10^{-8}$
Dióxido de carbono (CO_2)	28.11	$-3.680 \cdot 10^{-2}$	$1.746 \cdot 10^{-5}$	$-1.065 \cdot 10^{-8}$
Oxígeno (O_2)	19.80	$7.344 \cdot 10^{-2}$	$-5.602 \cdot 10^{-5}$	$1.715 \cdot 10^{-8}$
Propileno (C_3H_6)	3.710	$2.345 \cdot 10^{-1}$	$-1.160 \cdot 10^{-4}$	$2.205 \cdot 10^{-8}$
Amoníaco (NH_3)	27.31	$2.383 \cdot 10^{-2}$	$1.707 \cdot 10^{-5}$	$-1.185 \cdot 10^{-8}$
Ácido cianhídrico (HCN)	21.86	$6.062 \cdot 10^{-2}$	$-4.961 \cdot 10^{-5}$	$1.815 \cdot 10^{-8}$
Acroleína ($\text{C}_3\text{H}_4\text{O}$)	11.97	$2.106 \cdot 10^{-1}$	$-1.071 \cdot 10^{-4}$	$1.906 \cdot 10^{-8}$

Acrilonitrilo (C ₃ H ₃ N)	10.69	2.208 · 10 ⁻¹	-1.565 · 10 ⁻⁴	4.601 · 10 ⁻⁸
Acetonitrilo (C ₂ H ₃ N)	20.48	1.196 · 10 ⁻¹	-4.492 · 10 ⁻⁵	3.203 · 10 ⁻⁹
Agua (H ₂ O)	32.24	1.924 · 10 ⁻³	1.055 · 10 ⁻⁵	-3.596 · 10 ⁻⁹

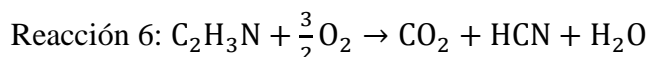
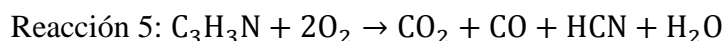
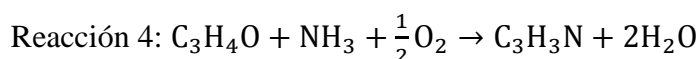
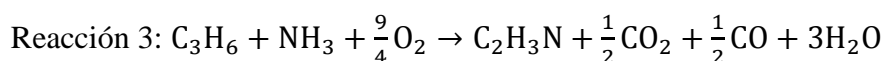
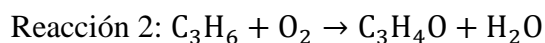
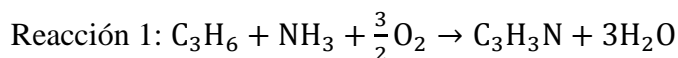
La tabla 11.1.2.7 muestra los valores de calores de reacción a 25°C que se han utilizado como referencia en el cálculo de los calores de reacción.

Tabla 11.1.2.7. Calores de reacción a 25°C

Parámetro	Nomenclatura	Valor
Calor de reacción de la Reacción 1 (J/mol)	$\Delta H_{\text{ref},1}$	-515610
Calor de reacción de la Reacción 2 (J/mol)	$\Delta H_{\text{ref},2}$	-333350
Calor de reacción de la Reacción 3 (J/mol)	$\Delta H_{\text{ref},3}$	-864990
Calor de reacción de la Reacción 4 (J/mol)	$\Delta H_{\text{ref},4}$	-182260
Calor de reacción de la Reacción 5 (J/mol)	$\Delta H_{\text{ref},5}$	-800900
Calor de reacción de la Reacción 6 (J/mol)	$\Delta H_{\text{ref},6}$	-593120

11.1.2.2. Cinética y estequiometría de las reacciones

La reacción principal que se da en el reactor es la de formación de acrilonitrilo a partir de propileno, amoníaco y aire. Sin embargo, también tienen lugar reacciones secundarias que conllevan a la formación de sub-productos como son el acetonitrilo o el ácido cianhídrico. A continuación se presentan dichas reacciones químicas.



El reactivo limitante es en todos los caso el primer reactivo que aparece en la reacción.

Las velocidades para cada reacción son las correspondientes a las ecuaciones 11.1.2.1-11.1.2.6, respectivamente.

$$r_1 = k_1 \cdot C_P \quad \text{Ecuación 11.1.2.1}$$

$$r_2 = k_2 \cdot C_P \quad \text{Ecuación 11.1.2.2}$$

$$r_3 = k_3 \cdot C_P \quad \text{Ecuación 11.1.2.3}$$

$$r_4 = k_4 \cdot C_{AL} \quad \text{Ecuación 11.1.2.4}$$

11. Manual de cálculos

$$r_5 = k_5 \cdot C_{AN} \quad \text{Ecuación 11.1.2.5}$$

$$r_6 = k_6 \cdot C_{ACN} \quad \text{Ecuación 11.1.2.6}$$

A partir de la ecuación 11.1.2.7 se puede escribir una velocidad de reacción para cada componente, representadas por las ecuaciones 11.1.2.8-11.1.2.17.

$$r_i = \sum_{j=1}^R v_{ij} \cdot r_j \quad \text{Ecuación 11.1.2.7}$$

Donde R es el número total de reacciones que participan en el sistema i v_{ij} es el coeficiente estequiométrico del componente i en la reacción j.

$$r_P = -r_1 - r_2 - r_3 \quad \text{Ecuación 11.1.2.8}$$

$$r_{AM} = -r_1 - r_3 - r_4 \quad \text{Ecuación 11.1.2.9}$$

$$r_O = -\frac{3}{2}r_1 - r_2 - \frac{9}{4}r_3 - \frac{1}{2}r_4 - 2r_5 - \frac{3}{2}r_6 \quad \text{Ecuación 11.1.2.10}$$

$$r_{AN} = r_1 + r_4 - r_5 \quad \text{Ecuación 11.1.2.11}$$

$$r_W = 3r_1 + r_2 + 3r_3 + 2r_4 + r_5 + r_6 \quad \text{Ecuación 11.1.2.12}$$

$$r_{AL} = r_2 - r_4 \quad \text{Ecuación 11.1.2.13}$$

$$r_{ACN} = r_3 - r_6 \quad \text{Ecuación 11.1.2.14}$$

$$r_{CO_2} = \frac{1}{2}r_3 + r_5 + r_6 \quad \text{Ecuación 11.1.2.15}$$

$$r_{CO} = \frac{1}{2}r_3 + r_5 \quad \text{Ecuación 11.1.2.16}$$

$$r_{HCN} = r_5 + r_6 \quad \text{Ecuación 11.1.2.17}$$

11.1.2.3. Modelo utilizado para el diseño

Para dimensionar el reactor i conocer la concentración de todos los componentes a la salida del mismo se ha utilizado el modelo de Werther. Este modelo considera que el sistema está formado por dos fases: la fase burbuja y la fase de suspensión. La primera es la parte del reactor libre de sólidos y la segunda es la zona que rodea las partículas de catalizador y donde se produce mayormente la reacción química.

Se han hecho las siguientes aproximaciones a la hora de realizar el diseño:

- Se ha considerado que en las dos fases el sistema se comporta como un flujo pistón.

- La reacción solo tiene lugar en la fase de suspensión.
- No hay cambios en el caudal volumétrico a través del lecho como consecuencia de la reacción química.
- La velocidad superficial de fluidización es muy superior a la mínima de fluidización.
- El catalizador no se desgasta.
- El sistema se encuentra en estado estacionario.

La nomenclatura que se va a seguir en este sub-apartado está resumida en la tabla 11.1.2.8.

Tabla 11.1.2.8. Parámetros utilizados para el cálculo del modelo de Wether.

Parámetro	Nomenclatura
Fracción vacía	ϵ_p
Fracción de fase burbuja	ϵ_d
Fracción mínima de fluidización	ϵ_{mf}
Concentración en la fase burbuja (mol/l)	C_b
Concentración en la fase de suspensión (mol/l)	C_d
Velocidad superficial de fluidización (m/s)	u
Velocidad mínima de fluidización (m/s)	u_{mf}
Área intersticial (m^2/m^3)	a
Coefficiente de transferencia de materia entre fases	k_G
Constante cinética (s^{-1})	k
Coefficiente de difusión (m^2/s)	D_e
Diámetro de burbuja (m)	d_v
Diámetro de burbuja inicial (m)	d_{v0}
Caudal de gas a través de los orificios del difusor (m^3/s)	V_{or}
Sección del reactor (m^2)	A_L
Número de orificios en el difusor	N_{or}
Duración media de vida de una burbuja (s)	λ
Parámetros para el cálculo de a	ϕ, F
Densidad del gas (kg/m^3)	ρ_F
Densidad de la partícula de catalizador (kg/m^3)	ρ_p
Viscosidad cinemática del gas (m^2/s)	ν
Tiempo (s)	t
Altura del reactor (m)	h

Las ecuaciones que rigen el modelo matemático son la ecuaciones 11.1.2.18 y 11.1.2.19 para la fase burbuja y suspensión, respectivamente.

$$\epsilon_b \frac{\partial C_b}{\partial t} = - \left(u - u_{mf}(1 - \epsilon_b) \right) \frac{\partial C_b}{\partial h} - k_G a (C_b - C_d) \quad \text{Ecuación 11.1.2.18}$$

$$(1 - \epsilon_b) (\epsilon_{mf} + (1 - \epsilon_{mf}) \epsilon_p) \frac{\partial C_d}{\partial t} = - u_{mf} (1 - \epsilon_b) \frac{\partial C_d}{\partial h} + k_G a (C_b - C_d) + (1 - \epsilon_b) (1 - \epsilon_{mf}) k C_d \quad \text{Ecuación 11.1.2.19}$$

Si se considera estado estacionario, las dos ecuaciones anteriores pueden reescribirse como las ecuaciones 11.1.2.20 y 11.1.2.21.

$$\frac{\partial C_b}{\partial h} = -\frac{k_G a (C_b - C_d)}{u - u_{mf}(1 - \varepsilon_b)} \quad \text{Ecuación 11.1.2.20}$$

$$\frac{\partial C_d}{\partial h} = \frac{k_G a (C_b - C_d) + (1 - \varepsilon_b)(1 - \varepsilon_{mf})k C_d}{u_{mf}(1 - \varepsilon_b)} \quad \text{Ecuación 11.1.2.21}$$

Además, el modelo también tiene en cuenta que el diámetro de burbuja aumentará desde que se forme en los difusores a lo largo del reactor. Para ilustrarlo matemáticamente, se utiliza la ecuación diferencial 11.1.2.22.

$$\frac{d(d_v)}{dh} = \left(\frac{2\varepsilon_b}{9\pi}\right)^{\frac{1}{3}} - \frac{dv}{3\lambda u} \quad \text{Ecuación 11.1.2.22}$$

El parámetro λ se calcula a partir de la ecuación 11.1.2.23.

$$280 \frac{u_{mf}}{g} \quad \text{Ecuación 11.1.2.23}$$

Como condición inicial, el diámetro de las burbujas a la entrada del reactor se estima a partir de la ecuación 11.1.2.24.

$$d_{v0} = 1.3 \left(\frac{V_{or}}{g}\right)^{0.2} \quad \text{Ecuación 11.1.2.24}$$

Donde el parámetro V_{or} se calcula con la ecuación 11.1.2.25.

$$V_{or} = \frac{u A_L}{n_{or}} \quad \text{Ecuación 11.1.2.25}$$

El coeficiente de transferencia de materia se ha calculado a partir de la correlación representada por la ecuación 11.1.2.26.

$$k_G = \frac{u_{mf}}{3} + \sqrt{\frac{4D_e \varepsilon_{mf} u}{\pi d_v}} \quad \text{Ecuación 11.1.2.26}$$

Cabe destacar que se ha considerado un valor de D_e típico y medio para toda la mezcla gaseosa ya que se ha observado que dicho parámetro no afecta demasiado el resultado de la simulación.

El valor del área superficial se ha determinado a partir de la ecuación 11.1.2.27.

$$a = 29.1 \cdot \frac{u - u_{mf}}{\sqrt{1 + 27.2(u - u_{mf})}} \cdot (\varphi \cdot F)^{-1} \quad \text{Ecuación 11.1.2.27}$$

El parámetro φ depende del diámetro del reactor según la ecuación y en el caso que nos ocupa tiene un valor de 1.6.

El parámetro F se puede calcular con la ecuación 11.1.2.28.

$$F = \frac{H}{0.18 \cdot (1 - (1 + 6.84)^{-0.8}) + (1 + 6.84)(H - 1)} \quad \text{Ecuación 11.1.2.28}$$

La velocidad superficial de fluidización se ha estimado como 7 veces la velocidad mínima de fluidización, que se calcula a partir de la ecuación 11.1.2.29.

$$u_{mf} = 7.14 \cdot (1 - \varepsilon_{mf}) \cdot v \cdot a \cdot \left(\sqrt{1 + \frac{0.067 \cdot \varepsilon_{mf}^3}{(1 - \varepsilon_{mf})^2} \cdot (\rho_p - \rho_F) \cdot \frac{g}{\rho_F \cdot v^2} \cdot \frac{1}{a^3}} - 1 \right) \quad \text{Ecuación 11.1.2.29}$$

Con toda esta información ya se puede aplicar el modelo de Werther, que nos dará el perfil de concentraciones de todos los componentes a lo largo del reactor.

11.1.2.4. Balance de energía

La realización de el balance de energía en el reactor nos indicará la cantidad de calor que es necesario retirar del sistema para que éste se mantenga isoterma a una temperatura de 470°C. A partir de esta valor se podrá dimensionar el serpentín que se requerirá para enfriar el reactor.

La nomenclatura de las variables que aparecerán en este apartado se encuentra resumida en la tabla 11.1.2.9.

Tabla 11.1.2.9. Parámetros utilizados para el cálculo del balance de energía.

Parámetro	Nomenclatura
Calor a intercambiar (W)	Q_c
Caudal molar del componente i (mol/s)	n_{i0}
Caudal molar del reactivo limitante (mol/s)	n_{A0}
Temperatura (K)	T
Capacidad calorífica específica del componente i ($\frac{J}{mol \cdot K}$)	C_{p_i}
Entalpía de reacción de la reacción j (J/mol)	ΔH_j
Entalpía de reacción de referencia (J/mol)	$\Delta H_{i,ref}$
Extensión de la reacción j	X_j
Constante cinética de la reacción j (s^{-1})	k_j
Sección del lecho (m^2)	A_L
Caudal volumétrico (m^3)	Q
Número de componentes	m
Número de reacciones	R

El balance de energía se ha realizado asimilando nuestro sistema al de un reactor agitado de mezcla perfecta, ya que el hecho de tener un lecho fluidizado hace que el calor se disipe de forma homogénea por el reactor y por tanto se pueda aproximar su comportamiento al de un RCTA. La ecuación que representa el balance energía es la 11.1.2.30.

$$Q = n_{i0} \int_{T_0}^T \sum_{i=1}^m C_{p_i} dT + n_{A0} \sum_{j=1}^R \Delta H_j X_j \quad \text{Ecuación 11.1.2.30}$$

El cálculo de C_{p_i} se ha realizado a partir de los valores de la tabla 11.1.2.6 utilizando la ecuación 11.1.2.31.

$$C_{p_i} = \alpha_i + \beta_i T + \gamma_i T^2 + z_i T^3 \quad \text{Ecuación 11.1.2.31}$$

El calor de reacción para cada una de las seis reacciones se ha calculado con la ecuación 11.1.2.32 a partir de los valores de referencia de la tabla 11.1.2.7.

$$\Delta H_j = \Delta H_{j,ref} + \int_{298K}^T (\Delta C_p)_j dT \quad \text{Ecuación 11.1.2.32}$$

Donde el término $(\Delta C_p)_i$ se calcula con la ecuación 11.1.2.33.

$$(\Delta C_p)_j = \sum_{i=1}^m \nu_{ij} C_{p_i} \quad \text{Ecuación 11.1.2.33}$$

El extensión de reacción se ha calculado a partir de la ecuación diferencial representada aquí por la ecuación 11.1.2.33.

$$\frac{dX_j}{dh} = k_j \cdot A_L \cdot \frac{1 - X_j}{Q} \quad \text{Ecuación 11.1.2.33}$$

11.1.2.5. Programación de la simulación en Matlab

A continuación se presenta el *script* que se ha utilizado en Matlab para simular el comportamiento del sistema y que incluye todas las ecuaciones y constantes comentadas en este apartado.

```
function reactor_est_definitivo_calor
clc
close all
%NOMENCLATURA
% A=Propileno(C3H6) B=Amoníaco(NH3) C=Oxígeno(O2)
D=Acrilonitrilo(C3H3N)
% E=Agua(H2O) F=Acroleína(C3H4O) G=Acetonitrilo(C2H3N)
% H=Dióxido de carbono(CO2) I=Monóxido de carbono(CO)
% J=Ácido cianhídrico(HCN) K=Nitrógeno(N2)

% Reacción 1: A + B + 3/2C --> D + 3E
% Reacción 2: A + B --> F + E
```

Planta de producción de Acrilonitrilo

11. Manual de cálculos

```
% Reacción 3: A + B + 9/4C --> G + 1/2H + 1/2I + 3E
% Reacción 4: F + B + 1/2C --> D + 2E
% Reacción 5: D + 2C --> H + I + J + E
% Reacción 6: G + 3/2C --> H + J + E
```

```
%-----
-----
```

%CONSTANTES

```
g=9.8; %m/s2 Aceleración de la gravedad
R=1.987207; % cal/mol·K Constante universal de gases ideales
Rj=8.31; %J/Kmol Constante universal de gases ideales
Ra=0.082; %atml/Kmol Constante universal de gases ideales
PMA=42; %g/mol Peso molecular de C3H6
PMB=17; %g/mol Peso molecular de NH3
PMC=32; %g/mol Peso molecular de O2
PMD=53; %g/mol Peso molecular de C3H3N
PME=18; %g/mol Peso molecular de H2O
PMF=56; %g/mol Peso molecular de C3H4O
PMG=41; %g/mol Peso molecular de C2H3N
PMH=44; %g/mol Peso molecular de CO2
PMI=28; %g/mol Peso molecular de CO
PMJ=27; %g/mol Peso molecular de HCN
PMK=28; %g/mol Peso molecular de N2
```

```
%-----
-----
```

% CONDICIONES DE OPERACIÓN

```
Tr=470+273; %K Temperatura de reacción
T0=70+273; %K Temperatura de entrada
Tref=298; %K Temperatura de referencia
P=2; %atm Presión de trabajo
```

```
%-----
-----
```

%CONDICIONES DE ENTRADA AL REACTOR

%Caudales máxicos (kg/s)

```
mA=7700/3600/2; %C3H6
mB=3200/3600/2; %NH3
mC=7000/3600/2; %O2
mD=0; %C3H3N
mE=0; %H2O
mF=0; %C3H4O
mG=0; %C2H3N
mH=0; %CO2
mI=0; %CO
mJ=0; %HCN
mK=mC/(PMC*0.21)*0.79*PMK; %N2
```

%Caudales molares (mol/s)

```
nA0=mA/PMA*1000; %C3H6
nB0=mB/PMB*1000; %NH3
nC0=mC/PMC*1000; %O2
nD0=0; %C3H3N
nE0=mE/PME*1000; %H2O
nF0=0; %C3H4O
nG0=0; %C2H3N
```

Planta de producción de Acrilonitrilo

11. Manual de cálculos

```
nH0=0;           %CO2
nI0=0;           %CO
nJ0=0;           %HCN
nK0=mK/PMK*1000; %N2

%Fracciones molares
xA0=nA0/(nA0+nB0+nC0+nK0+nE0); %C3H6
xB0=nB0/(nA0+nB0+nC0+nK0+nE0); %NH3
xC0=nC0/(nA0+nB0+nC0+nK0+nE0); %O2
xD0=0;           %C3H3N
xE0=nE0/(nA0+nB0+nC0+nK0+nE0); %H2O
xF0=0;           %C3H4O
xG0=0;           %C2H3N
xH0=0;           %CO2
xI0=0;           %CO
xJ0=0;           %HCN
xK0=nK0/(nA0+nB0+nC0+nK0+nE0); %N2

%Concentraciones (mol/l)
CA0=P*xA0/(Ra*T0); %C3H6
CB0=P*xB0/(Ra*T0); %NH3
CC0=P*xC0/(Ra*T0); %O2
CD0=P*xD0/(Ra*T0); %C3H3N
CE0=P*xE0/(Ra*T0); %H2O
CF0=P*xF0/(Ra*T0); %C3H4O
CG0=P*xG0/(Ra*T0); %C2H3N
CH0=P*xH0/(Ra*T0); %CO2
CI0=P*xI0/(Ra*T0); %CO
CJ0=P*xJ0/(Ra*T0); %HCN
CK0=P*xK0/(Ra*T0); %N2

%-----
-----

%PARÁMETROS CINÉTICOS
ea1=19000; %cal/mol Energía de activación de la Reacción 1
ea2=19000; %cal/mol Energía de activación de la Reacción 2
ea3=7000; %cal/mol Energía de activación de la Reacción 3
ea4=7000; %cal/mol Energía de activación de la Reacción 4
ea5=19800; %cal/mol Energía de activación de la Reacción 5
ea6=7000; %cal/mol Energía de activación de la Reacción 6

k1r=0.40556; %1/s Constante cinética de la Reacción 1 a 470°C
k2r=0.00973; %1/s Constante cinética de la Reacción 2 a 470°C
k3r=0.01744; %1/s Constante cinética de la Reacción 3 a 470°C
k4r=6.81341; %1/s Constante cinética de la Reacción 4 a 470°C
k5r=0.16222; %1/s Constante cinética de la Reacción 5 a 470°C
k6r=0.07300; %1/s Constante cinética de la Reacción 6 a 470°C

k1=k1r*exp(-ea1/R*(1/(470+273)-1/Tr)); % 1/s Constante cinética de la
Reacción 1
k2=k2r*exp(-ea2/R*(1/(470+273)-1/Tr)); % 1/s Constante cinética de la
Reacción 2
k3=k3r*exp(-ea3/R*(1/(470+273)-1/Tr)); % 1/s Constante cinética de la
Reacción 3
k4=k4r*exp(-ea4/R*(1/(470+273)-1/Tr)); % 1/s Constante cinética de la
Reacción 4
k5=k5r*exp(-ea5/R*(1/(470+273)-1/Tr)); % 1/s Constante cinética de la
Reacción 5
```

Planta de producción de Acrilonitrilo

11. Manual de cálculos

```
k6=k6r*exp(-ea1/R*(1/(470+273)-1/Tr));% 1/s Constante cinética de la
Reacción 6

%-----
-----

%PROPIEDADES FÍSICAS
densf=2.702; %kg/m3 Densidad del fluido
densp=1100; %kg/m3 Densidad de la partícula de catalizador
visc=2.04E-5; %kg/ms Viscosidad del fluido
nu=visc/densf; %m2/s Viscosidad cinemática del fluido

%-----
-----

%CARACTERÍSTICAS DEL REACTOR
dp=7E-5; %m Diámetro de las
partículas de catalizador
Ar=g*dp^3/nu^2*(densp-densf)/densf; % Número de Arquímedes
umf=33.7*(sqrt(1+3.6E-5*Ar)-1)*nu/dp; %m/s Velocidad mínima de
fluidización
u=6*umf; %m/s Velocidad de operación
Vb=0.8*(u-umf); %m/s Velocidad de la fase
burbuja
lamb=280*umf/g; %s Parámetro para
calcular el diámetro de burbuja
DT=4.2; %m Diámetro del lecho
HT=5; %m Altura del lecho
WWH=0.085; %h-1 Relación caudal
entrada/masa catalizador
Mcat=mA*3600/WWH %kg Masa de catalizador
Vcat=Mcat/densp %m3 Volumen de catalizador
ep=0.5; % Fracción vacía de
partículas
Dt=5e-2; %m Diámetro externo de
los tubos
Ht=5; %m Altura de los tubos
Nt=170.41 % Número de tubos
AT=1/HT*(pi/4*DT^2*HT-Vcat-pi/4*Dt^2*Ht*Nt)%m2 Sección del lecho
VT=AT*HT; %m3 Volumen del lecho
Q=u*AT; %m3/s Caudal volumétrico
nor=400*AT; % Número de orificios en
el aspersor
Vor=u*AT/nor; %m3/s Caudal volumétrico del
gas a través del aspersor
dv0=(Vor^2/g)^0.2; %m Diámetro de burbuja
inicial

%Cálculo de la fracción mínima de fluidización (emf)
FH=HT/(0.18*(1-(1+6.84)^-0.8)+(1+6.84)^-1.8*(HT-1));
a=29.1*(u-umf)*1.6*FH/sqrt(1+27.2*(u-umf)); %m-1 Superficie
específica del catalizador
f2=@(em) umf-7.14*(1-em)*nu*a*(sqrt(1+0.067*em^3/(1-em)^2*(densp-
densf)*g/(densf*nu^2)*1/a^3)-1);
emf=fzero(f2,0.5); %Fracción mínima de fluidización

%-----
-----
```


Planta de producción de Acrilonitrilo

11. Manual de cálculos

%PARÁMETROS ENERGÉTICOS

%Constantes para el cálculo de Cp

```
valCp=[30.78 -1.178e-02 2.390e-05 -1.000e-08 %N2
        30.87 -1.285e-02 2.789e-05 -1.272e-08 %CO
        28.11 -3.680e-06 1.746e-05 -1.065e-08 %O2
        19.80 7.344e-02 -5.602e-05 1.715e-08 %CO2
        3.710 2.345e-01 -1.160e-04 2.205e-08 %C3H6
        27.31 2.383e-02 1.707e-05 -1.185e-08 %NH3
        21.86 6.062e-02 -4.961e-05 1.815e-08 %HCN
        11.97 2.106e-01 -1.071e-04 1.906e-08 %C3H4O
        20.69 2.208e-01 -1.565e-04 4.601e-08 %C3H3N
        10.48 1.196e-01 -4.492e-05 3.203e-09 %C2H3N
        32.24 1.924e-03 1.055e-05 -3.596e-09]; %H2O
```

%Calores de reacción a 298K (J/mol)

```
h10=-515610; %Reacción 1
h20=-333350; %Reacción 2
h30=-864990; %Reacción 3
h40=-182260; %Reacción 4
h50=-800900; %Reacción 5
h60=-593120; %Reacción 6
```

%-----

%LLAMADA ODE

```
[h,C]=ode23s(@rcfp,[0 HT],[CA0 CA0 CB0 CB0 CJ0 CJ0 CF0 CF0 CD0 CD0 CG0
CG0 CE0 CE0 CI0 CI0 CC0 CC0 CH0 CH0 dv0 0 0 0 0 0 0]);
```

%-----

%RESULTADOS

%Caudal molar en la fase burbuja (kmol/h)

```
CAb=C(:,1)*Q*3600; %C3H6
CBb=C(:,3)*Q*3600; %NH3
CCb=C(:,17)*Q*3600; %O2
CDb=C(:,9)*Q*3600; %C3H3N
CEb=C(:,13)*Q*3600; %H2O
CFb=C(:,7)*Q*3600; %C3H4O
CGb=C(:,11)*Q*3600; %C2H3N
CHb=C(:,19)*Q*3600; %CO2
CIb=C(:,15)*Q*3600; %CO
CJb=C(:,5)*Q*3600; %HCN
```

%Caudal molar en la fase de suspensión (kmol/h)

```
CAd=C(:,2)*Q*3600; %C3H6
CBd=C(:,4)*Q*3600; %NH3
CCd=C(:,18)*Q*3600; %O2
CDd=C(:,10)*Q*3600; %C3H3N
CEd=C(:,14)*Q*3600; %H2O
CFd=C(:,8)*Q*3600; %C3H4O
CGd=C(:,12)*Q*3600; %C2H3N
CHd=C(:,20)*Q*3600; %CO2
CIId=C(:,16)*Q*3600; %CO
CJd=C(:,6)*Q*3600; %HCN
```

%Diámetro de burbuja (m)

```
dv=C(:,21);
```

Planta de producción de Acrilonitrilo

11. Manual de cálculos

```
%Extensión de la reacción
X1=C(end,22); %Reacción 1
X2=C(end,23); %Reacción 2
X3=C(end,24); %Reacción 3
X4=C(end,25); %Reacción 4
X5=C(end,26); %Reacción 5
X6=C(end,27); %Reacción 6

%Caudales molares finales (kmol/h)
CAbf=CAb(end) %C3H6
CBbf=CBb(end) %NH3
CCbf=CCb(end) %O2
CDbf=CDb(end) %C3H3N
CEbf=CEb(end) %H2O
CFbf=CFb(end) %C3H4O
CGbf=CGb(end) %C2H3N
CHbf=CHb(end) %CO2
CIbf=CIb(end) %CO
CJbf=CJb(end) %HCN

%Conversión respecto al propeno
XA=(CA0-C(end,1))/CA0

%Acrilonitrilo producido
Prod=CDD(end)*PMD*24*300/1000; %Tn/any

%-----
-----

%GRÁFICOS
%Concentración en la fase burbuja
figure (1)
plot(h,CAb,h,CBb,h,CCb,h,CDb,h,CEb,h,CFb,h,CGb,h,CHb,h,CIb,h,CJb)
legend('C3H6','NH3','O2','C3H3N','H2O','C3H4O','C2H3N','CO2','CO','HCN')
xlabel('Altura (m)')
ylabel('Caudal (kmol/h)')
title('Caudal en la fase burbuja')
grid on

%Concentración en la fase de suspensión
figure (2)
plot(h,CAd,h,CBd,h,CCd,h,CDD,h,CEd,h,CFd,h,CGd,h,CHd,h,CIb,h,CJd)
legend('C3H6','NH3','O2','C3H3N','H2O','C3H4O','C2H3N','CO2','CO','HCN')
xlabel('Altura (m)')
ylabel('Caudal (kmol/h)')
title('Caudal en la fase de suspensión')
grid on

%Diámetro de burbuja
figure (3)
plot(h,dv)
xlabel('Altura (m)')
ylabel('Diámetro (m)')
title('Diámetro de burbuja')
grid on
```

```

%Extensión de la reacción
figure (4)
plot(h,C(:,22),h,C(:,23),h,C(:,24),h,C(:,25),h,C(:,26),h,C(:,27))
legend('X1','X2','X3','X4','X5','X6')
xlabel('Altura (m)')
ylabel('Cnversión (%)')
title('Extensión de la reacción')
grid on

%-----
-----

function yp=rcfp(t,y)

%Variables
CAb=y(1); %Concentración de C3H6 en la fase burbuja
CAAd=y(2); %Concentración de C3H6 en la fase de suspensión
CBb=y(3); %Concentración de NH3 en la fase burbuja
CBd=y(4); %Concentración de NH3 en la fase de suspensión
CJb=y(5); %Concentración de HCN en la fase burbuja
CJd=y(6); %Concentración de HCN en la fase de suspensión
CFb=y(7); %Concentración de C3H4 en la fase burbuja
CFd=y(8); %Concentración de C3H4 en la fase de suspensión
CDB=y(9); %Concentración de C3H3N en la fase burbuja
CDd=y(10); %Concentración de C3H3N en la fase de suspensión
CGB=y(11); %Concentración de C2H3N en la fase burbuja
CGd=y(12); %Concentración de C2H3N en la fase de suspensión
CEb=y(13); %Concentración de H2O en la fase burbuja
CED=y(14); %Concentración de H2O en la fase de suspensión
CIB=y(15); %Concentración de CO en la fase burbuja
CID=y(16); %Concentración de CO en la fase de suspensión
CCb=y(17); %Concentración de O2 en la fase burbuja
CCd=y(18); %Concentración de O2 en la fase de suspensión
CHb=y(19); %Concentración de CO2 en la fase de suspensión
dv=y(21); %Diámetro de burbuja
x1=y(22); %Extensión de reacción 1
x2=y(23); %Extensión de reacción 2
x3=y(24); %Extensión de reacción 3
x4=y(25); %Extensión de reacción 4
x5=y(26); %Extensión de reacción 5
x6=y(27); %Extensión de reacción 6

r1=k1*y(2)/densp; %mol/ls Velocidad de reacción 1
r2=k2*y(2)/densp; %mol/ls Velocidad de reacción 2
r3=k3*y(2)/densp; %mol/ls Velocidad de reacción 3
r4=k4*y(8)/densp; %mol/ls Velocidad de reacción 4
r5=k5*y(10)/densp; %mol/ls Velocidad de reacción 5
r6=k6*y(12)/densp; %mol/ls Velocidad de reacción 6

rI=0.5*r3+r5; %mol/ls Velocidad de
reacción de CO
rC=-1.5*r1-r2-9/4*r3-0.5*r4-2*r5-1.5*r6; %mol/ls Velocidad de
reacción de O2
rH=0.5*r3+r5+ r6; %mol/ls Velocidad de
reacción de CO2
rA=-r1-r2-r3; %mol/ls Velocidad de
reacción de C3H6

```

Planta de producción de Acrilonitrilo

11. Manual de cálculos

```
rB=-r1-r3-r4; %mol/ls          Velocidad de
reacción de NH3
rJ=r5+r6; %mol/ls            Velocidad de
reacción de HCN
rF=r2-r4; %mol/ls           Velocidad de
reacción de C3H4O
rD=r1+r4-r5; %mol/ls       Velocidad de
reacción de C3H3N
rG=r3-r6; %mol/ls          Velocidad de
reacción de C2H3N
rE=3*r1+r2+3*r3+2*r4+r5+r6; %mol/ls  Velocidad de
reacción de H2O

ub=Vb+0.71*3.2*sqrt(g*y(21)); %m/s    Velocidad en la fase
burbuja
eb=Vb/ub; %                  Hold-up de fase burbuja
D=1e-5; %m2/s                Difusividad
kg=umf/3+sqrt(4*D*emf*ub/(pi*y(21))); %m/s  Coeficiente de
transferencia de materia

%Capacidad calorífica a Tr (J/molK)
CpK=valCp(1,1)*Tr+valCp(1,2)*Tr^2/2+valCp(1,3)*Tr^3/3+valCp(1,4)*Tr^4/
4;      %N2
CpI=valCp(2,1)*Tr+valCp(2,2)*Tr^2/2+valCp(2,3)*Tr^3/3+valCp(2,4)*Tr^4/
4;      %CO
CpC=valCp(3,1)*Tr+valCp(3,2)*Tr^2/2+valCp(3,3)*Tr^3/3+valCp(3,4)*Tr^4/
4;      %O2
CpH=valCp(4,1)*Tr+valCp(4,2)*Tr^2/2+valCp(4,3)*Tr^3/3+valCp(4,4)*Tr^4/
4;      %CO2
CpA=valCp(5,1)*Tr+valCp(5,2)*Tr^2/2+valCp(5,3)*Tr^3/3+valCp(5,4)*Tr^4/
4;      %C3H6
CpB=valCp(6,1)*Tr+valCp(6,2)*Tr^2/2+valCp(6,3)*Tr^3/3+valCp(6,4)*Tr^4/
4;      %NH3
CpJ=valCp(7,1)*Tr+valCp(7,2)*Tr^2/2+valCp(7,3)*Tr^3/3+valCp(7,4)*Tr^4/
4;      %HCN
CpF=valCp(8,1)*Tr+valCp(8,2)*Tr^2/2+valCp(8,3)*Tr^3/3+valCp(8,4)*Tr^4/
4;      %C3H4O
CpD=valCp(9,1)*Tr+valCp(9,2)*Tr^2/2+valCp(9,3)*Tr^3/3+valCp(9,4)*Tr^4/
4;      %C3H3N
CpG=valCp(10,1)*Tr+valCp(10,2)*Tr^2/2+valCp(10,3)*Tr^3/3+valCp(10,4)*T
r^4/4; %C2H3N
CpE=valCp(11,1)*Tr+valCp(11,2)*Tr^2/2+valCp(11,3)*Tr^3/3+valCp(11,4)*T
r^4/4; %H2O

%Capacidad calorífica a T0 (J/molK)
CpKr=valCp(1,1)*T0+valCp(1,2)*T0^2/2+valCp(1,3)*T0^3/3+valCp(1,4)*T0^4
/4;      %N2
CpIr=valCp(2,1)*T0+valCp(2,2)*T0^2/2+valCp(2,3)*T0^3/3+valCp(2,4)*T0^4
/4;      %CO
CpCr=valCp(3,1)*T0+valCp(3,2)*T0^2/2+valCp(3,3)*T0^3/3+valCp(3,4)*T0^4
/4;      %O2
CpHr=valCp(4,1)*T0+valCp(4,2)*T0^2/2+valCp(4,3)*T0^3/3+valCp(4,4)*T0^4
/4;      %CO2
CpAr=valCp(5,1)*T0+valCp(5,2)*T0^2/2+valCp(5,3)*T0^3/3+valCp(5,4)*T0^4
/4;      %C3H6
CpBr=valCp(6,1)*T0+valCp(6,2)*T0^2/2+valCp(6,3)*T0^3/3+valCp(6,4)*T0^4
/4;      %NH3
```

Planta de producción de Acrilonitrilo

11. Manual de cálculos

```
CpJr=valCp(7,1)*T0+valCp(7,2)*T0^2/2+valCp(7,3)*T0^3/3+valCp(7,4)*T0^4/4; %HCN
CpFr=valCp(8,1)*T0+valCp(8,2)*T0^2/2+valCp(8,3)*T0^3/3+valCp(8,4)*T0^4/4; %C3H4O
CpDr=valCp(9,1)*T0+valCp(9,2)*T0^2/2+valCp(9,3)*T0^3/3+valCp(9,4)*T0^4/4; %C3H3N
CpGr=valCp(10,1)*T0+valCp(10,2)*T0^2/2+valCp(10,3)*T0^3/3+valCp(10,4)*T0^4/4; %C2H3N
CpEr=valCp(11,1)*T0+valCp(11,2)*T0^2/2+valCp(11,3)*T0^3/3+valCp(11,4)*T0^4/4; %H2O
```

%Capacidad calorífica a Tref (J/molK)

```
CpKr2=valCp(1,1)*Tref+valCp(1,2)*Tref^2/2+valCp(1,3)*Tref^3/3+valCp(1,4)*Tref^4/4; %N2
CpIr2=valCp(2,1)*Tref+valCp(2,2)*Tref^2/2+valCp(2,3)*Tref^3/3+valCp(2,4)*Tref^4/4; %CO
CpCr2=valCp(3,1)*Tref+valCp(3,2)*Tref^2/2+valCp(3,3)*Tref^3/3+valCp(3,4)*Tref^4/4; %O2
CpHr2=valCp(4,1)*Tref+valCp(4,2)*Tref^2/2+valCp(4,3)*Tref^3/3+valCp(4,4)*Tref^4/4; %CO2
CpAr2=valCp(5,1)*Tref+valCp(5,2)*Tref^2/2+valCp(5,3)*Tref^3/3+valCp(5,4)*Tref^4/4; %C3H6
CpBr2=valCp(6,1)*Tref+valCp(6,2)*Tref^2/2+valCp(6,3)*Tref^3/3+valCp(6,4)*Tref^4/4; %NH3
CpJr2=valCp(7,1)*Tref+valCp(7,2)*Tref^2/2+valCp(7,3)*Tref^3/3+valCp(7,4)*Tref^4/4; %HCN
CpFr2=valCp(8,1)*Tref+valCp(8,2)*Tref^2/2+valCp(8,3)*Tref^3/3+valCp(8,4)*Tref^4/4; %C3H4O
CpDr2=valCp(9,1)*Tref+valCp(9,2)*Tref^2/2+valCp(9,3)*Tref^3/3+valCp(9,4)*Tref^4/4; %C3H3N
CpGr2=valCp(10,1)*Tref+valCp(10,2)*Tref^2/2+valCp(10,3)*Tref^3/3+valCp(10,4)*Tref^4/4; %C2H3N
CpEr2=valCp(11,1)*Tref+valCp(11,2)*Tref^2/2+valCp(11,3)*Tref^3/3+valCp(11,4)*Tref^4/4; %H2O
```

%Entalpías de reacción (J/mol)

```
H1=h10+(CpD-CpDr2)+3*(CpE-CpEr2)-(CpA-CpAr2)-(CpB-CpBr2)-3/2*(CpC-CpCr2); %Reacción 1
H2=h20+(CpF-CpFr2)+(CpE-CpEr2)-(CpA-CpAr2)-(CpC-CpCr2); %Reacción 2
H3=h30+(CpG-CpGr2)+0.5*(CpH-CpHr2)+0.5*(CpI-CpIr2)+3*(CpE-CpEr2)-(CpA-CpAr2)-(CpB-CpBr2)-9/4*(CpC-CpCr2); %Reacción 3
H4=h40+(CpD-CpDr2)+2*(CpE-CpEr2)-(CpF-CpFr2)-(CpB-CpBr2)-0.5*(CpC-CpCr2); %Reacción 4
H5=h50+(CpH-CpHr2)+(CpI-CpIr2)+(CpJ-CpJr2)+(CpE-CpEr2)-(CpD-CpDr2)-2*(CpC-CpCr2); %Reacción 5
H6=h60+(CpH-CpHr2)+(CpJ-CpJr2)+(CpE-CpEr2)-(CpG-CpGr2)-1.5*(CpC-CpCr2); %Reacción 6
```

%Calor producido por la reacción (W)

```
Qcalor=(nK0*(CpK-CpKr)+nI0*(CpI-CpIr)+nF0*(CpC-CpCr)+nH0*(CpH-CpHr)+nA0*(CpA-CpAr)+nB0*(CpB-CpBr)+nJ0*(CpJ-CpJr)+nF0*(CpF-CpFr)+nD0*(CpD-CpDr)+nG0*(CpG-CpGr)+nE0*(CpE-CpEr))+nA0*(H1*0.8873+H2*0.0510+H3*0.0896)+H4*0.0510*nA0+H5*0.5819*0.8873*nA0+H6*0.325*0.0510*nA0;
```

%Ecuaciones

```
yp=zeros(27,1);
yp(1)=-kg*a*(y(1)-y(2))/((u - umf*(1-eb)));
```

11. Manual de cálculos

```

yp(2)=(kg*a*(y(1)-y(2))+(1-eb)*(1-emf)*densp*rA)/(umf*(1-eb));
yp(3)=-kg*a*(y(3)-y(4))/((u - umf*(1-eb)));
yp(4)=(kg*a*(y(3)-y(4))+(1-eb)*(1-emf)*densp*rB)/(umf*(1-eb));
yp(5)=-kg*a*(y(5)-y(6))/((u - umf*(1-eb)));
yp(6)=(kg*a*(y(5)-y(6))+(1-eb)*(1-emf)*densp*rJ)/(umf*(1-eb));
yp(7)=-kg*a*(y(7)-y(8))/((u - umf*(1-eb)));
yp(8)=(kg*a*(y(7)-y(8))+(1-eb)*(1-emf)*densp*rF)/(umf*(1-eb));
yp(9)=-kg*a*(y(9)-y(10))/((u - umf*(1-eb)));
yp(10)=(kg*a*(y(9)-y(10))+(1-eb)*(1-emf)*densp*rD)/(umf*(1-eb));
yp(11)=-kg*a*(y(11)-y(12))/((u - umf*(1-eb)));
yp(12)=(kg*a*(y(11)-y(12))+(1-eb)*(1-emf)*densp*rG)/(umf*(1-eb));
yp(13)=-kg*a*(y(13)-y(14))/((u - umf*(1-eb)));
yp(14)=(kg*a*(y(13)-y(14))+(1-eb)*(1-emf)*densp*rE)/(umf*(1-eb));
yp(15)=-kg*a*(y(15)-y(16))/((u - umf*(1-eb)));
yp(16)=(kg*a*(y(15)-y(16))+(1-eb)*(1-emf)*densp*rI)/(umf*(1-eb));
if y(17)*Q*3600>0
yp(17)=-kg*a*(y(17)-y(18))/((u - umf*(1-eb)));
else
yp(17)=0;
end
if y(18)*Q*3600>0
yp(18)=(kg*a*(y(17)-y(18))+(1-eb)*(1-emf)*densp*rC)/(umf*(1-eb));
else
yp(18)=0;
end
yp(19)=-kg*a*(y(19)-y(20))/((u - umf*(1-eb)));
yp(20)=(kg*a*(y(19)-y(20))+(1-eb)*(1-emf)*densp*rH)/(umf*(1-eb));
if t<1
yp(21)=(2*eb/(9*pi))^1/3-y(21)/(3*lamb*u);
else
yp(21)=0;
end
yp(22)=k1*AT*(1-y(22))/Q;
yp(23)=k2*AT*(1-y(23))/Q;
yp(24)=k3*AT*(1-y(24))/Q;
yp(25)=k4*AT*(1-y(25))/Q;
yp(26)=k5*AT*(1-y(26))/Q;
yp(27)=k6*AT*(1-y(27))/Q;
end
Qcalor
end

```

11.1.2.6. Resultados

Ejecutando el *script* del apartado anterior se obtienen las figuras 11.1.2.1-11.1.2.4, que representan la variación de las concentraciones en la fase burbuja, las concentraciones en la fase de suspensión, el diámetro de burbuja y la extensión de reacción respecto a la altura, respectivamente.

Planta de producción de Acrilonitrilo

11. Manual de cálculos

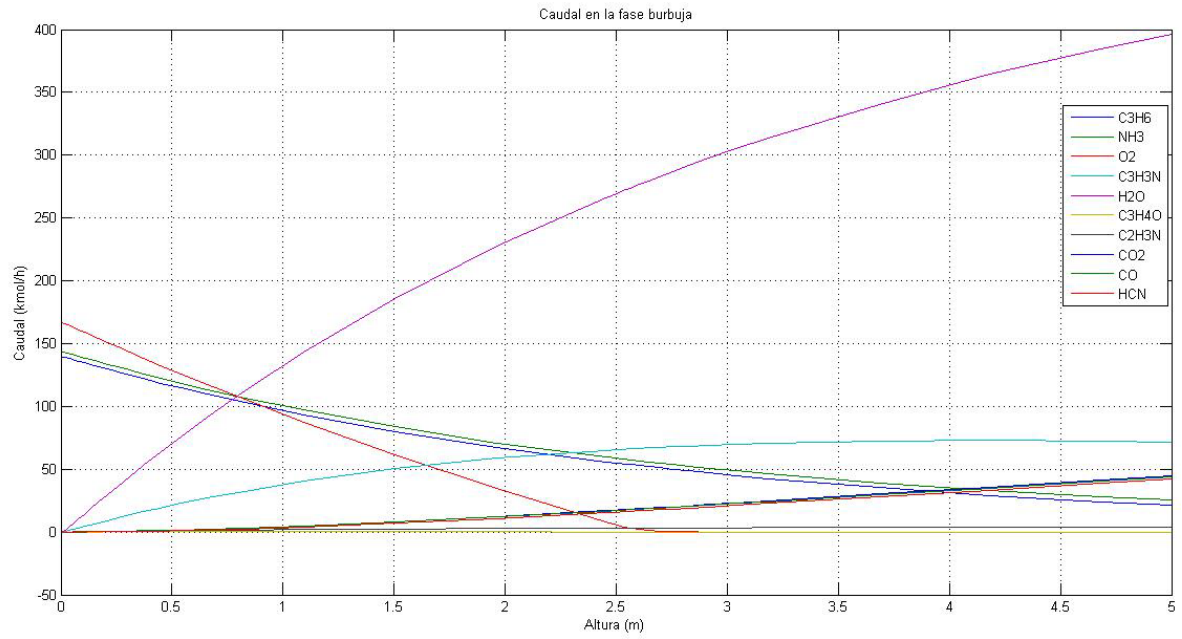


Figura 11.1.2.1. Perfil de caudales en la fase burbuja a lo largo del reactor.

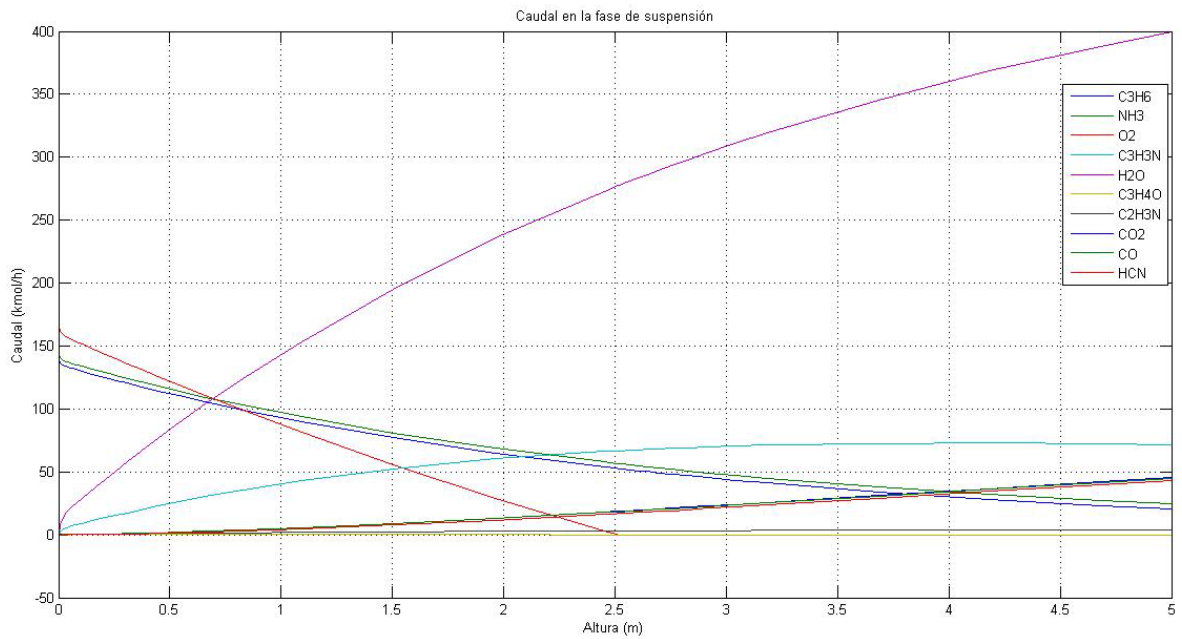


Figura 11.1.2.2. Perfil de caudales en la fase de suspensión a lo largo del reactor.

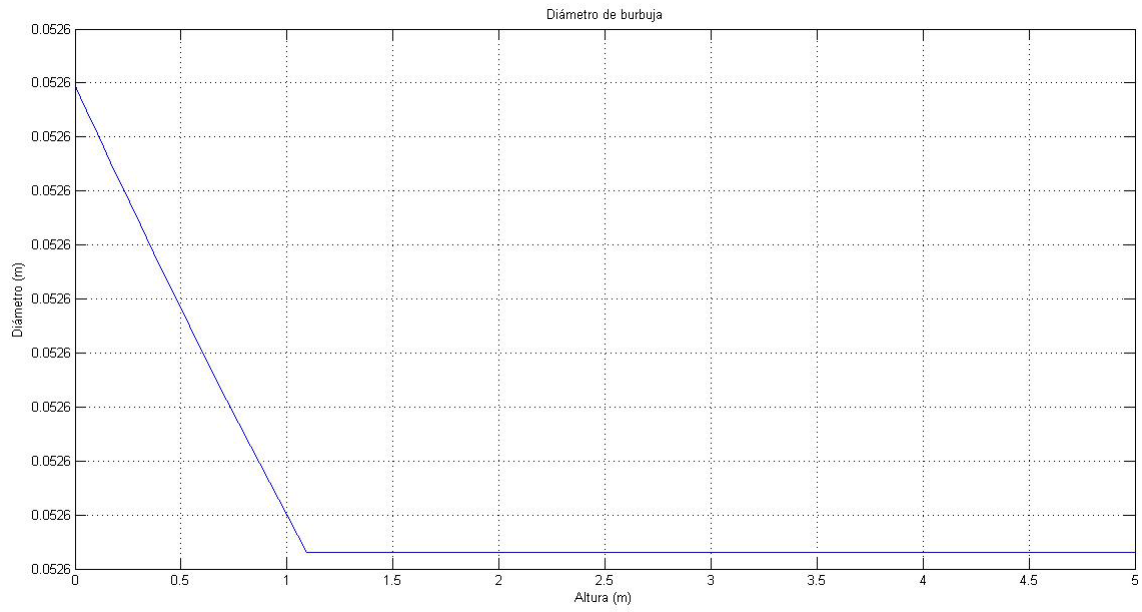


Figura 11.1.2.3. Evolución del diámetro de burbuja a lo largo del reactor.

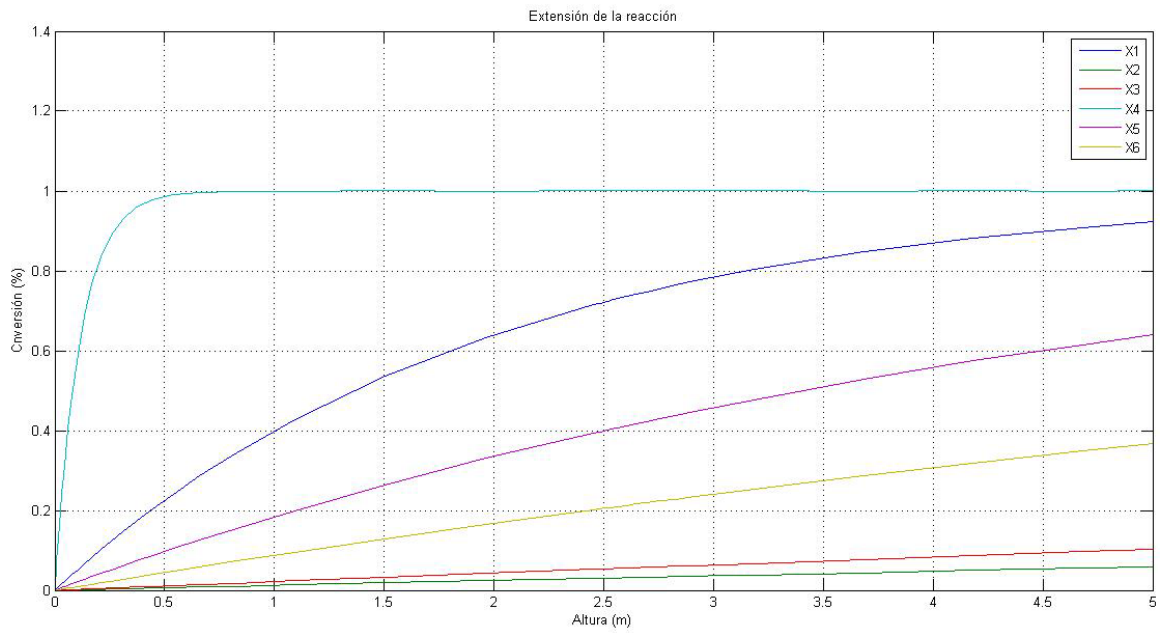


Figura 11.1.2.4. Evolución de la extensión de las reacciones a lo largo del reactor.

11.1.3. Diseño del intercambiador de calor

Como ya se ha comentado en la introducción de este apartado, la gran cantidad de calor que se genera en la reacción implica que se requiera de un sofisticado sistema de refrigeración para poder mantener la temperatura de reacción a 470°C. Éste es el motivo principal por el cual se ha decidido utilizar dos reactores operando en paralelo.

Para dimensionar el intercambiador de calor del reactor se ha utilizado el método de Kern, que consisten en calcular los parámetros básicos de un bescanviador tipo carcasa y tubos a partir de un procedimiento iterativo. En este apartado sólo se mostrarán los resultados de la última iteración considerada.

Para poder aplicar el método, se ha considerado que el fluido que va por tubos es el agua de refrigeración, mientras que el gas que contiene los reactivos y productos de la reacción circula por la carcasa de esta especie de intercambiador de carcasa y tubos.

Los valores de diseño obtenidos al aplicar el método, así como su correspondiente nomenclatura, se encuentran recogidos en la tabla 11.1.3.1.

Tabla 11.1.3.1. Características del bescanviador de calor del reactor.

Parámetro	Nomenclatura	Valor
Diámetro externo tubos (cm)	DE	5.00
Diámetro interno tubos (cm)	DI	4.36
Grosor tubos (mm)	Δx	3.20
Longitud tubos (m)	L	5.00
Pitch (cm)	Pitch	6.52
Número de tubos	Nt	267
Superficie de intercambio de calor (m ²)	A	209.7
Superficie de intercambio de calor de un tubo (m ²)	A _t	0.785

Las condiciones de operación de los fluidos de carcasa y tubos en el intercambiador son la que se muestran en la tabla 11.1.3.2.

Tabla 11.1.3.2. Condiciones de operación en el intercambiador del reactor.

Parámetro	Nomenclatura	Valor
Temperatura de entrada de carcasa (K)	T1	743
Temperatura de entrada de carcasa (K)	T2	743
Temperatura de entrada de tubos (K)	t1	495
Temperatura de salida de tubos (K)	t2	633
Presión carcasa (bar)	P _s	2
Presión tubos (bar)	P _t	30
Temperatura ebullición agua tubos (K)	t _{eb}	507
Caudal másico de carcasa (kg/s)	m _s	7.86
Caudal másico de tubos (kg/s)	m _t	9.52

Planta de producción de Acrilonitrilo

11. Manual de cálculos

Las propiedades físicas utilizadas para el diseño del intercambiador de calor se encuentran resumidas en la tabla 11.1.3.3.

Tabla 11.1.3.3. Propiedades físicas utilizadas para el diseño del intercambiador de calor.

Parámetro	Nomenclatura	Valor
Conductividad térmica del gas ($\frac{W}{m \cdot K}$)	k_g	0.0551
Densidad de las partículas de catalizador (kg/m^3)	ρ_p	1100
Densidad del gas (kg/m^3)	ρ_g	0.8654
Densidad del agua líquida (kg/m^3)	ρ_L	832.4
Densidad del vapor de agua (kg/m^3)	ρ_v	13.84
Viscosidad del gas (Pa·s)	μ_g	$2.79 \cdot 10^{-5}$
Viscosidad cinemática del gas (m^2/s)	ν_g	$3.22 \cdot 10^{-5}$
Capacidad calorífica de las partículas de catalizador ($\frac{J}{kg \cdot K}$)	C_{pP}	1200
Capacidad calorífica del gas ($\frac{J}{kg \cdot K}$)	C_{pg}	1642
Capacidad calorífica del agua líquida ($\frac{J}{kg \cdot K}$)	C_{pL}	4644
Capacidad calorífica del vapor de agua ($\frac{J}{kg \cdot K}$)	C_{pv}	2198
Calor latente de vaporización del agua (J/kg)	λ_v	$2.26 \cdot 10^6$
Presión crítica del agua (bar)	P_c	19.02

El primer paso es calcular el coeficiente global de transferencia de energía a partir de los coeficientes individuales. Los resultados obtenidos se encuentran recogidos en la tabla 11.1.3.4.

Tabla 11.1.3.4. Coeficientes de transferencia de energía en el reactor.

Parámetro	Nomenclatura	Valor
Coeficiente individual de transferencia de energía exterior ($\frac{W}{m^2 \cdot K}$)	h_{ext}	1065
Coeficiente individual de transferencia de energía interior ($\frac{W}{m^2 \cdot K}$)	h_{int}	2034
Coeficiente global de transferencia de energía ($\frac{W}{m^2 \cdot K}$)	U	699

Toda la nomenclatura utilizada en este apartado, así como los valores de los parámetros más importantes, que no aparecen en las tablas anteriores se puede consultar en las tablas del apartado 11.1.2.

El coeficiente individual de la parte exterior, es decir, el correspondiente al intercambio de energía entre el gas de reacción y la pared de los tubos de refrigeración, se calcula a partir de la ecuación 11.1.3.1.

$$h_{ext} = \frac{k_g}{d_p} 0.74 A_r^{0.1} \cdot \left(\frac{\rho_p}{\rho_g}\right)^{0.14} \left(\frac{C_{pP}}{C_{pg}}\right)^{0.24} (1 - \varepsilon)^{0.67} + 0.46 (Re_p Pr_p) \frac{(1 - \varepsilon)^{0.67}}{\varepsilon}$$

Ecuación 11.1.3.1

11. Manual de cálculos

Ésta depende de los números adimensionales de Reynolds de partícula (Re_p), Prandtl (Pr_p) de partícula y Arquímedes (Ar), que se calculan con las ecuaciones 11.1.3.2, 11.1.3.3 y 11.1.3.4, respectivamente.

$$Re_p = \frac{d_p \rho_g u}{\mu_g} \quad \text{Ecuación 11.1.3.2}$$

$$Pr_p = \frac{C_p \mu_g}{k_g} \quad \text{Ecuación 11.1.3.3}$$

$$Ar = \frac{g d_p^3 (\rho_p - \rho_g)}{\rho_g \nu_g^2} \quad \text{Ecuación 11.1.3.4}$$

El coeficiente individual de transferencia de energía correspondiente al intercambio entre el agua de refrigeración, se calcula con la correlación representada por la ecuación 11.1.3.5, que está indicada para fluidos que cambian de fase.

$$h_{int} = 3.75 \cdot 10^{-5} P_{crítica}^{0.69} \left(\frac{Q_c}{A} \right)^{0.7} \left(1.8 \left(\frac{P}{P_{crítica}} \right)^{0.17} + 4 \left(\frac{P}{P_{crítica}} \right)^{1.2} + 10 \left(\frac{P}{P_{crítica}} \right)^{10} \right)$$

Ecuación 11.1.3.5

Donde Q_c es el valor el calor que se debe intercambiar para mantener la temperatura en el reactor constante y ha sido calculado en el apartado 11.1.2.4, obteniendo un valor de $2.21 \cdot 10^7$ W.

El cálculo del coeficiente global de transferencia de energía se hará como una suma de resistencias, que se encuentra reflejada en la ecuación 11.1.3.6.

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_{ext}} + \frac{1}{h_{int}} \quad \text{Ecuación 11.1.3.6}$$

Con este valor yase puede pasar a aplicar el método de Kern, calculando en primer lugar el caudal másico de agua que circulará por tubos a partir de la ecuación 11.1.3.7.

$$Q_c = m_t C_{pL} (t_{eb} - t_1) + m_t \lambda + m_t C_{pV} (t_2 - t_{eb})$$

Ecuación 11.1.3.7

Para aprovechar al máximo el intercambio de calor, el agua de refrigeración circulara en contracorriente respecto a los gases de reacción. Así, se puede calcular una temperatura media logarítmica en el intercambiador según la ecuación 11.1.3.8.

$$DTML = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln\left(\frac{T_1 - t_2}{T_2 - t_1}\right)} \quad \text{Ecuación 11.1.3.8}$$

Con estos datos ya se puede calcular la superficie requerida para intercambiar el calor a partir de la ecuación 11.1.3.9.

$$A = \frac{Q_c}{DTML \cdot U} \quad \text{Ecuación 11.1.3.9}$$

Si se analizan 11.1.3.5, 11.1.3.6 y 11.1.3.9 se puede comprobar que para resolverlas es necesario utilizar un método iterativo, ya que A es función de U i viceversa.

A continuación se supone un valor de diámetro externo y grosor de los tubos y con ello se calcula su diámetro interno. También se selecciona en este paso la longitud de los tubos, que en este caso pasarán a través de toda la zona de reacción, con lo que su longitud será de 5m (ver apartado 11.1.5 más adelante).

Con esta información se puede calcular el pitch (o distancia entre tubos), que se estima como 1.25 veces el diámetro externo de los tubos.

El área de un tubo se calcula mediante la ecuación 11.1.3.10 i a continuación el número de tubos con la ecuación 11.1.3.11.

$$A_t = \pi \cdot DE \cdot L \quad \text{Ecuación 11.1.3.10}$$

$$N_t = \frac{A}{A_t} \quad \text{Ecuación 11.1.3.11}$$

11.1.4. Diseño de la zona de reacción

Para calcular las dimensiones de la zona donde tendrá lugar la reacción se debe tener en cuenta el volumen de reacción necesario para obtener la conversión deseada, el volumen que ocupa el catalizador y el volumen de los tubos del intercambiador de calor.

Los valores de diseño que se han obtenido se reflejan en la tabla 11.1.4.1.

Tabla 11.1.4.1. Coeficientes de transferencia de energía en el reactor.

Parámetro	Nomenclatura	Valor
Diámetro de la zona de reacción (m)	D	4.2
Altura de la zona de reacción (m)	H _{reacción}	5
Sección donde tiene lugar la reacción (m ²)	A _{reacción}	4.91

Teniendo en cuenta esto, el volumen total de la zona de reacción se puede expresar con la ecuación 11.1.4.1.

$$V_{reactor} = V_{reaccion} + V_{catalizador} + V_{tubos} \quad \text{Ecuación 11.1.4.1}$$

La ecuación se puede reescribir como la ecuación 11.1.4.2, que nos permitirá conocer el diámetro del reactor.

$$\frac{\pi}{4} D^2 = A_{reaccion} \cdot H_{reaccion} + \frac{M_{cat}}{\rho_p} + \frac{\pi}{4} D E^2 L \quad \text{Ecuación 11.1.4.2}$$

Para más información sobre la nomenclatura utilizada referirse a los apartados 11.1.2 y 11.1.3.

11.1.5. Diseño de los ciclones y de la zona de recuperación

Para recuperar las partículas de catalizador que escapan la zona de reacción arrastrados por los gases de salida se utilizan dos ciclones conectados en series para mejorar su eficiencia. Éstos se encuentran situados dentro del mismo reactor, en la denominada zona de recuperación encima de la zona de reacción para minimizar al máximo el volumen total del reactor.

El diseño de los ciclones se hace buscando maximizar la eficiencia de recuperación de partículas de catalizador (que serán devueltas a la zona de reacción) minimizando las pérdidas de carga, que pueden ocasionar daños estructurales en el ciclón si son muy elevadas.

Los valores finales de diseños de los dos ciclones, así como la nomenclatura que se seguirá en este apartado, se presentan a continuación en la tabla 11.1.5.1. Todos los parámetros que aparecen van relacionados con la figura 11.1.5.1.

Tabla 11.1.5.1. Parámetros de diseño de los ciclones.

Parámetro	Nomenclatura	Valor ciclón 1	Valor ciclón 2
Diámetro (m)	$D_{\text{ciclón}}$	1	1.1
a (m)	a	0.58	0.64
b (m)	b	0.21	0.23
S (m)	S	0.58	0.64
De (m)	De	0.50	0.55
h (m)	h	1.33	1.47
H (m)	H	3.17	3.49
B (m)	B	0.5	0.55
Exponente del vórtex	n	0.56	0.58
K	K	34.7	34.7
φ	φ	7.76	7.76

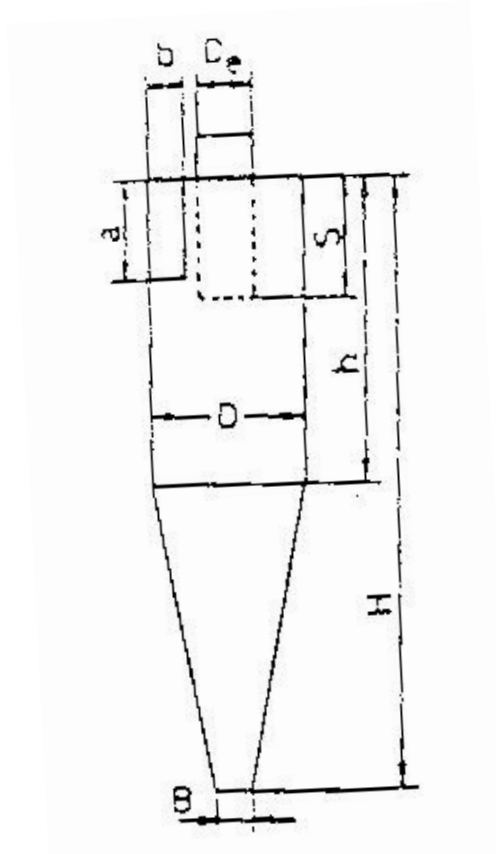


Figura 11.1.5.1. Esquema de los ciclones utilizados en el reactor.

Los parámetros de diseño de la zona de recuperación se presentan en la tabla 11.1.5.2 a continuación.

Tabla 11.1.5.2. Parámetros de diseño de la zona de recuperación.

Parámetro	Nomenclatura	Valor
Diámetro de la zona de recuperación (m)	D_{rec}	2.5
Altura de la zona de recuperación (m)	h_{rec}	8
Volumen de la zona de recuperación (m^3)	V_{rec}	39.27

Las condiciones de operación y las propiedades físicas utilizadas para el diseño se encuentran resumidas en la tabla 11.1.5.3.

Tabla 11.1.5.3. Condiciones de operación de los ciclones y propiedades físicas utilizadas.

Parámetro	Nomenclatura	Valor
Masa de catalizador en la zona de reacción (kg)	M_{cat}	$4.53 \cdot 10^4$
Masa de catalizador en la zona de recuperación (kg)	M_{rec}	$4.53 \cdot 10^2$
Masa de catalizador entrada ciclón 2 (kg)	M_2	4.78
Masa de catalizador salida ciclón 2 (kg)	M_3	0.0811
Densidad de las partículas de catalizador (kg/m^3)	ρ_p	1100
Densidad del gas a 743K (kg/m^3)	ρ_F	0.876
Viscosidad del gas a 743K (Pa·s)	μ_F	$2.78 \cdot 10^{-5}$
Diámetro de las partículas de catalizador (m)	d_p	$7 \cdot 10^{-5}$
Velocidad de las partículas de catalizador (m/s)	u	0.7951
Velocidad de las partículas a la entrada del ciclón 1 (m/s)	u_1	32.19
Velocidad de las partículas a la entrada del ciclón 2 (m/s)	u_2	26.60
Concentración de partículas entrada ciclón 1 (g/m^3)	c_1	11534
Concentración de partículas ciclón 2 (g/m^3)	c_2	121.61
Caudal volumétrico ciclón	$Q_{ciclón}$	3.90
Temperatura (K)	T_r	743

La tabla 11.1.5.4 muestra las eficacias de recuperación de catalizador de cada ciclón y las pérdidas de carga que en ello se dan.

Tabla 11.1.5.4. Eficacias y pérdidas de carga de los ciclones.

Parámetro	Nomenclatura	Valor ciclón 1	Valor ciclón 2
Eficacia (%)	η_c	98.95	98.90
Pérdida de carga (Pa)	ΔP_c	1526	2120

Para realizar el diseño, se ha supuesto que el 1% de las partículas de catalizador que participan en la reacción se escapa con los gases de salida hacia la zona de recuperación. Así, la concentración de partículas a la entrada del primer ciclón se calcula a partir de la ecuación 11.1.5.1.

$$c_1 = \frac{M_{rec}}{V_{rec}} = \frac{0.01M}{\frac{\pi}{4} D_{rec}^2 v_{rec}} \quad \text{Ecuación 11.1.5.1}$$

El caudal volumétrico a la entrada de cada ciclón se ha considerado constante y se ha calculado con la ecuación 11.1.5.2.

11. Manual de cálculos

$$Q_{\text{ciclón}} = u \cdot \frac{\pi}{4} D_{\text{rec}}^2 \quad \text{Ecuación 11.1.5.2}$$

Para calcular la eficiencia de los ciclones es necesario calcular un parámetro conocido como exponente del vórtex con la ecuación 11.1.5.3.

$$n = 1 - \left(1 - 0.67 D_{\text{ciclón}}^{0.14}\right) \left(\frac{T}{293}\right)^{0.3} \quad \text{Ecuación 11.1.5.3}$$

Los parámetros de diseño que aparecen en la tabla 11.1.5.1 corresponden a los de un ciclón tipo Peterson y se han calculado a partir de la tabla 11.1.5.5.

Tabla 11.1.5.5. Datos para el dimensionamiento de los ciclones.

	Alta eficacia		Uso general			
	Stairmand (3)	Swift (4)	Lapple (5)	Swift (4)	Peterson (6)	Zenz (7)
D	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
a/D	0,5	0,44	0,5	0,5	0,583	0,5
b/D	0,2	0,21	0,25	0,25	0,208	0,25
s/D	0,5	0,5	0,625	0,6	0,583	0,75
D _e /D	0,5	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5
h/D	1,5	1,4	2,0	1,75	1,333	2,0
H/D	4,0	3,9	4,0	3,75	3,17	4,0
B/D	0,375	0,4	0,25	0,4	0,5	0,25
ν	3	3,2	4	3,5	2,3	—
k	0,659	0,674	0,729	0,729	0,671	0,729
K	551	699	403	382	342	347

La velocidad del gas a la entrada de los ciclones se calcula a partir de la ecuación 11.1.5.4.

$$u_i = \frac{Q_{\text{ciclón}}}{a \cdot b} \quad \text{Ecuación 11.1.5.4}$$

Donde *i* se refiere al ciclón 1 ó 2.

La eficacia de cada ciclón se ha calculado con la ecuación 11.1.5.5.

$$\eta = 1 - \exp\left(-2 \left(\frac{(1+n) \cdot Q \cdot K}{D_{\text{ciclón}}^3} \cdot \frac{\rho_p \cdot d_p^2}{18\mu}\right)^{\frac{0.5}{n+1}}\right) \quad \text{Ecuación 11.1.5.5}$$

Donde K es un parámetro extraído de la tabla 11.1.5.5.

Este valor de eficacia, sin embargo, no tiene en cuenta la interacción entre las diferentes partículas ya que considera que solamente entra una partícula al ciclón. Para obtener el valor de eficacia corregida (η_c) se utiliza la figura 11.1.5.2.

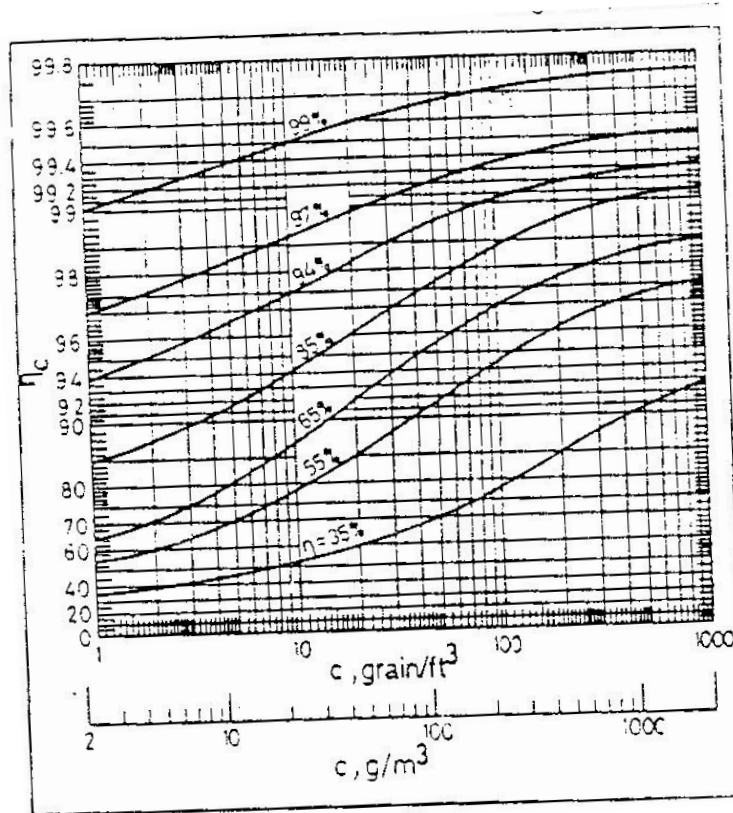


Figura 11.1.5.1. Gráfico para corregir el valor de eficacia en los ciclones.

Para el cálculo de las pérdidas de carga se ha utilizado la ecuación 11.1.5.6.

$$\Delta P = \varphi \cdot \rho \cdot \frac{u_i^2}{2} \quad \text{Ecuación 11.1.5.6}$$

Donde i hace referencia al ciclón 1 ó 2 y el parámetro φ se calcula con la ecuación 11.1.5.7.

$$\varphi = 16 \frac{a \cdot b}{De^2} \quad \text{Ecuación 11.1.5.7}$$

Este valor de pérdida de carga también debe ser corregido para tener en cuenta la interacción entre partículas. Para ello se utiliza la ecuación 11.1.5.8.

11. Manual de cálculos

$$\Delta P_c = \frac{\Delta P}{1 + 0.0086\sqrt{c}} \quad \text{Ecuación 11.1.5.8}$$

Se debe tener en cuenta que para un buen funcionamiento de los ciclones el valor de ΔP_c no debe sobrepasar los 2450Pa.

Para calcular la masa y concentración de partículas que deberá tratar el segundo ciclón se han utilizados las ecuaciones 11.1.5.9 y 11.1.5.10, respectivamente.

$$M_2 = M_{rec}(1 - \eta_2) \quad \text{Ecuación 11.1.5.9}$$

$$c_2 = c_1(1 - \eta_2) \quad \text{Ecuación 11.1.5.10}$$

11.1.6. Diseño mecánico del reactor

En este apartado se explicará el calculo del espesor de pared tanto del cuerpo como de los cabezales de los reactores R-301 y R-302, que són exactamente iguales. La nomenclatura que se seguirá se encuentra resumida en la tabla 11.1.6.1, que muestra los principales parámetros de diseño que se requieran para realizar el diseño mecánico. Éste se deberá realizar tanto para la zona de reacción como para la de recuperación, ya que las condiciones en ellas no són iguales.

Tabla 11.1.6.1. Características y condiciones de operación del reactor.

Zona de reacción		
Diámetro interno (m)	D	4.2
Radio interno (m)	R	2.1
Altura (m)	H	5
Presión de operación (bar)	P_{op}	2
Presión de diseño (bar)	P	2.3
Temperatura de operación (°F)	$T_{m\acute{a}x}$	950
Zona de recuperación		
Diámetro (m)	D	3.5
Radio interno (m)	R	1.75
Altura (m)	H	10
Presión de operación (bar)	P_{op}	2
Presión de diseño (bar)	P	2.3
Temperatura de operación (°F)	$T_{m\acute{a}x}$	950

La tabla 11.1.6.2 recoge los demás parámetros necesarios para el cálculo del espesor de pared, así como la nomenclatura que se seguirá en las ecuaciones utilizadas a continuación.

Tabla 11.2.6.2. Parámetros para el cálculo del espesor de pared del reactor.

Zona de reacción		
Módulo de tensión del material (bar)	S	1062
Eficacia de la unión	E	0.85
Sobreespesor de corrosión (mm)	C ₁	0.75
Tolerancia de fabricación (mm)	C ₂	1
Factor M	M	1.54
Zona de recuperación		
Módulo de tensión del material (bar)	S	1062
Eficacia de la unión	E	0.85
Sobreespesor de corrosión (mm)	C ₁	0.75
Tolerancia de fabricación (mm)	C ₂	0.85
Factor M	M	1.54

Para conocer el espesor de pared del cuerpo del reactor se ha aplicado la ecuación 11.1.6.1, que es válida para cuerpos cilíndricos.

$$t_{cuerpo} = \frac{PR}{SE + 0.4P} + C_1 \quad \text{Ecuación 11.1.6.1}$$

Para el cabezal, se debe aplicar la ecuación 11.1.6.2, que es válida para cabezales toriesféricos. Cabe destacar que, como el fondo es del mismo tipo que el cabezal, todas las ecuaciones referentes al segundo són igualmente aplicables al primero.

$$t_{cabezal} = \frac{PDM}{2SE - 0.2P} + C_1 + C_2 \quad \text{Ecuación 11.1.6.2}$$

Otro parámetro importante a conocer es la máxima presión de trabajo permitida. Ésta se calcula según la ecuación 11.1.6.3 para el cuerpo y la ecuación 11.1.6.4 para el cabezal del reactor.

$$P_{m\acute{a}x,cuerpo} = \frac{SEt_{cuerpo}}{R - 0.4t} \quad \text{Ecuación 11.1.6.3}$$

$$P_{m\acute{a}x,cabezal} = \frac{2SEt_{cuerpo}}{DM - 0.4t} \quad \text{Ecuación 11.1.6.4}$$

El módulo de tensión del material es función del tipo de materia y de la máxima temperatura de operación y se determina a partir de la tabla 11.1.6.3.

Planta de producción de Acrilonitrilo

11. Manual de cálculos

Tabla 11.1.6.3. Módulos de tensión para diferentes materiales en función de la temperatura de operación.

Specification		MAXIMUM ALLOWABLE STRESS VALUES IN TENSION FOR HIGH-ALLOY STEEL (CAUTION: See UW-12 for vessels constructed under part UW) Maximum Allowable Stress, ksi (Multiply by 1000 to Obtain psi), for Metal Temp., °F, Not Exceeding												
Number	Grade	-20 to 100	200	300	400	500	600	650	700	750	800	850	900	950
SA-240	304	18,8	17,8	16,6	16,2	15,9	15,9	15,9	15,9	15,5	15,2	14,9	14,7	14,4
SA-240	304L	15,7	15,7	15,3	14,7	14,4	14	13,7	13,5	13,3	13	---	---	---
SA-240	316	18,8	18,8	18,4	18,1	18,0	17,0	16,7	16,3	16,1	15,9	15,7	15,5	15,4
SA-240	316L	15,7	15,7	15,7	15,5	14,4	13,5	13,2	12,9	12,6	12,4	12,1	---	---

En nuestro caso, se ha elegido un acero SA-240 de grado 316.

La eficacia de unión depende del tipo de soldadura y el radiografiado que se ha llevado a cabo a la hora de fabricar el equipo y se ha determinado a partir de la tabla 11.1.6.4.

Tabla 11.1.6.3. Eficacia de unión en función de la soldadura y el radiografiado.

	Radiografiado total	Radiografiado parcial	Sin radiografiado
Soldadura simple	1	0.85	0.7
Soldadura doble	0.9	0.8	0.65

El sobreespesor de corrosión se calcula en base a la degradación que sufre la chapa metálica a lo largo del tiempo debido a la corrosión según la ecuación 11.1.6.5.

$$C_1 = 0.05 \frac{mm}{año} \cdot 15 \text{ años de vida útil} = 0.75 \text{ mm}$$

Ecuación 11.2.4.5

La tolerancia de fabricación (C_2) tiene en cuenta las posibles desviaciones entre el valor teórico que debe tener el espesor de pared y el que finalmente tiene a causa de posibles defectos en la fabricación. Se calcula como un 10% del espesor de pared teórico calculado.

El factor M depende del tipo de cabezal que se esté utilizando y se determina a partir de la tabla 11.1.6.4 con el valor obtenido en la ecuación 11.1.6.8, válido para un cabezal tipo Klopper.

$$L = D \quad \text{Ecuación 11.2.4.6}$$

$$r = 0.1D \quad \text{Ecuación 11.2.4.7}$$

$$\frac{L}{r} = \frac{D}{0.1D} = 10 \quad \text{Ecuación 11.2.4.8}$$

Tabla 11.1.6.3. Factor M para diferentes valores de L/r.

VALUES OF FACTOR "M"																	
L/r	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50	2.75	3.00	3.25	3.50	4.00	4.50	5.00	5.50	6.00	6.50
M	1.00	1.03	1.06	1.08	1.10	1.13	1.15	1.17	1.18	1.20	1.22	1.25	1.28	1.31	1.34	1.36	1.39
L/r	7.00	7.50	8.00	8.50	9.00	9.50	10.0	10.5	11.0	11.5	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	16.3	*
M	1.41	1.44	1.46	1.48	1.50	1.52	1.54	1.56	1.58	1.60	1.62	1.65	1.69	1.72	1.75	1.77	
* THE MAXIMUM ALLOWED RATIO : L = D + 2t (see note 2 on facing page)																	

De esta forma se han obtenido los resultados resumidos en la tabla 11.2.3.4 para las dos zonas del reactor.

Tabla 11.1.6.4. Grosos de pared y presiones máximas para las torres de destilación.

Zona de reacción		
Grosor de pared del cuerpo (mm)	t_{cuerpo}	7
Grosor de pared del cabezal (mm)	t_{fondo}	10
Presión máxima en el cuerpo (bar)	$P_{\text{máx,cuerpo}}$	3.01
Presión máxima en el fondo (bar)	$P_{\text{máx,fondo}}$	2.79
Zona de recuperación		
Grosor de pared del cuerpo (mm)	t_{cuerpo}	6
Grosor de pared del cabezal (mm)	t_{cabezal}	9
Presión máxima en el cuerpo (bar)	$P_{\text{máx,cuerpo}}$	3.10
Presión máxima en el cabezal (bar)	$P_{\text{máx,cabezal}}$	3.01

11.1.7. Peso del reactor

Para conocer el peso del reactor cuando éste se encuentra vacío, cuando está lleno de agua para pruebas hidráulicas y en operación, se debe tener en cuenta el peso del cuerpo cilíndrico del reactor, el cabezal y el fondo, todo para las dos zonas de las que éste se forma.

La tabla 11.1.6.1 muestra los resultados obtenidos para las dos zonas y del equipo completo, así como la nomenclatura que se seguirá en esta apartado.

Tabla 11.1.6.1. Volumen y peso del reactor.

Zona de reacción		
Volumen del cuerpo (m ³)	V_{cuerpo}	0.463
Volumen del fondo (m ³)	V_{fondo}	0.118
Peso del cuerpo (kg)	W_{cuerpo}	3631
Peso del fondo (kg)	W_{fondo}	1851
Zona de recuperación		
Volumen del cuerpo (m ³)	V_{cuerpo}	0.252
Volumen del cabezal (m ³)	V_{cabezal}	0.019
Peso del cuerpo (kg)	W_{cuerpo}	1976
Peso del cabezal (kg)	W_{cabezal}	301

Reactor		
Volumen del equipo vacío (m ³)	V _{vacío}	1.24
Volumen de agua (m ³)	V _{agua}	146.4
Peso del equipo vacío (kg)	W _{vacío}	14319
Peso del equipo lleno de agua (kg)	W _{agua}	160742
Peso del equipo en operación (kg)	W _{operación}	14622

A continuación se va a detallar el procedimiento de cálculo de los pesos para las dos partes que forman la columna, así como del equipo al completo. Para la nomenclatura, referirse a las tablas proporcionadas en este apartado.

Cálculo del peso del cuerpo cilíndrico

El volumen del cuerpo se calcula mediante la ecuación 11.1.6.1.

$$V_{cuerpo} = \frac{\pi}{4} \left((D + 2t_{cuerpo})^2 - D^2 \right) \cdot H \quad \text{Ecuación 11.1.6.1}$$

A partir de este dato y de la densidad del material (ρ_{acero}), que para el AISI 316 es de 7850 kg/m³, se puede calcular el peso del cuerpo con la ecuación 11.1.6.2.

$$W_{cuerpo} = V_{cuerpo} \cdot \rho_{acero} \quad \text{Ecuación 11.1.6.2}$$

Cálculo del peso del cabezal y el fondo

Como el cabezal y el fondo en las columnas son del mismo tipo (toriesféricos), el cálculo de su peso también va a ser igual. Es por eso que aunque las ecuaciones proporcionadas en este sub-apartado solo hagan referencia al cabezal, son aplicables también al fondo.

Para calcular el volumen de acero del cabezal primero debe calcularse la superficie que ocupa mediante la ecuación 11.1.6.3.

$$S_{cabezal} = \frac{\pi}{2} D_p^2 + D_e(D_e - 2D_p) \quad \text{Ecuación 11.1.6.3}$$

Donde D_e y D_p se calculan con las ecuaciones 11.1.6.4 y 11.1.6.5, respectivamente.

$$D_e = D + 2t_{cabezal} \quad \text{Ecuación 11.1.6.4}$$

$$D_p = 0.2D_e \quad \text{Ecuación 11.1.6.5}$$

El volumen del cabezal se calcula con la ecuación 11.1.6.6.

$$V_{cabezal} = S_{cabezal} \cdot t_{cabezal} \quad \text{Ecuación 11.1.6.6}$$

Y el peso se calcula a partir de la densidad del material con la ecuación 11.1.6.7.

$$\text{Ecuación 11.1.6.7}$$

11. Manual de cálculos

$$W_{cabezal} = V_{cabezal} \cdot \rho_{acero}$$

Cálculo del peso del equipo

El volumen del equipo vacío se ha calculado a partir de la ecuación 11.1.6.11 para cada zona.

$$V_{vacío} = V_{cuerpo} + V_{cabezal} + V_{fondo}$$

Ecuación 11.1.6.11

La ecuación 11.1.6.12 se ha utilizado para el cálculo del peso del equipo vacío en cada zona.

$$W_{vacío} = W_{cuerpo} + W_{cabezal} + W_{fondo}$$

Ecuación 11.1.6.12

El volumen de agua que puede contener el equipo se ha calculado con la ecuación 11.1.6.13.

$$V_{agua} = \frac{\pi}{4} D^2 (H - h_{cabezal} - h_{fondo}) + V_{cabezal} + V_{fondo}$$

Ecuación 11.1.6.13

El peso del equipo lleno de agua se ha calculado a partir de la ecuación 11.1.6.14.

$$W_{agua} = W_{vacío} + V_{agua} \cdot \rho_{agua}$$

Ecuación 11.1.6.14

El peso del equipo en condiciones de operación se ha realizado con la ecuación 11.1.6.15.

$$W_{operación} = W_{vacío} + V_{agua} \cdot \rho_{operación} \quad \text{Ecuación 11.1.6.15}$$

11.2. Diseño de las torres de destilación (TD-401/403)

Las torres de destilación son los equipos principales que participan en la purificación del acrilonitrilo y en la obtención de productos secundarios generados en la reacción. En los siguientes sub-apartados se detallará el procedimiento seguido para el diseño de las columnas TD-401, TD-402 y TD-403.

En todos los casos se ha decidido optar por columnas de platos y no de relleno ya que las primeras suelen tener diámetros menores así como un peso menor, al no tener que contener ningún relleno.

Dentro de los tipos de platos, se ha decidido utilizar platos perforados debido a que son los más económicos, los más ligeros y los que ofrecen menos problemas de mantenimiento.

11.2.1. Diseño de la torre de eliminación de acetonitrilo (TD-401)

La columna TD-401 tiene como objetivo principal la eliminación del acetonitrilo de la corriente que sale del absorbedor TA-401 para recuperar una corriente más pura en acrilonitrilo.

Es una opción bastante recurrente la recuperación en esta columna de una corriente rica en acetonitrilo, que se extrae por una corriente lateral en la torre, para posteriormente venderlo como sub-producto. Sin embargo, debido a la dificultad de diseño que suponía y por cuestiones de tiempo, esta opción se ha descartado en este proyecto, aunque es importante tenerlo en cuenta como posible mejora para obtener un mayor beneficio económico en la planta.

El diseño de la columna de destilación se ha realizado con el programa Hysys, que permite, además de obtener el balance de materia en la columna, tener un dimensionamiento de la misma.

El primer paso a seguir es caracterizar la corriente que tendrá que tratar la columna, conociendo su composición, su temperatura y su presión. Esta información se puede ver en las figuras 11.2.1.1 y 11.2.1.2.

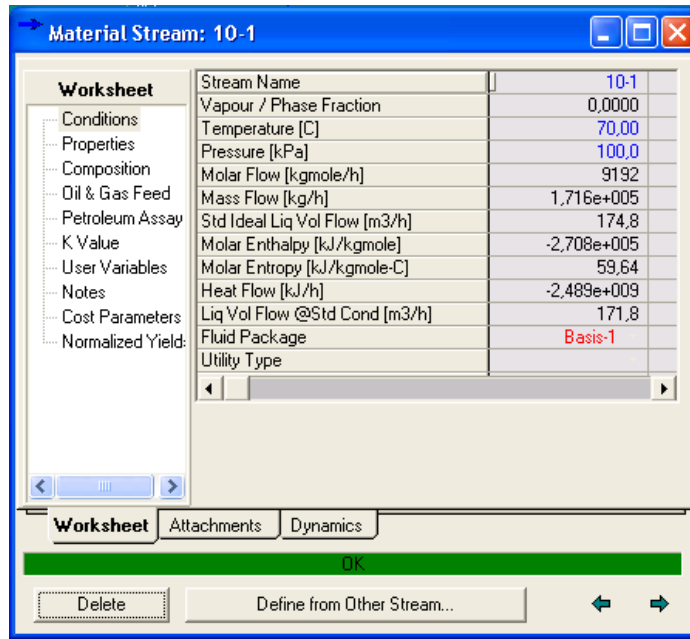


Figura 11.2.1.1. Condiciones de operación de la corriente de entrada a la columna TD-401.

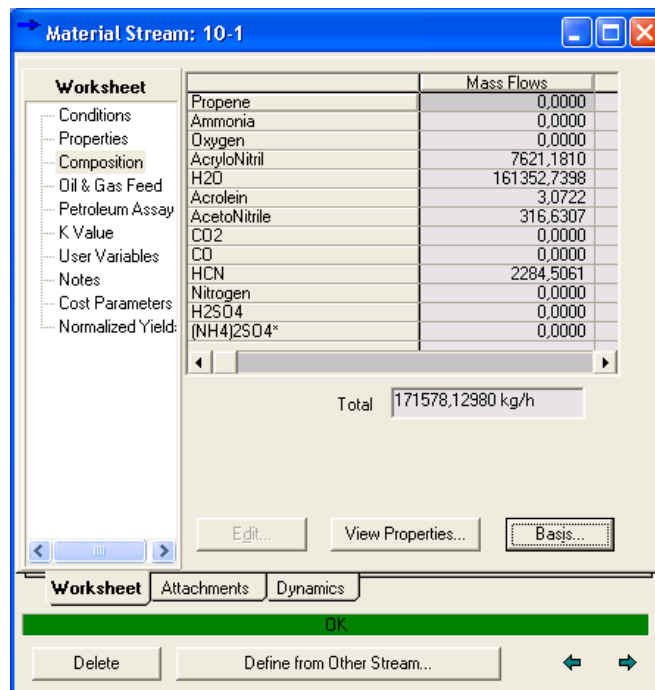


Figura 11.2.1.2. Composición de la corriente de entrada a la columna TD-401.

Seguidamente se conecta la corriente a la columna y se eligen los parámetros de operación de esta, esto es, la presión de operación del condensador y de la caldera, el número de platos y el plato por el cual va entrar el alimento. La elección de estos

parámetros se ha elegido para maximizar la extracción de acetonitrilo por el corriente de colas de la columna. Estos parámetros de diseño se ven reflejados en la figura 11.2.1.3.

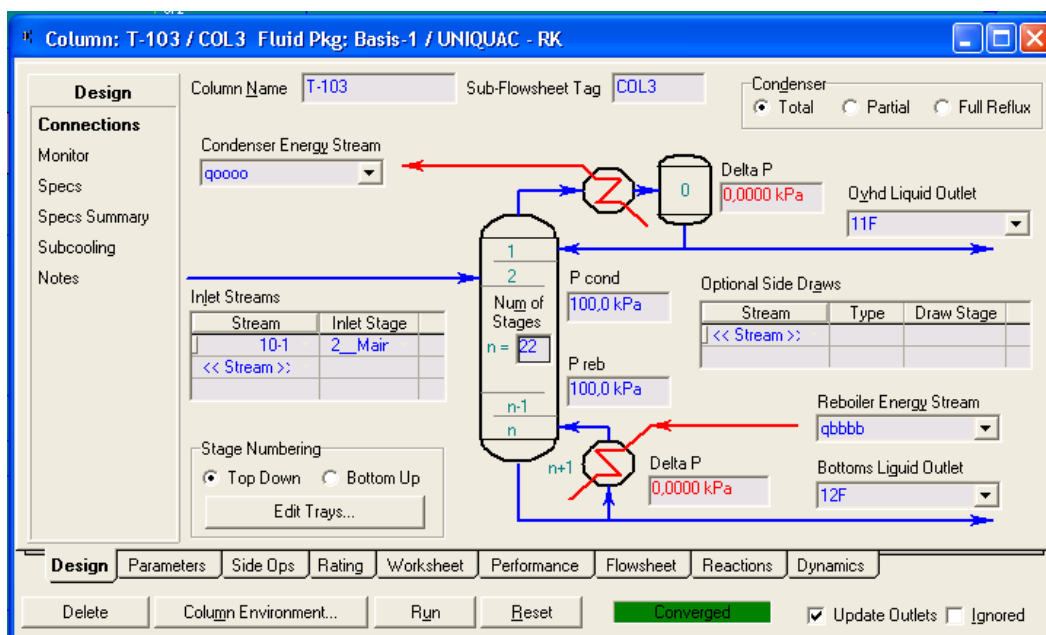


Figura 11.2.1.3. Condiciones de operación de la columna TD-401.

Como se puede apreciar, la columna tiene 22 platos, trabaja con un condensador total y el alimento entra por el segundo plato (comenzando a contar por arriba).

Con tal de satisfacer los grados de libertad que tienen los cálculos en la columna, es necesario introducir una serie de especificaciones para que el simulador sea capaz de hallar una solución para el diseño de la columna. Estas especificaciones se puede apreciar en la figura 11.2.1.4.

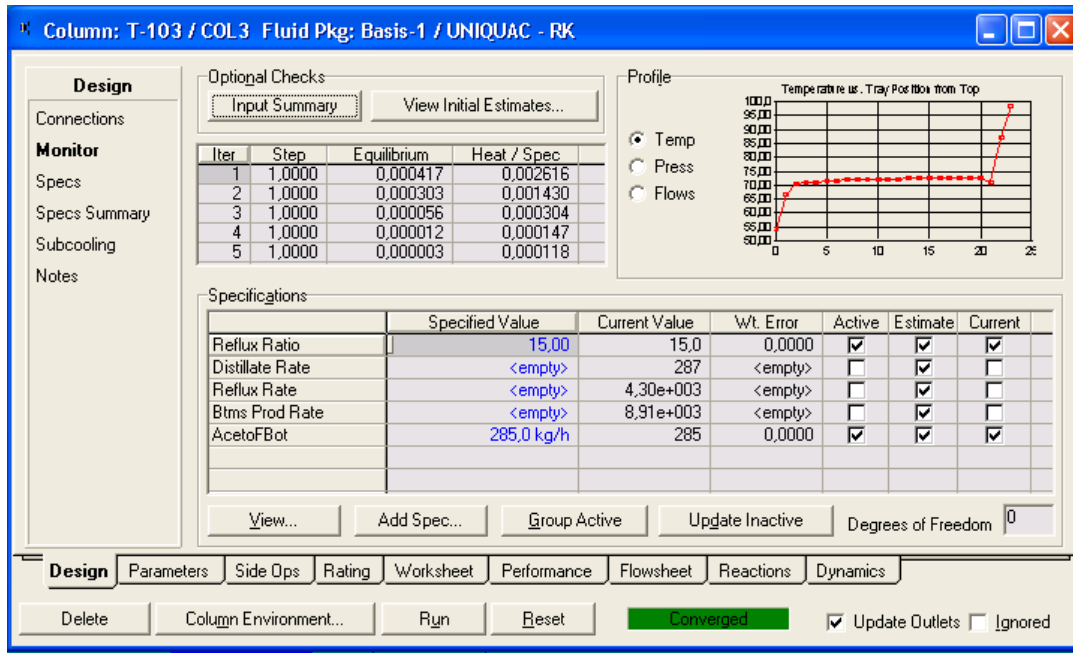


Figura 11.2.1.4. Especificaciones de la columna TD-401.

Los parámetros que se ha decidido especificar en esta columna son la relación de reflujo (con un valor de 15) y el caudal másico de acetonitrilo en la corriente de colas (285 kg/h), que debería ser lo más elevado posible ya que se está intentando maximizar la eliminación de acetonitrilo del corriente de entrada.

De esta forma, una vez el integrador que incorpora Hysys ha logrado obtener una solución para la columna, se obtienen los corriente correspondientes al destilado (corriente rico en acrilonitrilo) y el residuo (corriente con el acetonitrilo eliminado). Las características de dichos corrientes se puede observar en las figuras 11.2.1.5-11.2.1.8.

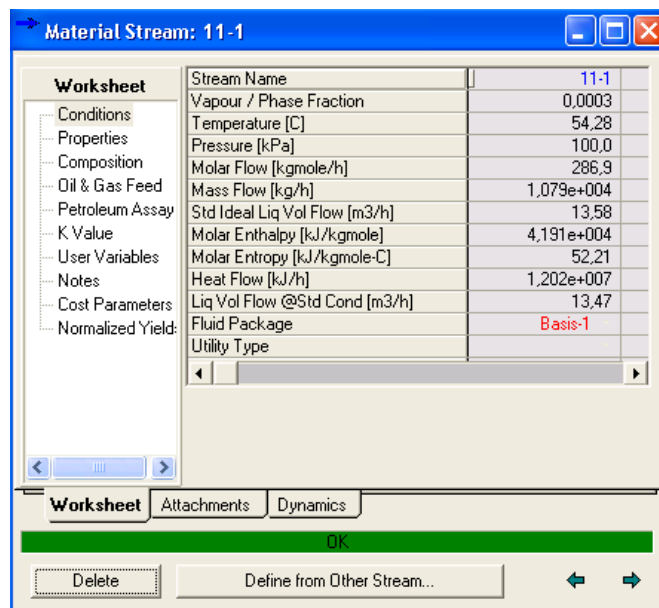


Figura 11.2.1.5. Condiciones de operación del destilado de la columna TD-401.

Worksheet		Mass Flows
Propene		0.0000
Ammonia		0.0000
Oxygen		0.0000
AcryloNitril		7327.9715
H2O		1143.0113
Acrolein		0.6144
AcetoNitrile		31.6285
CO2		0.0000
CO		0.0000
HCN		2284.5037
Nitrogen		0.0000
H2SO4		0.0000
(NH4)2SO4*		0.0000

Total: 10787.72949 kg/h

Figura 11.2.1.6. Composición del destilado de la columna TD-401.

Worksheet		
Stream Name		12-1
Vapour / Phase Fraction		0.0000
Temperature [C]		98.43
Pressure [kPa]		100.0
Molar Flow [kgmole/h]		8906
Mass Flow [kg/h]		1.608e+005
Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]		161.3
Molar Enthalpy [kJ/kgmole-C]		-2.788e+005
Molar Entropy [kJ/kgmole-C]		23.32
Heat Flow [kJ/h]		-2.483e+009
Liq Vol Flow @Std Cond [m3/h]		161.2
Fluid Package		Basis-2
Utility Type		

Figura 11.2.1.7. Condiciones de operación del residuo de la columna TD-401.

Worksheet		Mass Flows
Conditions	Propene	0,0000
Properties	Ammonia	0,0000
	Oxygen	0,0000
Composition	AcryloNitril	293,2078
Oil & Gas Feed	H2O	160209,7283
Petroleum Assay	Acrolein	2,4578
	AcetoNitrile	285,0021
K Value	CO2	0,0000
User Variables	CO	0,0000
Notes	HCN	0,0000
Cost Parameters	Nitrogen	0,0000
Normalized Yield:	H2SO4	0,0000
	(NH4)2SO4*	0,0000
Total		160790,39598 kg/h

Figura 11.2.1.8. Composición del residuo de la columna TD-401.

Como se puede apreciar, se ha conseguido recuperar por la parte del destilado un corriente con un alto porcentaje de acrilonitrilo, mientras que por el residuo se obtiene un corriente con una gran cantidad de agua y con la mayor part del acetnitrilo que entraba a la columna.

11.2.2. Diseño de la torre de recuperación de HCN (TD-402)

La corriente del destilado de la columna TD-401 se sotmete, después de ser calentada mediante un intercambiado de calor, a una segunda operación de destilación en la torre TD-402.

El objetivo de esta segunda columna es la de la recuperación del ácido cianhídrico producido en una de las reacciones secundarias en el reactor para poder ser vnedido posteriormente como sub-producto. De esta forma, se obtendrá por la parte del destilado un corriente con un elevado porcentaje de HCN y por el residuo un corriente que contendrá todos los compuestos restantes que entravan a la columna (ver figura 11.2.1.6).

El diseño de esta columna se ha realizado nuevamente con el programa Hysys y el procedimiento a seguir será el mismo que el descrito en el apartado 11.2.1.

Las condiciones de operación de la columna TD-402 se encuentran representadas en la figura 11.2.2.1.

Planta de producción de Acrilonitrilo

11. Manual de cálculos

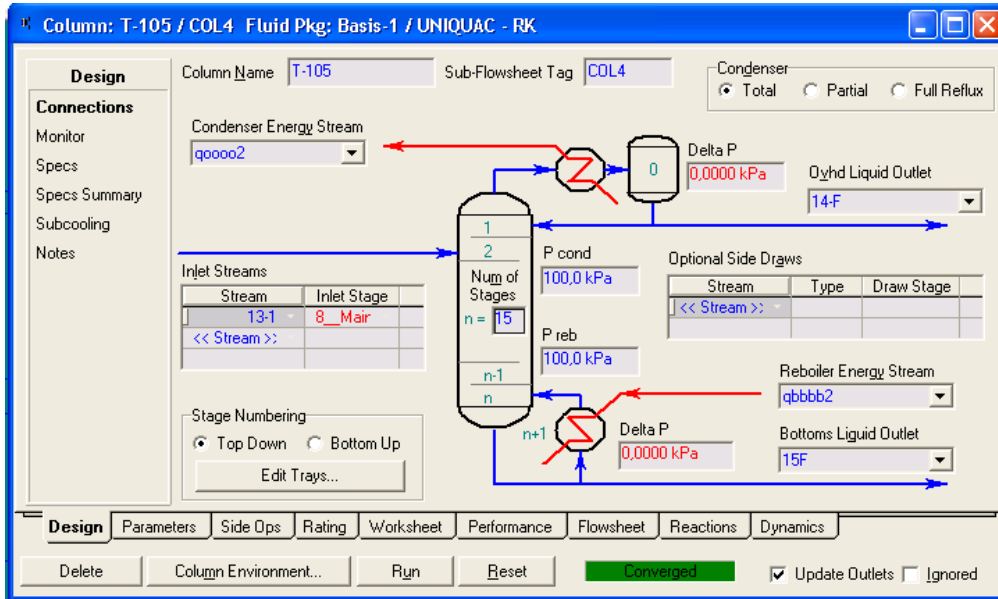


Figura 11.2.2.1. Condiciones de operación de la columna TD-402.

Como se puede observar, la columna dispone de 15 platos, el alimento entra por el número 8 y ésta utiliza un condensador total.

Las especificaciones seleccionadas para esta torre son las reflejadas en la figura 11.2.2.2.

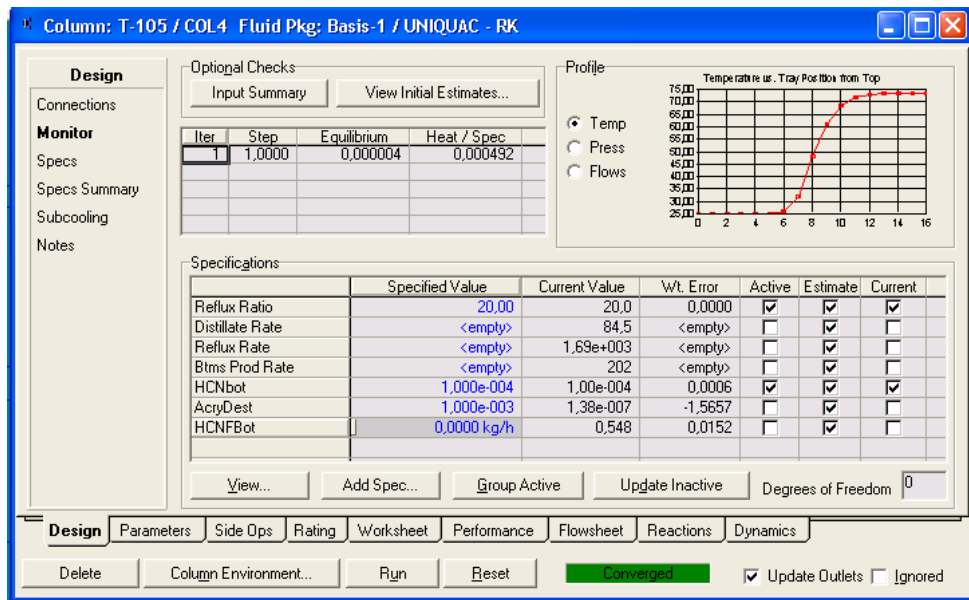


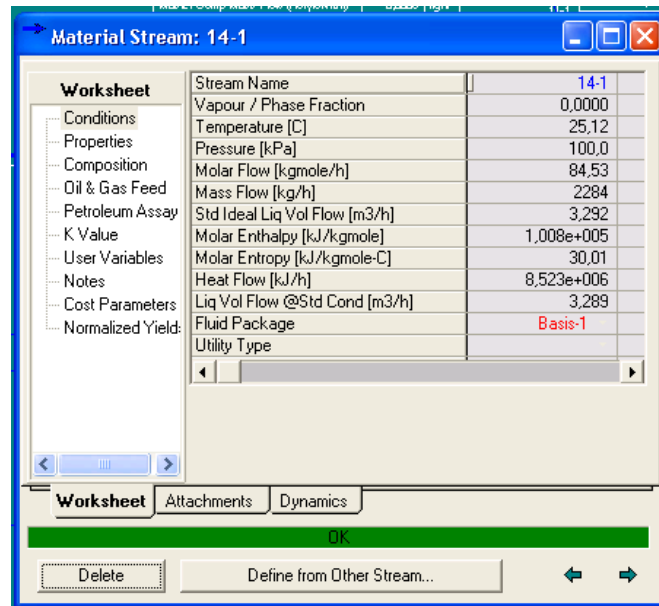
Figura 11.2.2.2. Especificaciones de la columna TD-402.

Planta de producción de Acrilonitrilo

11. Manual de cálculos

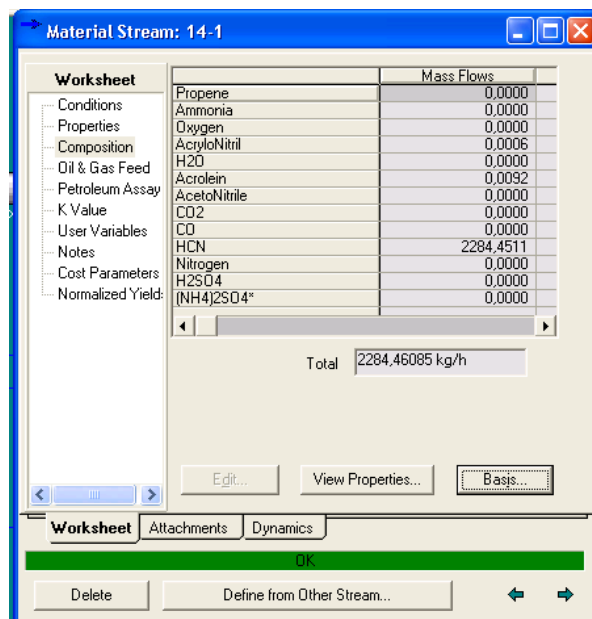
En este caso, se ha especificado que la relación de reflujo sea de 20 y que la fracción molar de HCN en el residuo sea muy pequeña (0.0001) para asegurar que se va a obtener un corriente altamente rico en HCN por el destilado.

Las características de las corrientes obtenidas en la columna TD-402 se pueden ver en las figuras 11.2.2.3-11.2.2.6.



Worksheet	Stream Name	14-1
Conditions	Vapour / Phase Fraction	0,0000
Properties	Temperature [C]	25,12
Composition	Pressure [kPa]	100,0
Oil & Gas Feed	Molar Flow [kgmole/h]	84,53
Petroleum Assay	Mass Flow [kg/h]	2284
K Value	Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	3,292
User Variables	Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	1,008e+005
Notes	Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	30,01
Cost Parameters	Heat Flow [kJ/h]	8,523e+006
Normalized Yield:	Liq Vol Flow @Std Cond [m3/h]	3,289
	Fluid Package	Basis-1
	Utility Type	

Figura 11.2.2.3. Condiciones de operación del destilado de la columna TD-402.



Worksheet	Mass Flows	
Conditions	Propene	0,0000
Properties	Ammonia	0,0000
Composition	Oxygen	0,0000
Oil & Gas Feed	AcryloNitril	0,0006
Petroleum Assay	H2O	0,0000
K Value	Acrolein	0,0092
User Variables	AcetoNitrile	0,0000
Notes	CO2	0,0000
Cost Parameters	CO	0,0000
Normalized Yield:	HCN	2284,4511
	Nitrogen	0,0000
	H2SO4	0,0000
	(NH4)2SO4*	0,0000

Total 2284,46085 kg/h

Figura 11.2.2.4. Composición del destilado de la columna TD-402.

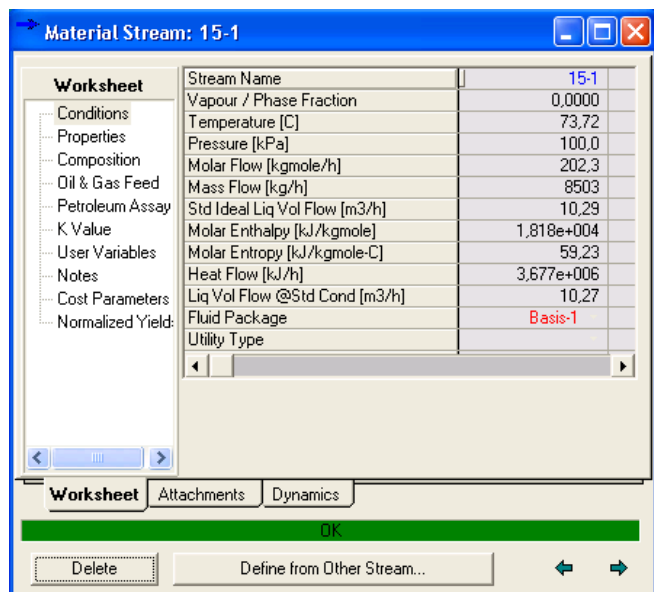


Figura 11.2.2.5. Condiciones de operación del residuo de la columna TD-402.

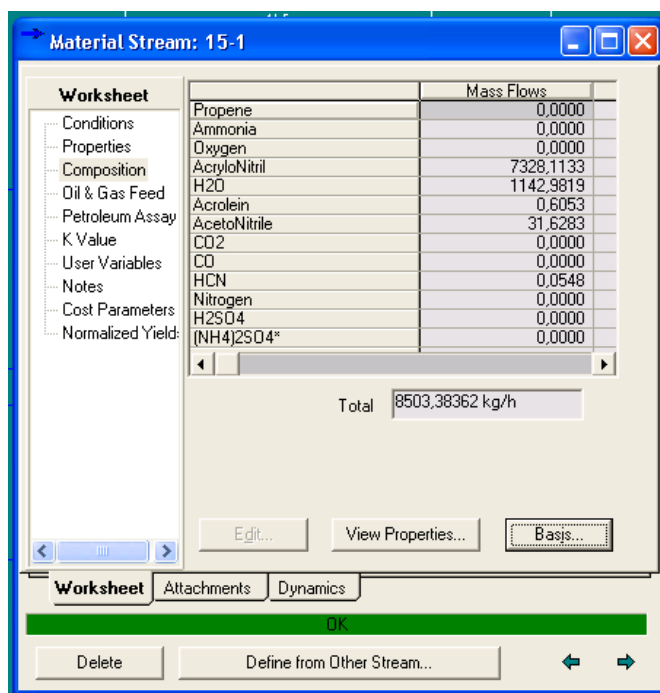


Figura 11.2.2.6. Composición del residuo de la columna TD-402.

Como se puede observar en las anteriores 4 figuras, se ha logrado obtener un corriente de HCN prácticamente puro que se podrá vender como sub-producto, y un corriente que contiene principalmente AN, ACN y H₂O que deberá ser tratado para seguir con el proceso de purificación.

11.2.3. Diseño de la torre de recuperación de AN (TD-403)

Nomenclatura

h_w = Altura del rebosadero (mm)

h_d = pérdida de presión en el plato vacío (mm)

h_{ow} = Altura de la cresta de líquido sobre el rebosadera (mm)

h_r
= Término que incluye la formación de espumas y burbujas en el rebosadero (mm)

h_t = Altura total en el plato (mm)

A_{holes} = Área ocupada por los agujeros (m^2)

A_a = Área activa (m^2)

A_c = Área transversal total de la columna (m^2)

A_d = Área transversal del downcomer (m^2)

A_n = Área neta disponible para el Vapor – líquido (m^2)

A_p = Área perforable (m^2)

D_h = Diámetro de los agujeros (mm)

D_c = Diámetro de la columna (m)

l_w = longitud del rebosadero (m)

U_f = velocidad de inundación ($\frac{m}{s}$)

$W_{v,l}$ = caudal de vapor y líquido ($\frac{kg}{s}$)

t_r = tiempo de residencia en el downcomer (s)

u_h = velocidad del vapor a través de los agujeros ($\frac{m}{s}$)

u_h^W = mínima velocidad de goteo ($\frac{m}{s}$)

Δ_{pt} = pérdida de presión total en el plato ($\frac{N}{m^2}$)

$\rho_{l,v}$ = densidad del vapor y líquido $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$

hb = downcomer back – up (mm)

hdc = pérdida de carga en el downcomer (mm)

Co = coeficiente de descarga

FLV = Factor líquido – vapor

lp = Distancia entre los agujeros, pitch (mm)

L = caudal molar de líquido $\left(\frac{mols}{h}\right)$

Qv_m = Caudal de vapor mínimo $\left(\frac{m^3}{s}\right)$

e = líquido arrastrado $\left(\frac{mols}{h}\right)$

$k1$ = factor de capacidad $\left(\frac{m}{s}\right)$

$k2$ = constante, depende de la profundidad del líquido en el plato

u = velocidad de operación $\left(\frac{m}{s}\right)$

ψ = arraste fraccional

11.2.3.1. Breve descripción de la columna

La última torre del proceso de purificación es la encargada de tratar la corriente que sale del separador de trifásico D-402 para obtener un producto final rico en AN. Esta columna tiene la particularidad trabajar al vacío, por lo que es necesario el uso de bombas de vacío.

El objetivo de la torre TD-403 será por tanto obtener un corriente altamente rica en AN por el destilado y una corriente residual, que se enviara a tratamiento.

Las condiciones de la corriente de entrada se aprecian en la siguiente tabla.

	TD-403 inlet			
	Frac. Mol	Frac. Más.	kmol/h	kg/h
Acrilonitrilo	0.99	1.00	124.58	6610.87
Agua	0.00	0.00	0.05	0.91
Acroleína	0.00	0.00	0.01	0.45
Acetonitrilo	0.01	0.00	0.77	31.64
Ácido cianhídrico	0.00	0.00	0.00	0.05
TOTAL	1.00	1.00	125.41	6643.93
Temperatura (°C)	40.05			
Presión (kPa)	40			

11.2.3.2. Diseño de la columna TD-403

Para ello hemos de seguir una serie de pasos, los cuales se describen a continuación:

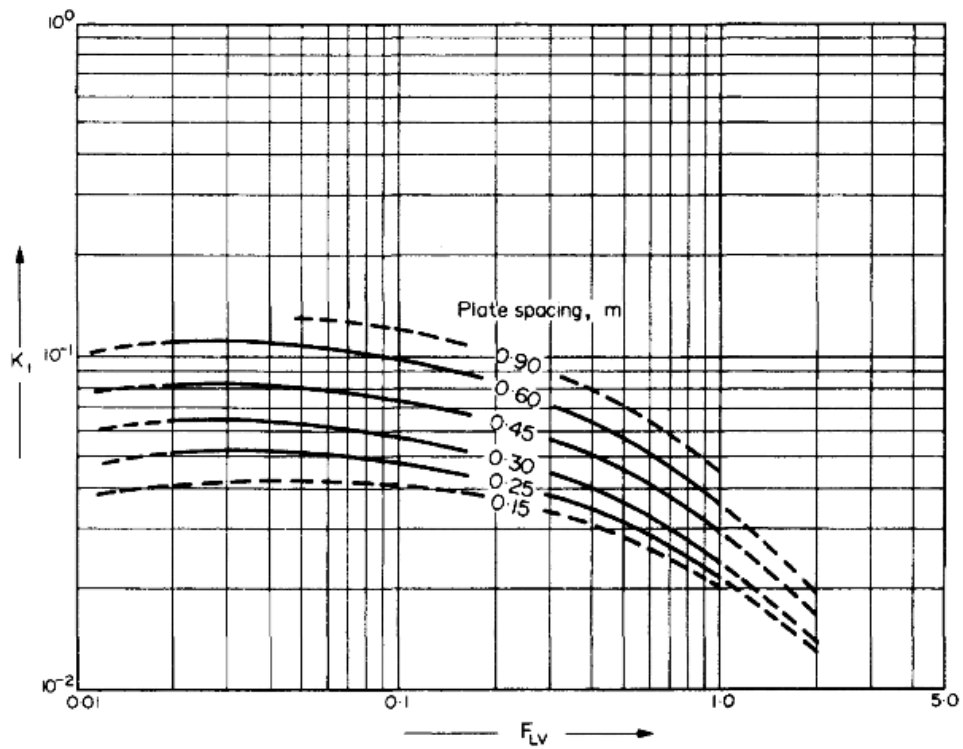
- 1.- Determinación del caudal máximo y mínimo de operación.
 - 2.- Estimación de las propiedades físicas (ρ_l , ρ_v , σ_l).
 - 3.- Selección de la distancia entre platos (0.15 – 1). Primer valor 0.5 m.
 - 4.- Calculo del diámetro de la columna a partir de las condiciones de operación.
- a) Determinación de la velocidad de inundación.

$$U_f = k_1 \cdot \left(\frac{\rho_l - \rho_v}{\rho_v} \right)^{0.5}$$

Para ello hemos de calcular FLV con la siguiente ecuación:

$$FLV = \frac{W_l}{W_v} \cdot \left(\frac{\rho_l}{\rho_v} \right)^{0.5}$$

Y determinar gráficamente k_1 (m/s), en función de la distancia entre platos y FLV, con la siguiente figura.



b) Cálculo de la velocidad de operación (u)

$$u = (0.75 - 0.85) \cdot U_f$$

c) Determinación del área neta (A_n)

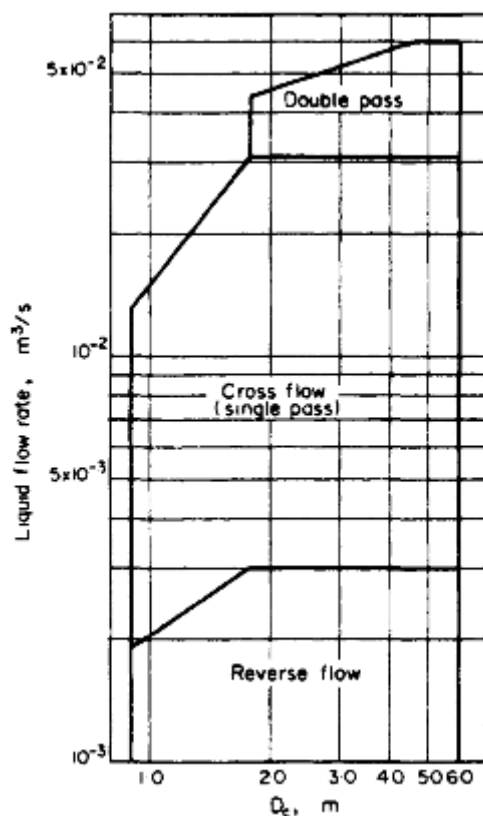
$$A_n = A_c - A_d = 0.9 \cdot A_c$$

Siendo el $A_d = [10- 12 \%]$ de A_c

d) Cálculo del diámetro de la columna

$$D_c = \left(\frac{W_v}{u \cdot \rho_v \cdot 0.9 \cdot \frac{\pi}{4}} \right)^{0.5}$$

5.- Selección del tipo de flujo en el plato, según la siguiente figura.



Típicamente se utiliza el flujo cruzado

6.- Esquema del plato perforado

a) Área activa.

$$A_a = A_c - 2 \cdot A_d$$

b) Área ocupada por los agujeros.

$$A_{holes} = [7 - 16\%] \text{ de } A_a$$

Siendo la primera iteración $A_{holes} = 0.1 \cdot A_a$

c) Diámetro de los agujeros.

$$D_h = [2.5 - 12]mm$$

Siendo la primera iteración $D_h = 5 \text{ mm}$

d) Distancia entre los agujeros (pitch)

$$Ip \geq 2 \cdot D_h$$

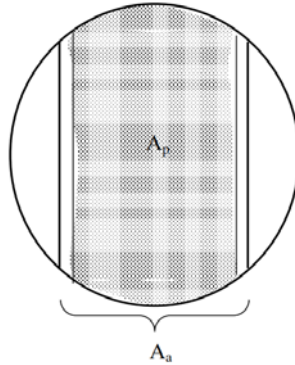
Debiéndose cumplir que $A_{holes} \cdot Ip \sim 2 \cdot D_h$

e) Área perforable

11. Manual de cálculos

$$\frac{A_{holes}}{A_p} = 0.9 \cdot \left(\frac{D_{holes}}{I_p} \right)^2$$

En vista que hay zonas que no se pueden perforar, tal como se aprecia en l siguiente figura.



f) Rebosaderos (weirs)

$$h_w = [40 - 90]mm$$

$$I_w = [0.65 - 0.85] \cdot D_c$$

7.- Comprobación de la velocidad de goteo

Esta es la mínima velocidad que ha de tener el vapor para que el líquido no gotee.

Por ello, hemos de calcular en primer lugar la velocidad del vapor a través de los agujeros.

$$u_h = \frac{Q v_m}{A_{holes}}$$

Y comprobar que esta sea mayor a la mínima velocidad de goteo, que viene determinada por la siguiente ecuación.

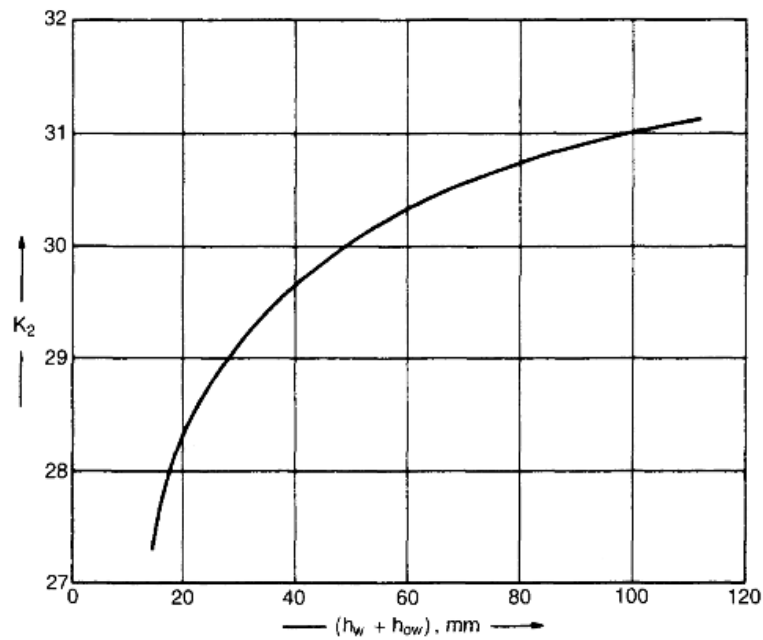
$$u_h^W = \frac{k_2 - 0.9 \cdot (25.4 - D_h)}{(\rho_v)^{0.5}}$$

Comprobándose que $u_h^W < u_h$.

Para ello hemos de calcular h_{ow}

$$h_{ow} = 750 \cdot \left(\frac{W_l}{\rho_l \cdot I_w} \right)^{\frac{2}{3}}$$

Y determinando con estas variables k_2 , a partir de la siguiente figura.



8.- Pérdida de presión en el plato.

Considerando que

$$\Delta Pt = \Delta P_{\text{por el paso del vapor por los agujeros}} + \Delta P_{\text{rebosadero+cresta del líquido}} + \Delta P_{\text{residual}}$$

Ecuación que se puede expresar en función de las alturas de líquido (mm).

$$h_T = h_d + (h_w + h_{ow}) + h_r$$

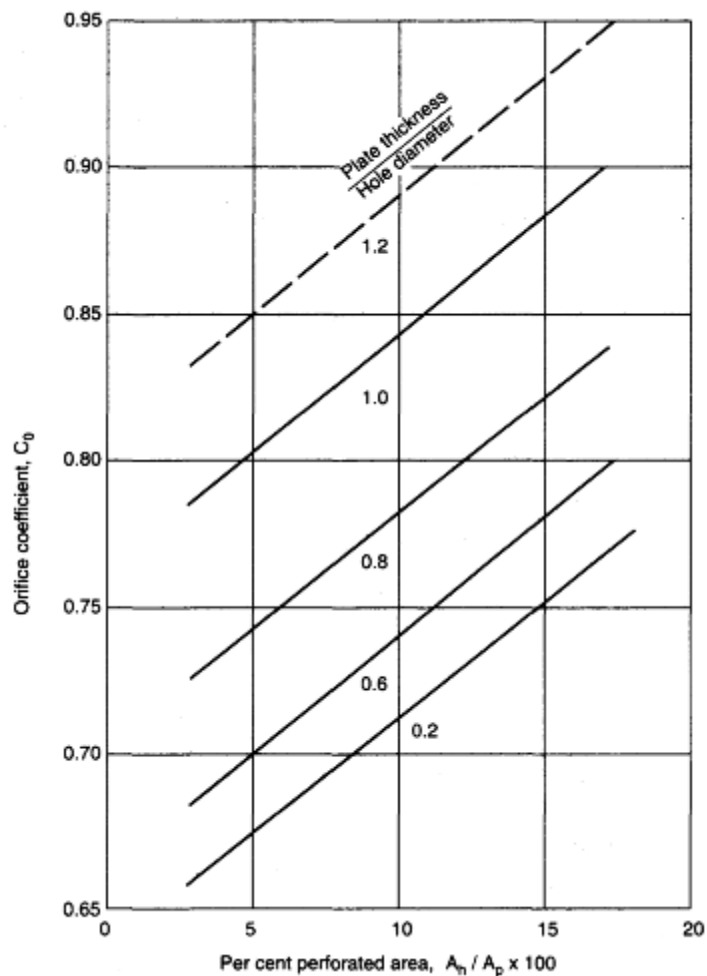
Obteniéndose

$$\Delta Pt = h_T \cdot 10^{-3} \cdot 9.81 \cdot \rho_l$$

Para el desarrollo de estas ecuaciones hemos de determinar h_d y h_r .

$$h_d = 51 \cdot \left(\frac{u_h}{Co}\right)^2 \cdot \frac{\rho_v}{\rho_l}$$

En la que Co se obtiene a partir de la siguiente figura.



Y hr a partir de la siguiente ecuación.

$$h_r = \frac{12.5 \cdot 10^3}{\rho_l}$$

Hemos de considerar que usualmente la pérdida de presión en el plato es un parámetro de diseño, por lo que si esta es muy grande hemos de volver al punto 6 y redimensionar el plato.

9.- Comprobación de la altura del líquido en el rebosadero.

Ello se realiza porque esta ha de ser lo suficientemente grande como para eliminar las espumas y que no haya inundación.

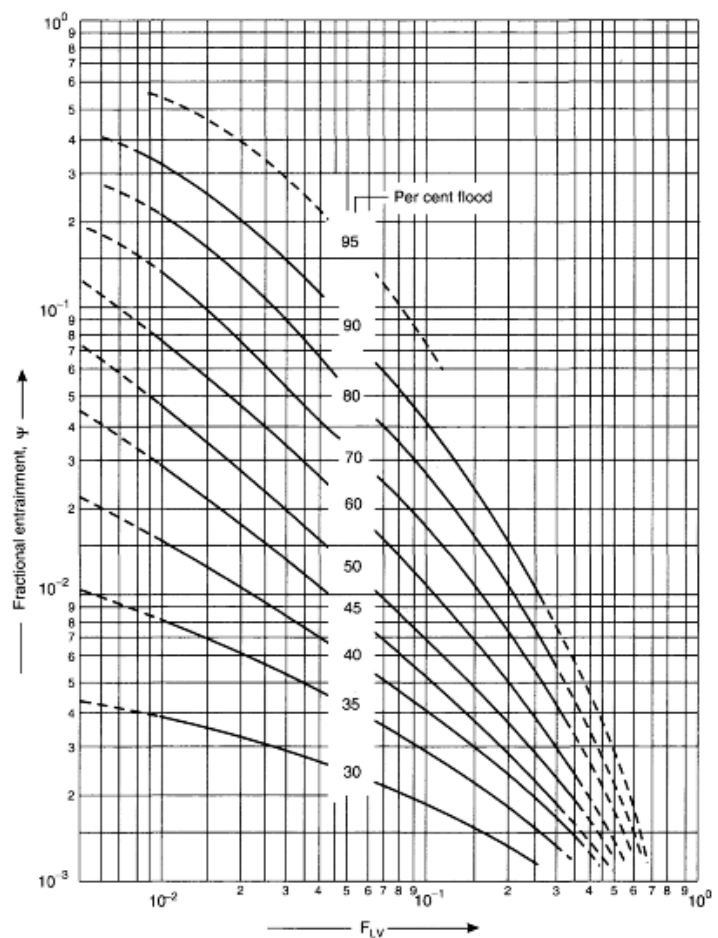
$$h_{bc} = h_T + (h_w + h_{ow}) + h_{dc}$$

Siendo

$$h_{dc} = 166 \cdot \left(\frac{W_{ld}}{\rho_l \cdot A_n} \right)^2$$

10.- Comprobación de la inundación y del arrastre.

Para ello hemos de aplicar la siguiente figura, en función FLV y el porcentaje de inundación



Se ha de comprobar que $\psi < 0.1$

Finalmente, se ha de iterar hasta obtener la columna deseada, que esta no posea arrastre de líquido y su distancia entre platos sea mínima pero suficiente.

11.- Comprobación del tiempo de residencia en el downcomer, para evitar que el líquido sea arrastrado por el vapor. Se recomienda un tiempo de residencia en el downcomer de al menos 3 segundos.

$$t_r = \frac{(A_d \cdot h_{bc} \cdot \rho_l)}{W_l}$$

11.2.4. Diseño mecánico de las columnas

En este apartado se explicará el cálculo del espesor de pared tanto del cuerpo como de los cabezales de las columnas de destilación. La nomenclatura que se seguirá se encuentra resumida en la tabla 11.2.4.1.

Una vez se ha realizado el procedimiento de diseño de las torres de destilación explicado en los apartados 11.2.1-11.2.3, el programa Hysys permite obtener un dimensionamiento de las columnas con la herramienta *Tray Sizing*. Esto permitirá conocer el diámetro de la columna, además de otros datos de interés, que será necesario en el cálculo de los espesores de pared.

Las figuras 11.2.4.1 y 11.2.4.2 muestran las características de diseño de las columnas TD-401, TD-402, respectivamente. En ellas se puede apreciar el diámetro de la columna (Section Diameter), el espaciado entre platos (Tray Spacing) y la altura de la columna (Section Height).

La columna TD-403 se ha calculado según el método descrito en apartado 11.2.3. Además, al trabajar al vacío, el diseño mecánico de esta columna se debe hacer teniendo en cuenta la presión externa, no la interna como en los casos vistos hasta el momento.

The screenshot shows the 'Tray Sizing: T-103' window. The 'Performance' tab is active, and the 'Trayed' radio button is selected. The 'Tray Results' table is displayed as follows:

	Section_1
Internals	
Sieve	
Number of Flow Paths	2
Jet Flooding Method	Glitsch
Column Geometry	
Section Diameter [m]	5,029
X-Sectional Area [m2]	19,86
Hole Area [m2]	1,648
Active Area [m2]	16,35
DC Area [m2]	1,756
Tray Spacing [m]	0,6096
Section Height [m]	13,41
Hydraulic Results	
Max Flooding [%]	79,81
Max DC Backup [%]	39,71
Max DP/Tray [kPa]	0,842
Section DeltaP [kPa]	17,64
Max Weir Load [m3/h-m]	51,44

Figura 11.2.4.1. Dimensionamiento de la columna TD-401.

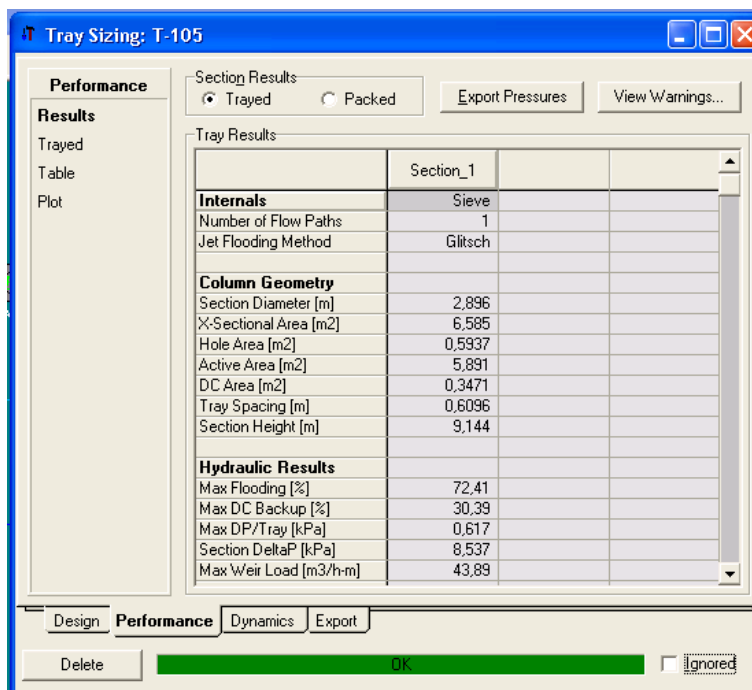


Figura 11.2.4.2. Dimensionamiento de la columna TD-402.

A parte del diámetro interno de las columnas, para obtener el diseño mecánico de las mismas es necesario conocer su presión de operación y su temperatura máxima de operación. Estos datos se encuentran recogidos en la tabla 11.2.4.1 a continuación.

Tabla 11.2.4.1. Características y condiciones de operación de las torres de destilación.

TD-401		
Diámetro interno (m)	D	5
Radio interno (m)	R	2.5
Altura (m)	H	17.6
Presión de operación (bar)	P_{op}	1
Presión de diseño (bar)	P	1.035
Temperatura de operación (°F)	$T_{m\acute{a}x}$	210.2
TD-402		
Diámetro (m)	D	3
Radio interno (m)	R	1.5
Altura (m)	H	9.2
Presión de operación (bar)	P_{op}	1
Presión de diseño (bar)	P	1.035
Temperatura de operación (°F)	$T_{m\acute{a}x}$	165.2
TD-403		
Diámetro (m)	D	1.8
Radio interno (m)	R	0.9
Altura (m)	H	22.8
Presión de operación (bar)	P_{op}	0.65
Presión de diseño (bar)	P	0.7475
Temperatura de operación (°F)	$T_{m\acute{a}x}$	91.4

La tabla 11.2.4.2 recoge los demás parámetros necesarios para el cálculo del espesor de pared, así como la nomenclatura que se seguirá en las ecuaciones utilizadas a continuación.

Tabla 11.2.4.2. Parámetros para el cálculo del espesor de pared de las columnas de destilación.

TD-401		
Módulo de tensión del material (bar)	S	1269
Eficacia de la unión	E	0.85
Sobreespesor de corrosión (mm)	C ₁	0.75
Tolerancia de fabricación (mm)	C ₂	0.61
Factor M	M	1.54
TD-402		
Módulo de tensión del material (bar)	S	1228
Eficacia de la unión	E	0.85
Sobreespesor de corrosión (mm)	C ₁	0.75
Tolerancia de fabricación (mm)	C ₂	0.40
Factor M	M	1.54
TD-403		
Módulo de tensión del material (bar)	S	1297
Eficacia de la unión	E	0.85
Sobreespesor de corrosión (mm)	C ₁	0.75
Tolerancia de fabricación (mm)	C ₂	0.35
Factor M	M	1.54

Procedimiento para el diseño mecánico a presión interna (TD-401 y TD-402)

Para conocer el espesor de pared del cuerpo de las columnas se ha aplicado la ecuación 11.2.4.1, que es válida para cuerpos cilíndricos.

$$t_{cuerpo} = \frac{PR}{SE + 0.4P} + C_1 \quad \text{Ecuación 11.2.4.1}$$

Para el cabezal, se debe aplicar la ecuación 11.2.4.2, que es válida para cabezales toriesféricos. Cabe destacar que, como el fondo es del mismo tipo que el cabezal, todas las ecuaciones referentes al segundo són igualmente aplicables al primero.

$$t_{cabezal} = \frac{PDM}{2SE - 0.2P} + C_1 + C_2 \quad \text{Ecuación 11.2.4.2}$$

Otro parámetro importante a conocer es la máxima presión de trabajo permitida. Esta se calcula según la ecuación 11.2.4.3 para el cuerpo y la ecuación 11.2.4.4 para el cabezal de las columnas.

$$P_{m\acute{a}x,cuerpo} = \frac{SEt_{cuerpo}}{R - 0.4t} \quad \text{Ecuación 11.2.4.3}$$

Planta de producción de Acrilonitrilo

11. Manual de cálculos

$$P_{m\acute{a}x,cabezal} = \frac{2SEt_{cuerpo}}{DM - 0.4t} \quad \text{Ecuación 11.2.4.4}$$

El módulo de tensión del material es función del tipo de materia y de la máxima temperatura de operación y se determina a partir de la tabla 11.2.4.3.

Tabla 11.2.4.3. Módulos de tensión para diferentes materiales en función de la temperatura de operación.

Specification		MAXIMUM ALLOWABLE STRESS VALUES IN TENSION FOR HIGH-ALLOY STEEL (CAUTION: See UW-12 for vessels constructed under part UW)												
		Maximum Allowable Stress, ksi (Multiply by 1000 to Obtain psi), for Metal Temp., °F, Not Exceeding												
Number	Grade	-20 to 100	200	300	400	500	600	650	700	750	800	850	900	950
SA-240	304	18,8	17,8	16,6	16,2	15,9	15,9	15,9	15,9	15,5	15,2	14,9	14,7	14,4
SA-240	304L	15,7	15,7	15,3	14,7	14,4	14	13,7	13,5	13,3	13	---	---	---
SA-240	316	18,8	18,8	18,4	18,1	18,0	17,0	16,7	16,3	16,1	15,9	15,7	15,5	15,4
SA-240	316L	15,7	15,7	15,7	15,5	14,4	13,5	13,2	12,9	12,6	12,4	12,1	---	---

En nuestro caso, se ha elegido un acero SA-240 de grado 304 para la columna TD-402 y de grado 316 para las columnas TD-401 y TD-403.

La eficacia de unión depende del tipo de soldadura y el radiografiado que se ha llevado a cabo a la hora de fabricar el equipo y se ha determinado a partir de la tabla 11.2.4.4.

Tabla 11.2.4.4. Eficacia de unión en función de la soldadura y el radiografiado.

	Radiografiado total	Radiografiado parcial	Sin radiografiado
Soldadura simple	1	0.85	0.7
Soldadura doble	0.9	0.8	0.65

El sobreespesor de corrosión se calcula en base a la degradación que sufre la chapa metálica a lo largo del tiempo debido a la corrosión según la ecuación 11.2.4.5.

$$C_1 = 0.05 \frac{mm}{a\acute{n}o} \cdot 15 \text{ años de vida útil} = 0.75 \text{ mm}$$

Ecuación 11.2.4.5

La tolerancia de fabricación (C_2) tiene en cuenta las posibles desviaciones entre el valor teórico que debe tener el espesor de pared y el que finalmente tiene a causa de posibles defectos en la fabricación. Se calcula como un 10% del espesor de pared teórico calculado.

El factor M depende del tipo de cabezal que se esté utilizando y se determina a partir de la tabla 11.2.4.5 con el valor obtenido en la ecuación 11.2.4.8, válido para un cabezal tipo Klover.

$$L = D \quad \text{Ecuación 11.2.4.6}$$

$$r = 0.1D \quad \text{Ecuación 11.2.4.7}$$

11. Manual de cálculos

$$\frac{L}{r} = \frac{D}{0.1D} = 10 \text{ Ecuación 11.2.4.8}$$

Tabla 11.2.4.5. Factor M para diferentes valores de L/r.

VALUES OF FACTOR "M"																	
L/r	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50	2.75	3.00	3.25	3.50	4.00	4.50	5.00	5.50	6.00	6.50
M	1.00	1.03	1.06	1.08	1.10	1.13	1.15	1.17	1.18	1.20	1.22	1.25	1.28	1.31	1.34	1.36	1.39
L/r	7.00	7.50	8.00	8.50	9.00	9.50	10.0	10.5	11.0	11.5	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	16.5	*
M	1.41	1.44	1.46	1.48	1.50	1.52	1.54	1.56	1.58	1.60	1.62	1.65	1.69	1.72	1.75	1.77	

* THE MAXIMUM ALLOWED RATIO : L = D + 2t (see note 2 on facing page)

De esta forma se han obtenido los resultados resumidos en la tabla 11.2.3.6 para las dos columnas.

Tabla 11.2.4.6. Grosos de pared y presiones máximas para las torres de destilación.

TD-401		
Grosor de pared del cuerpo (mm)	t _{cuerpo}	3
Grosor de pared del cabezal (mm)	t _{cabezal}	5
Presión máxima en el cuerpo (bar)	P _{máx,cuerpo}	1.66
Presión máxima en el cabezal (bar)	P _{máx,cabezal}	1.80
Presión máxima en el fondo (bar)	P _{máx,fondo}	1.80
TD-402		
Grosor de pared del cuerpo (mm)	t _{cuerpo}	3
Grosor de pared del cabezal (mm)	t _{cabezal}	4
Presión máxima en el cuerpo (bar)	P _{máx,cuerpo}	2.16
Presión máxima en el cabezal (bar)	P _{máx,cabezal}	1.87
Presión máxima en el fondo (bar)	P _{máx,fondo}	1.87

Procedimiento para el diseño mecánico a presión externa (TD-403)

El cálculo del espesor de pared, tanto para el cilindro como para el cabezal y las tapas de la columna, se va a realizar mediante un procedimiento iterativo, suponiendo un espesor y comprobando su validez mediante unos criterios determinados.

Para el cuerpo de la columna, dicho procedimiento es el siguiente:

1. Suponer un valor de t_{cuerpo}. Calcular L/D_o i D_o/t (ver figura 11.2.4.3 para nomenclatura).
2. Determinar el factor A mediante la figura 11.2.4.4.
3. Determinar el factor B mediante la figura 11.2.4.5.
4. Calcular la presión máxima permitida mediante la ecuación 11.2.4.9. Si el valor de A cae en la zona izquierda de la figura 11.2.4.5, se calculará mediante la ecuación 11.2.4.10.

11. Manual de cálculos

$$Pa_{cuerpo} = \frac{4B}{3 \left(\frac{D_o}{t_{cuerpo}} \right)} \quad \text{Ecuación 11.2.4.9}$$

$$Pa_{cuerpo} = \frac{2AE}{3 \left(\frac{D_o}{t_{cuerpo}} \right)} \quad \text{Ecuación 11.2.4.10}$$

5. Si la presión calculada es menor que la presión externa de diseño, que en nuestro caso será la atmosférica (1.01 bar), se debe volver al punto 1 suponiendo un t_{cuerpo} mayor.

Para el cabezal y las tapas, que serán toriesféricos, el procedimiento es el descrito a continuación:

1. Calcular $t_{cabezal,1}$ mediante el procedimiento descrito para presión interna utilizando una presión de diseño de 1.67 veces la presión externa y $E=1$.
2. Suponer un valor de $t_{cabezal,2}$ y calcular el factor A mediante la ecuación 11.2.4.11.

$$A = \frac{0.125}{\frac{R_{cabezal}}{t_{cabezal,2}}} \quad \text{Ecuación 11.2.4.11}$$

3. Determinar el factor B mediante la figura 11.2.4.5.
4. Calcular la máxima presión permitida mediante la ecuación 11.2.4.12. Si el valor de A está en la zona izquierda de la figura 11.2.4.5, se deberá calcular con la ecuación 11.2.4.13. El módulo de elasticidad E se puede determinar con la tabla 11.2.4.6.

$$Pa_{cabezal} = \frac{B}{\frac{R_{cabezal}}{t_{cabezal,2}}} \quad \text{Ecuación 11.2.4.12}$$

$$Pa_{cabezal} = \frac{0.0625E}{\left(\frac{R_{cabezal}}{t_{cabezal,s}} \right)^2} \quad \text{Ecuación 11.2.4.13}$$

5. Si la presión calculada es menor, se debe volver al punto 2, suponiendo un valor de $t_{cabezal,2}$ mayor. Si no, pasar al punto 6.
6. Comparar los valores de $t_{cabezal,1}$ y $t_{cabezal,2}$ y elegir el más elevado como resultado final.

Las figuras 11.2.4.4-11.2.4.6 y la tabla 11.2.4.6 mencionadas anteriormente se presentan seguidas a continuación.

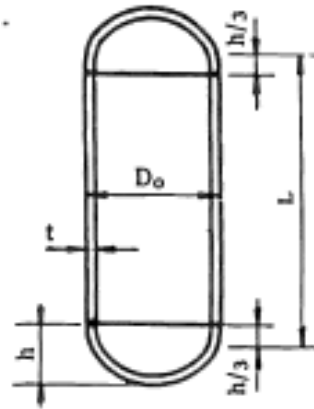


Figura 11.2.3. Características del cuerpo para el diseño mecánico a presión externa.

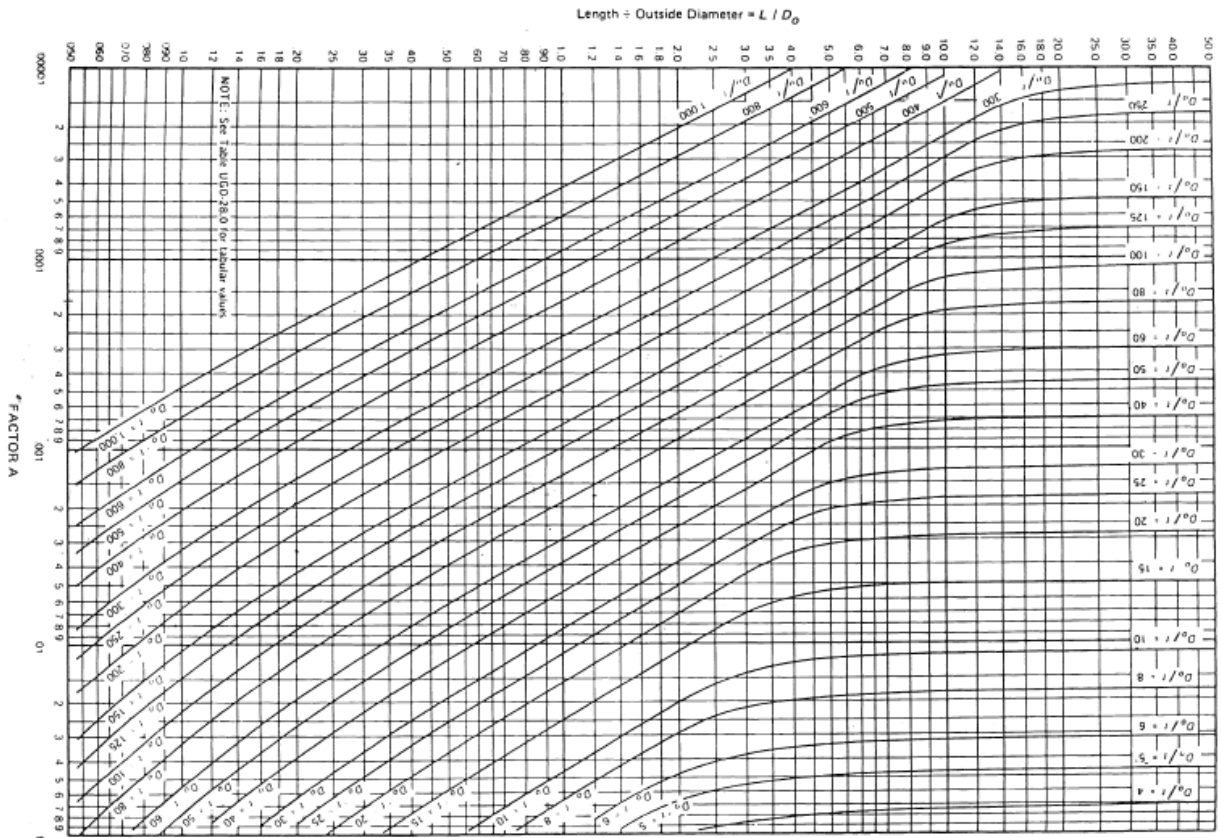


Figura 11.2.4. Diagrama para la determinación del factor A en el diseño mecánico a presión externa.

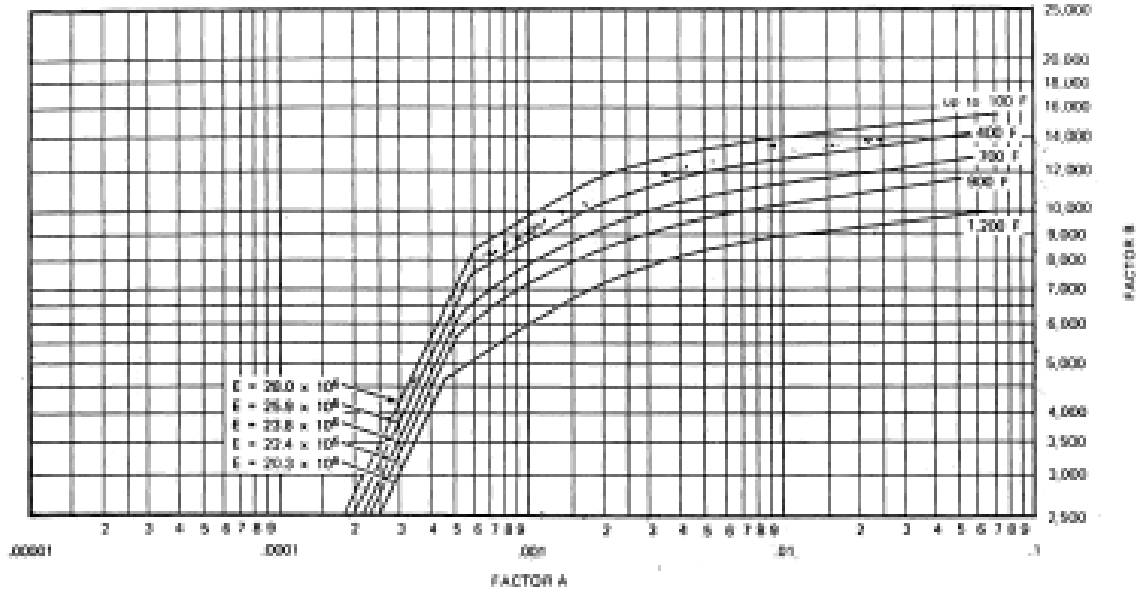


Figura 11.2.5. Diagrama para la determinación del factor B en el diseño mecánico a presión externa.

Tabla 11.2.4.6. Módulo de elasticidad para el diseño mecánico del cuerpo a presión externa.

MODULI OF ELASTICITY OF CARBON STEEL MILLION PSI. AT TEMPERATURE, F									
70	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
29.0	28.7	28.2	27.6	26.8	25.9	24.5	23.0	21.0	18.1

Los parámetros obtenidos para el cálculo del grosor de pared para el cuerpo y el cabezal y el fondo de la columna TD-403 se encuentran en las tablas 11.2.4.7 y 11.2.4.8, respectivamente.

Tabla 11.2.4.7. Parámetros para el diseño mecánico del cuerpo a presión externa.

TD-403		
Altura del cuerpo (m)	L	22.7
Diámetro externo (m)	D _o	1.84
Relación altura-diámetro externo	L/D _o	12.34
Relación diámetro externo-grosor	D _o /t _{cuerpo}	92
Factor A	A	1.3 · 10 ⁻⁴
Factor B	B	-
Módulo de elasticidad (bar)	E	2 · 10 ⁶

Tabla 11.2.4.8. Parámetros para el diseño mecánico del cabezal y el fondo a presión externa.

TD-403		
Factor A	A	$4.8 \cdot 10^{-4}$
Factor B	B	7000
Módulo de elasticidad (psi)	E	$2.9 \cdot 10^7$
Grosor de pared 1 (mm)	$t_{\text{cabezal},1}$	2.84
Grosor de pared 2 (mm)	$t_{\text{cabezal},2}$	7

Los resultados de diseño obtenidos para el cuerpo y el cabezal y el fondo de la columna TD-403 son los mostrados en las tabla 11.2.4.9 y 11.2.4.10, respectivamente.

Tabla 11.2.4.9. Resultados del diseño mecánico del cuerpo a presión externa.

TD-403		
Grosor de pared (mm)	t_{cuerpo}	20
Presión máxima de trabajo (bar)	$P_{a_{\text{cuerpo}}}$	1.88

Tabla 11.2.4.10. Resultados del diseño mecánico del cabezal y el fondo a presión externa.

TD-403		
Grosor de pared (mm)	t_{cabezal}	7
Presión máxima de trabajo (bar)	$P_{a_{\text{cabezal}}}$	1.86

11.2.5. Peso de las columnas

Para conocer el peso de las columnas cuando éstas se encuentran vacías, cuando están llenas de agua para pruebas hidráulicas y en operación, se debe tener en cuenta el peso del cuerpo cilíndrico de las columnas, el cabezal y el fondo y los platos.

La tabla 11.2.5.1 muestra los resultados obtenidos para las tres columnas, así como la nomenclatura que se seguirá en esta apartado.

Tabla 11.2.5.1. Volumen y peso de las columnas de destilación.

TD-401		
Volumen del cuerpo (m ³)	V_{cuerpo}	0.647
Volumen del cabezal (m ³)	V_{cabezal}	0.044
Volumen del fondo (m ³)	V_{fondo}	0.044
Volumen de los platos (m ³)	V_{platos}	0.303
Volumen del equipo vacío (m ³)	$V_{\text{vacío}}$	1.04
Volumen de agua (m ³)	V_{agua}	210
Peso del cuerpo (kg)	W_{cuerpo}	5082
Peso del cabezal (kg)	W_{cabezal}	343
Peso del fondo (kg)	W_{fondo}	343
Peso de los platos (kg)	W_{platos}	2382
Peso del equipo vacío (kg)	$W_{\text{vacío}}$	8150
Peso del equipo lleno de agua (kg)	W_{agua}	217973
Peso del equipo en operación (kg)	$W_{\text{operación}}$	199701

Planta de producción de Acrilonitrilo

11. Manual de cálculos

TD-402		
Volumen del cuerpo (m ³)	V _{cuerpo}	0.252
Volumen del cabezal (m ³)	V _{cabezal}	0.019
Volumen del fondo (m ³)	V _{fondo}	0.019
Volumen de los platos (m ³)	V _{platos}	0.168
Volumen del equipo vacío (m ³)	V _{vacío}	0.458
Volumen de agua (m ³)	V _{agua}	60.55
Peso del cuerpo (kg)	W _{cuerpo}	1976
Peso del cabezal (kg)	W _{cabezal}	301
Peso del fondo (kg)	W _{fondo}	301
Peso de los platos (kg)	W _{platos}	1317
Peso del equipo vacío (kg)	W _{vacío}	3594
Peso del equipo lleno de agua (kg)	W _{agua}	64140
Peso del equipo en operación (kg)	W _{operación}	3681
TD-403		
Volumen del cuerpo (m ³)	V _{cuerpo}	2.74
Volumen del cabezal (m ³)	V _{cabezal}	0.020
Volumen del fondo (m ³)	V _{fondo}	0.020
Volumen de los platos (m ³)	V _{platos}	0.065
Volumen del equipo vacío (m ³)	V _{vacío}	2.71
Volumen de agua (m ³)	V _{agua}	57.88
Peso del cuerpo (kg)	W _{cuerpo}	21502
Peso del cabezal (kg)	W _{cabezal}	155
Peso del fondo (kg)	W _{fondo}	155
Peso de los platos (kg)	W _{platos}	507
Peso del equipo vacío (kg)	W _{vacío}	22319
Peso del equipo lleno de agua (kg)	W _{agua}	80703
Peso del equipo en operación (kg)	W _{operación}	67240

A continuación se va a detallar el procedimiento de cálculo de los pesos para las tres partes que forman la columna, así como del equipo al completo. Para la nomenclatura, referirse a las tablas proporcionadas en este apartado.

Cálculo del peso del cuerpo cilíndrico

El volumen del cuerpo se calcula mediante la ecuación 11.2.5.1.

$$V_{cuerpo} = \frac{\pi}{4} \left((D + 2t_{cuerpo})^2 - D^2 \right) \cdot H \quad \text{Ecuación 11.2.5.1}$$

A partir de este dato y de la densidad del material (ρ_{acero}), que para el AISI 316 es de 7850 kg/m³, se puede calcular el peso del cuerpo con la ecuación 11.2.5.2.

$$W_{cuerpo} = V_{cuerpo} \cdot \rho_{acero} \quad \text{Ecuación 11.2.5.2}$$

Cálculo del peso del cabezal y el fondo

Como el cabezal y el fondo en las columnas son del mismo tipo (toriesféricos), el cálculo de su peso también va a ser igual. Es por eso que aunque las ecuaciones proporcionadas en este sub-apartado solo hagan referencia al cabezal, son aplicables también al fondo.

Para calcular el volumen de acero del cabezal primero debe calcularse la superficie que ocupa mediante la ecuación 11.2.5.3.

$$S_{cabezal} = \frac{\pi}{2} D_p^2 + D_e(D_e - 2D_p) \quad \text{Ecuación 11.2.5.3}$$

Donde D_e y D_p se calculan con las ecuaciones 11.2.5.4 y 11.2.5.5, respectivamente.

$$D_e = D + 2t_{cabezal} \quad \text{Ecuación 11.2.5.4}$$

$$D_p = 0.2D_e \quad \text{Ecuación 11.2.5.5}$$

El volumen del cabezal se calcula con la ecuación 11.2.5.6.

$$V_{cabezal} = S_{cabezal} \cdot t_{cabezal} \quad \text{Ecuación 11.2.5.6}$$

Y el peso se calcula a partir de la densidad del material con la ecuación 11.2.5.7.

$$W_{cabezal} = V_{cabezal} \cdot \rho_{acero} \quad \text{Ecuación 11.2.5.7}$$

Cálculo del peso de los platos

Para calcular el volumen que ocupan los platos es necesario conocer una serie de datos sobre ellos, que sean obtenidos a partir del programa Hysys para las columnas TD-401 y TD-402 y con el método explicado en el apartado 11.2.3.2 para la TD-403. Estos datos se encuentran recogidos en la tabla 11.2.5.2 para las tres columnas.

Tabla 11.2.5.2. Características de los platos en las columnas de destilación.

TD-401		
Número de platos	N_{platos}	22
Espaciado entre platos (m)	L_{platos}	0.80
Espaciado superior (m)	L_{superior}	0.12
Espaciado inferior (m)	L_{inferior}	0.12
Grosor de los platos (mm)	t_{platos}	25.4
TD-402		
Número de platos	N_{platos}	15
Espaciado entre platos (m)	L_{platos}	0.61
Espaciado superior (m)	L_{superior}	0.14
Espaciado inferior (m)	L_{inferior}	0.14
Grosor de los platos (mm)	t_{platos}	25.4
TD-403		
Número de platos	N_{platos}	35

Espaciado entre platos (m)	L_{platos}	0.60
Espaciado superior (m)	$L_{superior}$	0.76
Espaciado inferior (m)	$L_{inferior}$	0.76
Grosor de los platos (mm)	t_{platos}	25.4

Fijando el grosor de los platos en una pulgada (25.4mm), se he supuesto que el espaciado entre el plato superior y el cabezal es igual al de entre el plato inferior y el fondo, y se ha calculado con la ecuación 11.2.5.8.

$$L_{superior} = \frac{H - L_{platos}(N_{platos} - 1) - N_{platos}t_{platos}}{2}$$

Ecuación 11.2.5.8

Así, el volumen de los platos se ha calculado con la ecuación 11.2.5.9.

$$V_{platos} = \frac{\pi}{4} D^2 \cdot t_{platos} \quad \text{Ecuación 11.2.5.9}$$

Y el peso se calcula con la ecuación 11.2.5.10, a partir de la densidad del acero AISI 316.

$$W_{platos} = V_{platos} \cdot \rho_{acero} \quad \text{Ecuación 11.2.5.10}$$

Cálculo del peso del equipo

El volumen del equipo vacío se ha calculado a partir de la ecuación 11.2.5.11.

$$V_{vacío} = V_{cuerpo} + V_{cabezal} + V_{fondo} + V_{platos}$$

Ecuación 11.2.5.11

La ecuación 11.2.5.12 se ha utilizado para el cálculo del peso del equipo vacío.

$$W_{vacío} = W_{cuerpo} + W_{cabezal} + W_{fondo} + W_{platos}$$

Ecuación 11.2.5.12

El volumen de agua que puede contener el equipo se ha calculado con la ecuación 11.2.5.13.

$$V_{agua} = \frac{\pi}{4} D^2 (H - h_{cabezal} - h_{fondo}) + V_{cabezal} + V_{fondo} - V_{platos}$$

Ecuación 11.2.5.13

El peso del equipo lleno de agua se ha calculado a partir de la ecuación 11.2.5.14.

$$W_{agua} = W_{vacío} + V_{agua} \cdot \rho_{agua} \quad \text{Ecuación 11.2.5.14}$$

11.2.6. Aislamiento de las columnas

Las columnas de destilación llevan un recubrimiento aislante para asegurar que la operación se llevará a cabo a la temperatura deseada, ya que este es un parámetro que puede afectar mucho a la separación de los componentes.

El aislamiento elegido ha sido el proporcionado por la empresa Roclaine, las características de los cuales se muestran en la tabla 11.2.6.1.

Tabla 11.2.6.1. Tipo y espesor de los aislamientos Roclaine en función de la temperatura.

TEMPERATURA DE TRABAJO EQUIPO (°C)	ESPESOR AISLAMIENTO (mm)	MATERIAL AISLANTE	
		PANELES	MANTAS
100	70	BX SP-613-40	SP 322-G-70
150	90		
200	110		
250	120	BX SP-632-70	
300	140		
350	160	BX SP-643-100	SP 342-G-100
400	180		
450	200		
500	220	SP HP-353-144	SP 342-G-125
550	240		

El espesor y tipo de aislamiento elegido para cada columna es el mostrado en la tabla 11.2.6.2.

Tabla 11.2.6.2. Tipos y espesores elegidos para el aislamiento de las columnas.

Columna	Espesor (mm)	Tipo
TD-401	70	SP 322-G-70
TD-402	70	SP 322-G-70
TD-403	70	SP 322-G-70

11.3. Diseño de los condensadores (CD-401, CD-402 y CD-403)

En la planta se dispone de tres condensadores, que forman parte de las columnas comentadas en el apartado 11.2. Todos los condensadores utilizados son totales, es decir, pasan todo el vapor que se obtiene por cabezas de las columnas a fase líquida.

En este apartado se va a detallar el procedimiento que se ha seguido para su diseño, así como los resultados que se han obtenido. Para todos ellos se ha utilizado el programa Hysys para realizar el balance de materia y energía y el programa Aspen Exchanger Design and Rating para su dimensionamiento.

El primer paso a seguir es conocer las características de las corrientes que debe tratar cada condensador. Para ello se debe acceder al *Column Environment* de la columna de destilación en Hysys (figura 11.3.1) para obtener el balance de materia y energía alrededor del condensador. Las figuras 11.3.2-11.3.7 muestran esta información.

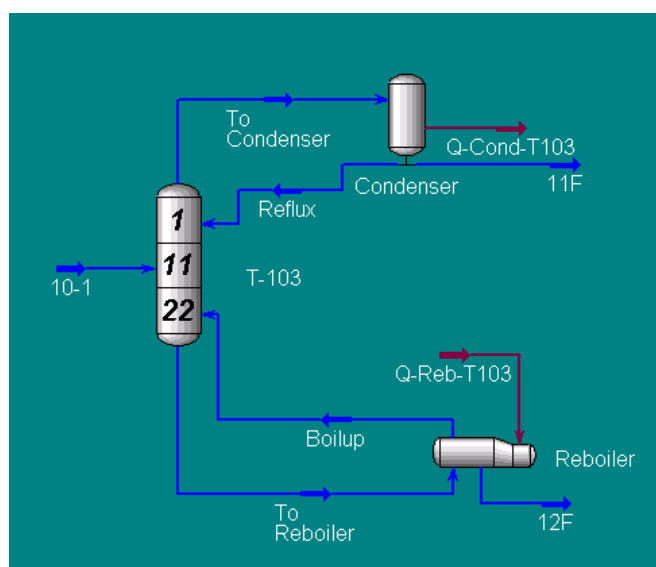


Figura 11.3.1. *Column Environment* de una de las columnas de destilación del proceso, a modo de ejemplo.

Worksheet	Name	To Condenser	11F	Reflux
Conditions	Vapour	1,0000	0,0000	0,0000
Properties	Temperature [C]	66,06	52,69	52,69
Properties	Pressure [kPa]	100,0	100,0	100,0
Composition	Molar Flow [kgmole/h]	4183	261,5	3922
PF Specs	Mass Flow [kg/h]	1,577e+005	9854	1,478e+005
	Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	199,5	12,47	187,0
	Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	8,397e+004	4,978e+004	4,978e+004
	Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	156,0	51,16	51,16
	Heat Flow [kJ/h]	3,513e+008	1,302e+007	1,952e+008
	Name	Q-Cond-T103		
	Vapour	<empty>		
	Temperature [C]	<empty>		
	Pressure [kPa]	<empty>		
	Molar Flow [kgmole/h]	<empty>		
	Mass Flow [kg/h]	<empty>		
	Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	<empty>		
	Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	<empty>		
	Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	<empty>		
	Heat Flow [kJ/h]	1,430e+008		

Figura 11.3.2. Propiedades de las corrientes de entrada y salida al condensador CD-401.

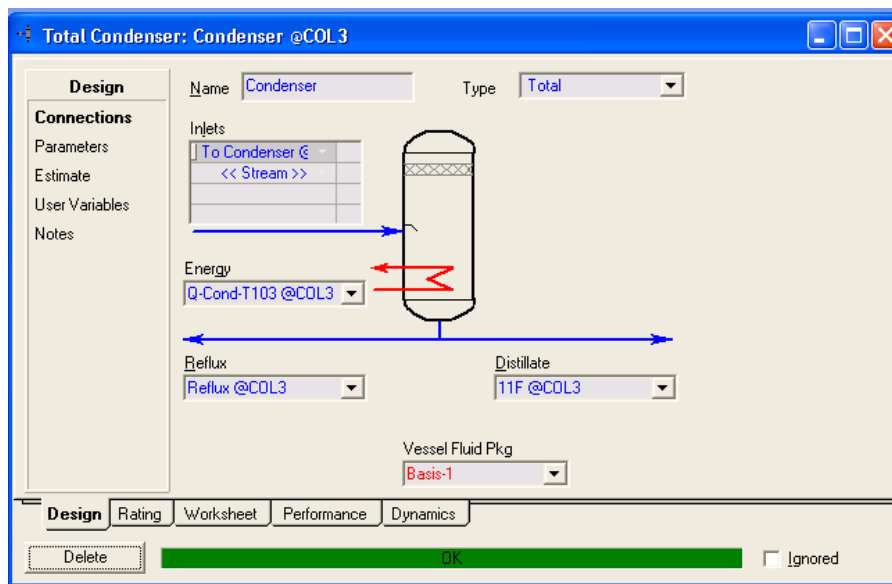


Figura 11.3.3. Composición (fracción molar) de las corrientes de entrada y salida al condensador CD-401.

Planta de producción de Acrilonitrilo

11. Manual de cálculos

Worksheet	Name	To Condenser	T105-Top	Reflux
Conditions	Vapour	1,0000	0,0000	0,0000
	Temperature [C]	25,12	25,12	25,12
Properties	Pressure [kPa]	100,0	100,0	100,0
	Molar Flow [kgmole/h]	1775	84,51	1690
Composition	Mass Flow [kg/h]	4,796e+004	2284	4,568e+004
	Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	69,12	3,291	65,83
PF Specs	Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	1,304e+005	1,008e+005	1,008e+005
	Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	129,0	30,01	30,01
	Heat Flow [kJ/h]	2,314e+008	8,521e+006	1,704e+008
	Name	Q-Cond-T105		
	Vapour	<empty>		
Temperature [C]	<empty>			
Pressure [kPa]	<empty>			
Molar Flow [kgmole/h]	<empty>			
Mass Flow [kg/h]	<empty>			
Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	<empty>			
Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	<empty>			
Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	<empty>			
Heat Flow [kJ/h]	5,242e+007			

Figura 11.3.4. Propiedades de las corrientes de entrada y salida al condensador CD-402.

Worksheet		To Condenser	T105-Top	Reflux
Conditions	Propene	0,000000	0,000000	0,000000
	Ammonia	0,000000	0,000000	0,000000
Properties	Oxygen	0,000000	0,000000	0,000000
	AcryloNitril	0,000000	0,000000	0,000000
Composition	H2O	0,000000	0,000000	0,000000
	Acrolein	0,000000	0,000000	0,000000
PF Specs	AcetoNitrile	0,000000	0,000000	0,000000
	CO2	0,000000	0,000000	0,000000
	CO	0,000000	0,000000	0,000000
	HCN	1,000000	1,000000	1,000000
	Nitrogen	0,000000	0,000000	0,000000
	H2SO4	0,000000	0,000000	0,000000
	EGlycol	0,000000	0,000000	0,000000
	(NH4)2SO4*	0,000000	0,000000	0,000000

Figura 11.3.5. Composición (fracción molar) de las corrientes de entrada y salida al condensador CD-402.

Planta de producción de Acrilonitrilo

11. Manual de cálculos

Worksheet	Name	To Condenser	oooo3	Reflux
Conditions	Vapour	1,0000	0,0000	0,0000
	Temperature [C]	38,23	38,22	38,22
	Pressure [kPa]	25,00	25,00	25,00
	Molar Flow [kgmole/h]	3202	123,2	3079
	Mass Flow [kg/h]	1,697e+005	6526	1,632e+005
	Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	210,8	8,108	202,7
	Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	1,852e+005	1,504e+005	1,504e+005
	Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	149,7	37,82	37,82
	Heat Flow [kJ/h]	5,931e+008	1,852e+007	4,630e+008
	PF Specs	Name	Q-103	
Vapour		<empty>		
Temperature [C]		<empty>		
Pressure [kPa]		<empty>		
Molar Flow [kgmole/h]		<empty>		
Mass Flow [kg/h]		<empty>		
Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]		<empty>		
Molar Enthalpy [kJ/kgmole]		<empty>		
Molar Entropy [kJ/kgmole-C]		<empty>		
Heat Flow [kJ/h]		1,115e+008		

Figura 11.3.6. Propiedades de las corrientes de entrada y salida al condensador CD-403.

Worksheet	To Condenser	oooo3	Reflux
Composition	Propene	0,00000	0,00000
	Ammonia	0,00000	0,00000
	Oxygen	0,00000	0,00000
	AcryloNitril	0,99440	0,99440
	H2O	0,00041	0,00041
	Acrolein	0,00007	0,00007
	AcetoNitrile	0,00511	0,00511
	CO2	0,00000	0,00000
	CO	0,00000	0,00000
	HCN	0,00001	0,00001
	Nitrogen	0,00000	0,00000
	H2SO4	0,00000	0,00000
	EGlycol	0,00000	0,00000
	(NH4)2SO4*	0,00000	0,00000

Figura 11.3.7. Composición (fracción molar) de las corrientes de entrada y salida al condensador CD-403.

11. Manual de cálculos

Con esta información, se ha utilizado el programa Exchanger Design and Rating de la familia AspenTech pensado explícitamente para el diseño de intercambiadores de calor. Así, los condensadores serán asimilados a intercambiadores de calor de carcasa y tubos.

Para refrigerar el fluido de proceso y condensarlo para ser devuelto en parte a la columna como reflujo y parte como destilado, se ha utilizado agua glicolada al 40% a -8°C y 2 bar de presión.

Las figuras 11.3.8 y 11.3.9 muestran la forma en la que se han introducidos los datos de CD-401, a modo de ejemplo.

	Hot Stream (1) Tube Side		Cold Stream (2) Shell Side	
	In	Out	In	Out
Fluid name	D-401		W-401	
Mass flow rate (total)	kg/h	172600		
Temperature	C		-20	20
Vapor mass fraction		1 0		
Operating pressure (absolute)	bar	1 0.89	2	1.88
Pressure at liquid surface in column				
Heat exchanged	kW			
Adjust if over-specified	Heat load		Heat load	
Estimated pressure drop	bar	0.11	0.12	
Allowable pressure drop	bar	0.11	0.4	
Fouling resistance	$\text{m}^2\text{K/W}$	0	0	

Figura 11.3.8. Introducción de información de las corrientes de entrada y salida en Exchanger Design and Rating.

11. Manual de cálculos

Physical property package

Hot side composition specification

	Aspen Component Name	Composition	Aspen Formula
1	PROPYLENE	0	C3H6-2
2	AMMONIA	0	H3N
3	OXYGEN	0	O2
4	ACRYLONITRILE	48.155	C3H3N
5	WATER	22.124	H2O
6	ACROLEIN	0.019	C3H4O
7	ACETONITRILE	0.269	C2H3N
8	CARBON-DIOXIDE	0	CO2
9	CARBON-MONOXIDE	0	CO
10	HYDROGEN-CYANIDE	29.433	CHN
11	NITROGEN	0	N2
12			
13			

Figura 11.3.9. Introducción de información de la composición en Exchanger Design and Rating.

En base a la información introducida, el programa utiliza un método iterativo para encontrar el diseño óptimo del intercambiador de carcasa y tubos. Las figuras 11.3.10-11.3.12 muestran los resultados obtenidos para los condensadores CD-401, CD-402 y CD-403, respectivamente.

Esta información es la que se encuentra reflejada en las hojas de especificación de los condensadores en el apartado de equipos.

Planta de producción de Acrilonitrilo

11. Manual de cálculos

6	Size	950 - 2550	mm	Type	BEM	Hor	Connected in	2 parallel	1 series
7	Surf/unit(eff.)	360.5	m ²	Shells/unit	2		Surf/shell (eff.)		180.3 m ²
8	PERFORMANCE OF ONE UNIT								
9	Fluid allocation				Shell Side		Tube Side		
10	Fluid name				W-401		D-401		
11	Fluid quantity, Total				1141452		172600		
12	Vapor (In/Out)	kg/s			0	0	47.9444	0	
13	Liquid	kg/s			317.07	317.07	0	47.9444	
14	Noncondensable	kg/s			0	0	0	0	
15									
16	Temperature (In/Out)	°C			-20	20	65.11	53.28	
17	Dew / Bubble point	°C					65.11	56.71	
18	Density	Vapor/Liquid	kg/m ³		/ 1039.32	/ 1024.74	1.36 /	/ 735.45	
19	Viscosity	mPa s			/ 9.758	/ 2.3473	0.0065 /	/ 0.2599	
20	Molecular wt, Vap						37.61		
21	Molecular wt, NC								
22	Specific heat	kJ/(kg K)			/ 3.712	/ 3.792	1.403 /	/ 2.36	
23	Thermal conductivity	W/(m K)			/ 0.447	/ 0.4541	0.0132 /	/ 0.1709	
24	Latent heat	kJ/kg					805	896	
25	Pressure (abs)	bar			2	1.74463	1	0.91162	
26	Velocity	m/s			1.43		82.53		
27	Pressure drop, allow./calc.	bar			0.4	0.25537	0.11	0.08838	
28	Fouling resist. (min)	m ² K/W			0		0	0	Ao based
29	Heat exchanged	42056.7	kW		MTD corrected			57.83 °C	
30	Transfer rate, Service	2017.1	Dirty		2113.8	Clean		2113.8	W/(m ² K)
31	CONSTRUCTION OF ONE SHELL						Sketch		
32				Shell Side		Tube Side			
33	Design/vac/test pressure:g	bar		3/ /	3/ /				
34	Design temperature	°C		55		55			
35	Number passes per shell			1		1			
36	Corrosion allowance	mm		3.18		3.18			
37	Connections	In	mm	1	406.4/ -	1	508/ -		
38	Size/rating	Out		1	355.6/ -	1	152.4/ -		
39	Nominal	Intermediate			/ -		/ -		
40	Tube No. 1233	OD 19.05	TksAvg 2.11	mm	Length 2550	mm	Pitch 23.81		
41	Tube type Plain	#/m	Material Carbon Steel		Tube pattern 30				
42	Shell Carbon Steel	ID 950	OD 974	mm	Shell cover -				
43	Channel or bonnet Carbon Steel				Channel cover -				
44	Tubesheet-stationary Carbon Steel				Tubesheet-floating -				
45	Floating head cover -				Impingement protection None				
46	Baffle-crossing Carbon Steel	Type Single segmental	Cut(%d) 34.8	H Spacing: c/c 585	mm				
47	Baffle-long -	Seal type			Inlet 928.98	mm			
48	Supports-tube	U-bend			Type				
49	Bypass seal				Tube-tubesheet joint Exp.				
50	Expansion joint -	Type None							
51	RhoV2-Inlet nozzle 1741	Bundle entrance 1153	Bundle exit 2294	kg/(m s ²)					
52	Gaskets - Shell side -	Tube Side	Flat Metal Jacket Fibe						
53	Floating head -								
54	Code requirements	ASME Code Sec VIII Div 1			TEMA class R - refinerv service				
55	Weight/Shell 5013.2	Filled with water 7346.3	Bundle 3263.7	kg					
56	Remarks								
57									
58									

Figura 11.3.10. Resultados de diseño para el condensador CD-401.

Planta de producción de Acrilonitrilo

11. Manual de cálculos

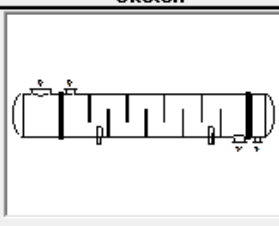
6	Size	1025 - 5850	mm	Type	BEM	Hor	Connected in	1 parallel	1 series			
7	Surf/unit (eff.)	512.1	m ²	Shells/unit	1		Surf/shell (eff.)	512.1	m ²			
8	PERFORMANCE OF ONE UNIT											
9	Fluid allocation				Shell Side		Tube Side					
10	Fluid name				W-402		D-402					
11	Fluid quantity, Total	kg/h			342672		47960					
12	Vapor (In/Out)	kg/s			0		13.3222					
13	Liquid	kg/h			342672		47960					
14	Noncondensable	kg/s			0		0					
15												
16	Temperature (In/Out)	°C			-20		20		25.7			
17	Dew / Bubble point	°C							25.7			
18	Density	Vapor/Liquid	kg/m ³		/ 1091.89		/ 1069.64		1.09 /			
19	Viscosity			mPa s		/ 35.7552		/ 6.2574				
20	Molecular wt, Vap						27.03					
21	Molecular wt, NC											
22	Specific heat			kJ/(kg K)		/ 3.176		/ 3.305				
23	Thermal conductivity			W/(m K)		/ 0.3864		/ 0.395				
24	Latent heat			kJ/kg				937.2				
25	Pressure (abs)			bar		2		1.64838				
26	Velocity			m/s		0.77		47.55				
27	Pressure drop, allow./calc.			bar		0.4		0.35162				
28	Fouling resist. (min)			m ² K/W		0		0				
29	Heat exchanged	12610.2	kW				MTD corrected		17.2 °C			
30	Transfer rate, Service	1431.4	Dirty		1447.6	Clean		1447.6	W/(m ² K)			
31	CONSTRUCTION OF ONE SHELL				Sketch							
32			Shell Side		Tube Side							
33	Design/vac/test pressure:g	bar		3/ /		3/ /						
34	Design temperature	°C		55		55						
35	Number passes per shell			1		1						
36	Corrosion allowance	mm		3.18		3.18						
37	Connections	In	mm		1	304.8/				-	1	558.8/
38	Size/rating	Out			1	254/				-	1	152.4/
39	Nominal	Intermediate		/ -		/ -						
40	Tube No.	1491	OD	19.05	TksAvg	2.11				mm	Length	5850
41	Tube type	Plain		#/m	Material	Carbon Steel		Tube pattern	30			
42	Shell	Carbon Steel		ID	1025	OD	1051	mm	Shell cover			
43	Channel or bonnet	Carbon Steel				Channel cover		-				
44	Tubesheet-stationary	Carbon Steel				Tubesheet-floating		-				
45	Floating head cover	-				Impingement protection		None				
46	Baffle-crossing	Carbon Steel		Type	Single segmental		Cut(%d)	35.92	H Spacing: c/c			
47	Baffle-long	-		Seal type			Inlet	821.98	mm			
48	Supports-tube	U-bend				Type						
49	Bypass seal			Tube-tubesheet joint		Exp.						
50	Expansion joint	-		Type	None							
51	RhoV2-Inlet nozzle	1559		Bundle entrance	752		Bundle exit	902	kg/(m s ²)			
52	Gaskets - Shell side	-		Tube Side		Flat Metal Jacket Fibe						
53	Floating head	-										
54	Code requirements	ASME Code Sec VIII Div 1				TEMA class	R - refinerv service					
55	Weight/Shell	11647.9		Filled with water	16573.6		Bundle	8475.9	kg			
56	Remarks											
57												
58												

Figura 11.3.11. Resultados de diseño para el condensador CD-402.

Planta de producción de Acrilonitrilo

11. Manual de cálculos

6	Size	600 - 2100	mm	Type	BEM	Hor	Connected in	1 parallel	1 series	
7	Surf/unit (eff.)	60.3	m ²	Shells/unit	1		Surf/shell (eff.)	60.3	m ²	
8	PERFORMANCE OF ONE UNIT									
9	Fluid allocation				Shell Side		Tube Side			
10	Fluid name				W-402		D-402			
11	Fluid quantity, Total	kg/h				73087		14500		
12	Vapor (In/Out)	kg/s				0		4.0278		
13	Liquid	kg/s				20.302		0		
14	Noncondensable	kg/s				0		0		
15										
16	Temperature (In/Out)	°C				-20		20		
17	Dew / Bubble point	°C						42.36		
18	Density	Vapor/Liquid	kg/m ³				/ 1073.6		/ 1053.49	
19	Viscosity		mPa s				/ 25.6333		/ 5.7142	
20	Molecular wt, Vap						53.02			
21	Molecular wt, NC									
22	Specific heat	kJ/(kg K)				/ 3.198		/ 3.352		
23	Thermal conductivity	W/(m K)				/ 0.3922		/ 0.3831		
24	Latent heat	kJ/kg						653.8		
25	Pressure (abs)	bar				2		1.82313		
26	Velocity	m/s				1.08		76.92		
27	Pressure drop, allow./calc.	bar				0.4		0.17687		
28	Fouling resist. (min)	m ² K/W				0		0		
29	Heat exchanged	2689.1	kW				MTD corrected		35.13	
30	Transfer rate, Service	1289.6	Dirty	1282.3	Clean	1282.3			W/(m ² K)	
31	CONSTRUCTION OF ONE SHELL				Sketch					
32				Shell Side		Tube Side				
33	Design/vac/test pressure:g	bar	3/ /		3/ /					
34	Design temperature	°C	55		75					
35	Number passes per shell	1		1						
36	Corrosion allowance	mm	3.18		3.18					
37	Connections	In	mm	1	152.4/	-	1	304.8/		-
38	Size/rating	Out	mm	1	152.4/	-	1	76.2/		-
39	Nominal	Intermediate	/ -		/ -					
40	Tube No.	500	OD	19.05	TksAvg	2.11	mm	Length		2100
41	Tube type	Plain	#/m	Material			Carbon Steel	Tube pattern		30
42	Shell	Carbon Steel	ID	600	OD	620	mm	Shell cover	-	
43	Channel or bonnet	Carbon Steel				Channel cover			-	
44	Tubesheet-stationary	Carbon Steel				Tubesheet-floating			-	
45	Floating head cover	-				Impingement protection			None	
46	Baffle-crossing	Carbon Steel	Type	Single segmental		Cut(%d)	19.07	H	Spacing: c/c	
47	Baffle-long	-				Seal type	Inlet			
48	Supports-tube	U-bend				Type	287.48			
49	Bypass seal				Tube-tubesheet joint	Exp.				
50	Expansion joint	-				Type	None			
51	RhoV2-Inlet nozzle	1105	Bundle entrance		685	Bundle exit		698	kg/(m s ²)	
52	Gaskets - Shell side	-				Tube Side	Flat Metal Jacket Fibe			
53	Floating head									
54	Code requirements	ASME Code Sec VIII Div 1			TEMA class		R - refinerv service			
55	Weight/Shell	1832.2	Filled with water		2510.1	Bundle		1132.6	kg	
56	Remarks									
57										
58										

Figura 11.3.12. Resultados de diseño para el condensador CD-403.

Es importante destacar que aunque no sea especificado por el usuario, el programa diseñará el número de intercambiadores que sean necesarios para minimizar los costes. Así, para CD-401 se puede observar en la figura 11.3.10 que se han diseñado dos condensadores en paralelo.

11. Manual de cálculos

11.3.1. Diseño mecánico de los condensadores

Para el diseño mecánico de los tres condensadores anteriores se va a seguir usando el mismo programa Exchanger Design and Rating, ya que también proporciona esta información.

Las figuras 11.3.1.1-11.3.1.3 muestran los resultados proporcionados por el programa para los tres condensadores, que incluyen el diámetro externo e interno de la carcasa y los tubos.

Unit Configuration					
Exchanger Type		BEM	Tube number (calcs.)		1233
Position		Hor	Tube length actual	mm	2550
Arrangement		2 par 1 ser	Tube passes		1
Baffle type		Single segmental	Tube type		Plain
Baffle number		2	Tube O.D.	mm	19.05
Spacing (center-center)	mm	585	Tube pitch	mm	23.81
Spacing at inlet	mm	928.98	Tube pattern		30
		Shell	Kettle	Front head	Rear head
Outside diameter	mm	974		974	974
Inside Diameter	mm	950		950	950
		Shell Side		Tube Side	
Nozzle type		Inlet	Outlet	Inlet	Outlet
Number of nozzles		1	1	1	1
Actual outside diameter	mm	406.4	355.6	508	168.28
Inside diameter	mm	387.35	336.55	488.95	154.05
Height under nozzle	mm	135.52	53.03		
Dome inside diameter	mm				
Vapor belt inside diameter	mm				
Vapor belt inside width	mm				
Vapor belt slot area	mm ²				
Impingement protection		No impingement	No impingement	No impingement	
Distance to tubesheet	mm	2215	305		

Figura 11.3.1.1. Diseño mecánico del condensador CD-401.

Unit Configuration					
Exchanger Type		BEM	Tube number (calcs.)		1491
Position		Hor	Tube length actual	mm	5850
Arrangement		1 par 1 ser	Tube passes		1
Baffle type		Single segmental	Tube type		Plain
Baffle number		8	Tube O.D.	mm	19.05
Spacing (center-center)	mm	585	Tube pitch	mm	23.81
Spacing at inlet	mm	821.98	Tube pattern		30
		Shell	Kettle	Front head	Rear head
Outside diameter	mm	1051		1051	1051
Inside Diameter	mm	1025		1025	1025
		Shell Side		Tube Side	
Nozzle type		Inlet	Outlet	Inlet	Outlet
Number of nozzles		1	1	1	1
Actual outside diameter	cm	32.385	27.305	55.88	16.8275
Inside diameter	cm	30.48	25.4508	53.975	15.4051
Height under nozzle	mm	90.53	69.91		
Dome inside diameter	mm				
Vapor belt inside diameter	mm				
Vapor belt inside width	mm				
Vapor belt slot area	mm ²				
Impingement protection		No impingement	No impingement	No impingement	
Distance to tubesheet	mm	5555	265		

Figura 11.3.1.2. Diseño mecánico del condensador CD-402.

Unit Configuration					
Exchanger Type		BEM	Tube number (calcs.)		500
Position		Hor	Tube length actual	mm	2100
Arrangement		1 par 1 ser	Tube passes		1
Baffle type		Single segmental	Tube type		Plain
Baffle number		10	Tube O.D.	mm	19.05
Spacing (center-center)	mm	160	Tube pitch	mm	23.81
Spacing at inlet	mm	287.48	Tube pattern		30
		Shell	Kettle	Front head	Rear head
Outside diameter	mm	620		620	620
Inside Diameter	mm	600		600	600
		Shell Side		Tube Side	
Nozzle type		Inlet	Outlet	Inlet	Outlet
Number of nozzles		1	1	1	1
Actual outside diameter	mm	168.28	168.28	323.85	88.9
Inside diameter	mm	154.05	154.05	304.8	77.93
Height under nozzle	mm	43.01	43.01		
Dome inside diameter	mm				
Vapor belt inside diameter	mm				
Vapor belt inside width	mm				
Vapor belt slot area	mm ²				
Impingement protection		No impingement	No impingement	No impingement	
Distance to tubesheet	mm	1895	200		

Figura 11.3.1.3. Diseño mecánico del condensador CD-403.

11.3.2. Peso de los condensadores

El peso de los condensadores vacíos y en condiciones de operación también lo proporciona el programa Exchanger Design and Rating.

Los resultados para CD-401, CD-402 y CD-403 se muestran en las figuras 11.3.2.1-11.3.2.3, respectivamente.

Weights	kg
Shell	979.2
Front head	506.3
Rear head	264
Shell cover	
Bundle	3263.7
Total weight - empty	5013.2
Total weight - filled with water	7346.3

Figura 11.3.2.1. Peso del condensador CD-401.

Weights	kg
Shell	2206.9
Front head	641.9
Rear head	323.2
Shell cover	
Bundle	8475.9
Total weight - empty	11647.9
Total weight - filled with water	16573.6

Figura 11.3.2.2. Peso del condensador CD-402.

Weights	kg
Shell	427.5
Front head	183.8
Rear head	88.2
Shell cover	
Bundle	1132.6
Total weight - empty	1832.2
Total weight - filled with water	2510.1

Figura 11.3.2.3. Peso del condensador CD-403.

11.4. Diseño de los reboilers (RB-401, RB-402 y RB-403)

Los reboilers de las columnas de destilación son los encargados de evaporar parte del líquido que se obtiene por la parte inferior de la columna para que este retorne a ella y el vapor se siga enriqueciendo en los componentes más volátiles.

En esta apartado se va a detallar el procedimiento de cálculo que se ha seguido para los tres reboilers presentes en la planta, que al igual que los condensadores se han diseñado utilizando el programa de la familia AspenTech Exchanger Design and Rating, utilizando los datos que proporciona el programa Hysys.

El primer paso es obtener información de los corrientes de entrada y salida a los reboilers. Para ello, es necesario acceder al *Column Environment* de la columna en cuestión en el programa Hysys y entrar en la ventana del reboiler.

La figura 11.3.1 muestra un ejemplo de *Column Environment* y la caracterización de los corrientes se puede ver en las figuras 11.4.1-11.4.6 a continuación.

Worksheet	Name	To Reboiler	12F	Boilup
Conditions	Vapour	0,0000	0,0000	1,0000
	Temperature [C]	76,85	96,41	96,41
Properties	Pressure [kPa]	100,0	100,0	100,0
	Molar Flow [kgmole/h]	1,256e+004	8930	3633
Composition	Mass Flow [kg/h]	2,407e+005	1,617e+005	7,904e+004
	Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	246,7	162,4	84,30
PF Specs	Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	-2,663e+005	-2,783e+005	-1,928e+005
	Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	63,59	72,82	180,9
	Heat Flow [kJ/h]	-3,346e+009	-2,485e+009	-7,004e+008

Figura 11.4.1. Propiedades de las corrientes de entrada y salida al reboiler RB-401.

Worksheet		To Reboiler	12F	Boilup
Conditions	Propene	0,0000	0,0000	0,0000
	Ammonia	0,0000	0,0000	0,0000
	Oxygen	0,0000	0,0000	0,0000
Composition	AcryloNitril	0,0300	0,0021	0,0984
	H2O	0,9656	0,9970	0,8884
	Acrolein	0,0000	0,0000	0,0000
	AcetoNitrile	0,0041	0,0008	0,0121
	CO2	0,0000	0,0000	0,0000
	CO	0,0000	0,0000	0,0000
	HCN	0,0004	0,0001	0,0011
	Nitrogen	0,0000	0,0000	0,0000
	H2SO4	0,0000	0,0000	0,0000
	EGlycol	0,0000	0,0000	0,0000
PF Specs	[NH4]2SO4*	0,0000	0,0000	0,0000
	Air	0,0000	0,0000	0,0000

Figura 11.4.2. Composición (fracción molar) de las corrientes de entrada y salida al reboiler RB-401.

Planta de producción de Acrilonitrilo

11. Manual de cálculos

Worksheet	Name	To Reboiler	T105-Bottoms	Boilup
Conditions	Vapour	0,0000	0,0000	1,0000
	Temperature [C]	73,73	73,75	73,75
Properties	Pressure [kPa]	100,0	100,0	100,0
	Molar Flow [kgmole/h]	1411	178,3	1232
Composition	Mass Flow [kg/h]	5,959e+004	7600	5,199e+004
	Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	72,16	9,213	62,95
PF Specs	Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	2,097e+004	2,578e+004	5,550e+004
	Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	59,19	59,00	160,8
	Heat Flow [kJ/h]	2,958e+007	4,596e+006	6,840e+007

Figura 11.4.3. Propiedades de las corrientes de entrada y salida al reboiler RB-402.

Worksheet		To Reboiler	T105-Bottoms	Boilup
Conditions	Propene	0,0000	0,0000	0,0000
	Ammonia	0,0000	0,0000	0,0000
Properties	Oxygen	0,0000	0,0000	0,0000
	AcryloNitril	0,6883	0,6995	0,6866
Composition	H2O	0,3070	0,2960	0,3086
	Acrolein	0,0001	0,0000	0,0001
PF Specs	AcetoNitrile	0,0043	0,0043	0,0043
	CO2	0,0000	0,0000	0,0000
	CO	0,0000	0,0000	0,0000
	HCN	0,0003	0,0001	0,0003
	Nitrogen	0,0000	0,0000	0,0000
	H2SO4	0,0000	0,0000	0,0000
	EGlycol	0,0000	0,0000	0,0000
	(NH4)2SO4*	0,0000	0,0000	0,0000
	Air	0,0000	0,0000	0,0000

Figura 11.4.4. Composición (fracción molar) de las corrientes de entrada y salida al reboiler RB-402.

Worksheet	Name	To Reboiler	bbbbbb3	Boilup
Conditions	Vapour	0,0000	0,0000	1,0000
	Temperature [C]	42,84	42,85	42,85
Properties	Pressure [kPa]	30,00	30,00	30,00
	Molar Flow [kgmole/h]	3247	2,287	3245
Composition	Mass Flow [kg/h]	1,701e+005	119,7	1,700e+005
	Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	211,6	0,1489	211,5
PF Specs	Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	1,462e+005	1,458e+005	1,807e+005
	Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	42,38	42,59	151,5
	Heat Flow [kJ/h]	4,748e+008	3,335e+005	5,864e+008

Figura 11.4.5. Propiedades de las corrientes de entrada y salida al reboiler RB-403.

Planta de producción de Acrilonitrilo

11. Manual de cálculos

Worksheet	To Reboiler	bbbb3	Boilup
Propene	0,0000	0,0000	0,0000
Ammonia	0,0000	0,0000	0,0000
Oxygen	0,0000	0,0000	0,0000
AcryloNitril	0,9435	0,9392	0,9435
H2O	0,0000	0,0000	0,0000
Acrolein	0,0000	0,0000	0,0000
AcetoNitrile	0,0565	0,0608	0,0565
CO2	0,0000	0,0000	0,0000
CO	0,0000	0,0000	0,0000
HCN	0,0000	0,0000	0,0000
Nitrogen	0,0000	0,0000	0,0000
H2SO4	0,0000	0,0000	0,0000
EGlycol	0,0000	0,0000	0,0000
(NH4)2SO4*	0,0000	0,0000	0,0000
Air	0,0000	0,0000	0,0000

Figura 11.4.6. Composición (fracción molar) de las corrientes de entrada y salida al reboiler RB-403.

Con esta información, se ha utilizado el programa Exchanger Design and Rating de la familia AspenTech pensado explícitamente para el diseño de intercambiadores de calor. Así, los reboilers serán asimilados a intercambiadores de calor de carcasa y tubos. En este caso es importante indicar que se requiere un intercambiador tipo kettle reboiler, ya que interesa que el fluido de proceso a la salida este formado por una fase líquida y otra vapor.

Para calentar el fluido de proceso que llega de la columna y entra al reboiler se ha utilizado vapor de servicio proveniente de caldera, que se encuentra a 250°C y a 20bar de presión.

Las figuras 11.4.7 y 11.4.8 presentadas anteriormente muestran la forma en la que se deben introducir los datos en el programa para el reboiler RB-401, a modo de ejemplo.

	Hot Stream (1) Tube Side		Cold Stream (2) Shell Side	
	In	Out	In	Out
Fluid name	Vap-401		R-401	
Mass flow rate (total)	kg/h			240400
Temperature	C	250	96.4	
Vapor mass fraction		1 0	0	0.327
Operating pressure (absolute)	bar	20 19.7	1	0.89
Pressure at liquid surface in column				
Heat exchanged	kW			
Adjust if over-specified	Heat load		Heat load	
Estimated pressure drop	bar	0.3	0.11	
Allowable pressure drop	bar	0.3	0.2	
Fouling resistance	m ² K/W	0	0	

Figura 11.4.7. Introducción de información de las corrientes de entrada y salida en Exchanger Design and Rating.

11. Manual de cálculos

The screenshot displays the configuration interface for a heat exchanger. At the top, three icons represent different exchanger types: a vertical shell and tube exchanger, a kettle, and a U-tube bundle. Below these are several dropdown menus and input fields for configuration:

- Front head type: B - bonnet bolted or integral with tubesheet
- Shell type: K - kettle
- Rear head type: U - U-tube bundle
- Exchanger position: Horizontal
- Location of front head for vertical units: Set default
- "E" shell flow direction (inlet nozzle location): Set default
- Double pipe or hairpin unit shell pitch: [] mm
- Tubeside inlet at front head: Set default
- Flow within multi-tube hairpin (M-shell): Set default
- Overall flow for multiple shells: Set default

At the bottom, there is a table for defining dimensions for different components:

	mm	ID	OD	Thickness	series	parallel
Shell(s)	[mm]	[]	[]	[]	[]	[]
Front head	[mm]	[]	[]	[]	[]	[]
Rear head	[mm]	[]	[]	[]	[]	[]
Kettle	[mm]	[]	[]	[]	[]	[]

Figura 11.4.8. Introducción de información sobre la geometría del intercambiador en Exchanger Design and Rating.

Utilizando un método iterativo, el programa genera un diseño del reboiler en base a la información introducida que minimice los costes del equipo.

Las figuras 11.4.9-11.4.11 muestran los resultados de diseño obtenidos para los reboilers RB-401, RB-402 y RB-403, respectivamente.

Planta de producción de Acrilonitrilo

11. Manual de cálculos

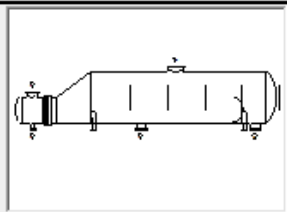
6	Size	627 / 1253	5850	mm	Type	BKU	Hor	Connected in	3 parallel	1 series		
7	Surf/unit(eff.)	549.8		m ²	Shells/unit	3	Surf/shell (eff.)		183.3 m ²			
8	PERFORMANCE OF ONE UNIT											
9	Fluid allocation					Shell Side			Tube Side			
10	Fluid name					R-401			Vap-401			
11	Fluid quantity, Total					240400			84976			
12	Vapor (In/Out)					kg/s		0	21.7476	23.6044	0	
13	Liquid					kg/s		66.7778	45.0302	0	23.6044	
14	Noncondensable					kg/s		0	0	0	0	
15												
16	Temperature (In/Out)					°C		96.4	97.15	250	211.74	
17	Dew / Bubble point					°C		99.05		212.57		
18	Density	Vapor/Liquid		kg/m ³		/ 950.64		0.59 / 968.11		8.79 /		
19	Viscosity					mPa s		/ 0.2925		0.0119 / 0.292		
20	Molecular wt, Vap							18.7		18.01		
21	Molecular wt, NC											
22	Specific heat					kJ/(kg K)		/ 4.125		1.968 / 4.238		
23	Thermal conductivity					W/(m K)		/ 0.6539		0.0237 / 0.6891		
24	Latent heat					kJ/kg		2186.3		1894		
25	Pressure (abs)					bar		1		0.91839		
26	Velocity					m/s		15.58		20.22		
27	Pressure drop, allow./calc.					bar		0.2		0.08161		
28	Fouling resist. (min)					m ² K/W		0		0		
29	Heat exchanged	47281.5		kW		MTD corrected			96.63 °C			
30	Transfer rate, Service	890		Dirty		1058.3		Clean		1058.3 W/(m ² K)		
31	CONSTRUCTION OF ONE SHELL											
32					Shell Side			Tube Side			Sketch 	
33	Design/vac/test pressure:g	bar		3/ /		22/ /						
34	Design temperature					°C		285		285		
35	Number passes per shell					1		2				
36	Corrosion allowance					mm		3.18		3.18		
37	Connections	In		mm		1		254/ -		1		
38	Size/rating	Out		mm		1		457.2/ -		1		
39	Nominal	Intermediate				/ -		/ -		/ -		
40	Tube No. 256	OD 19.05		TksAvg 2.11		mm		Length 5850		mm Pitch 23.81 mm		
41	Tube type Plain					#/m		Material Carbon Steel		Tube pattern 30		
42	Shell Carbon Steel	ID 627		OD 647		mm		Shell cover Carbon Steel				
43	Channel or bonnet Carbon Steel							Channel cover -				
44	Tubesheet-stationary Carbon Steel							Tubesheet-floating -				
45	Floating head cover -							Impingement protection None				
46	Baffle-crossing Carbon Steel	Type Unbaffled		Cut(%d)				Spacing: c/c		mm		
47	Baffle-long -					Seal type		Inlet		mm		
48	Supports-tube					U-bend		Type				
49	Bypass seal					Tube-tubesheet joint		Exp.				
50	Expansion joint -					Type None						
51	RhoV2-Inlet nozzle	201		Bundle entrance 3				Bundle exit 195		kg/(m s ²)		
52	Gaskets - Shell side	Flat Metal Jacket Fibe		Tube Side				Flat Metal Jacket Fibe				
53	Floating head											
54	Code requirements	ASME Code Sec VIII Div 1						TEMA class R - refinerv service				
55	Weight/Shell	6299.6		Filled with water 14611.2				Bundle 2934.1		kg		
56	Remarks											
57												
58												

Figura 11.4.9. Resultados de diseño para el reboiler RB-401.

Planta de producción de Acrilonitrilo

11. Manual de cálculos

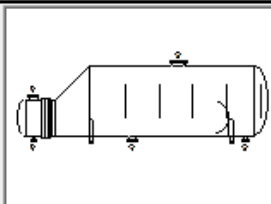
6	Size	927 / 1853	5850	mm	Type	BKU	Hor	Connected in	1 parallel	1 series					
7	Surf/unit(eff.)	433		m ²	Shells/unit	1		Surf/shell (eff.)	433 m ²						
8	PERFORMANCE OF ONE UNIT														
9	Fluid allocation					Shell Side			Tube Side						
10	Fluid name					R-402			Vap-402						
11	Fluid quantity, Total					16.575			6.3152						
12	Vapor (In/Out)					0		52050		22735					
13	Liquid					59670		7620		0					
14	Noncondensable					0		0		0					
15															
16	Temperature (In/Out)					73.73		84.11		250					
17	Dew / Bubble point							85.97		212.56					
18	Density Vapor/Liquid					/ 799.27		1.29 / 811.48		8.8 / / 855.26					
19	Viscosity					/ 0.2604		0.0094 / 0.2641		0.0183 / / 0.138					
20	Molecular wt, Vap							42.53		18.01					
21	Molecular wt, NC														
22	Specific heat					/ 2.668		1.434 / 2.882		2.578 / / 4.396					
23	Thermal conductivity					/ 0.2225		0.0175 / 0.2771		0.0418 / / 0.6514					
24	Latent heat							845.8		1894					
25	Pressure (abs)					1		0.90208		20					
26	Velocity					10.36			6.95						
27	Pressure drop, allow./calc.					0.2		0.09792		0.3					
28	Fouling resist. (min)					0				0					
29	Heat exchanged	12648.9		kW		MTD corrected			116.16 °C						
30	Transfer rate, Service	251.5		Dirty		255.5		Clean		255.5 W/(m ² K)					
31	CONSTRUCTION OF ONE SHELL					Sketch									
32		Shell Side			Tube Side										
33	Design/vac/test pressure:g	bar			3/ /							22/ /			
34	Design temperature	°C			285							285			
35	Number passes per shell				1							2			
36	Corrosion allowance	mm			3.18							3.18			
37	Connections	In	mm		1	203.2/ -						1	254/ -		
38	Size/rating	Out			1	508/ -						1	76.2/ -		
39	Nominal	Intermediate			/	/ -						/	/ -		
40	Tube No. 598	OD	19.05		Tks-Avg	2.11						mm	Length	5850	
41	Tube type	Plain			#/m	Material						Carbon Steel			
42	Shell	Carbon Steel			ID	927		OD	951						
43	Channel or bonnet	Carbon Steel			Shell cover	Carbon Steel			Channel cover	-					
44	Tubesheet-stationary	Carbon Steel			Tubesheet-floating	-			Impingement protection	None					
45	Floating head cover	-			Spacing: c/c	mm									
46	Baffle-crossing	Carbon Steel			Type	Unbaffled			Cut(%d)						
47	Baffle-long	-			Seal type				Inlet	mm					
48	Supports-tube	U-bend			Type										
49	Bypass seal				Tube-tubesheet joint	Exp.									
50	Expansion joint	-			Type	None									
51	RhoV2-Inlet nozzle	330		Bundle entrance	3		Bundle exit	149		kg/(m s ²)					
52	Gaskets - Shell side	Flat Metal Jacket Fibe			Tube Side	Flat Metal Jacket Fibe									
53	Floating head	-													
54	Code requirements	ASME Code Sec VIII Div 1			TEMA class	R - refinerv service									
55	Weight/Shell	13198.3		Filled with water	32162.6		Bundle	7010.3		kg					
56	Remarks														
57															
58															

Figura 11.4.10. Resultados de diseño para el reboiler RB-402.

Planta de producción de Acrilonitrilo

11. Manual de cálculos

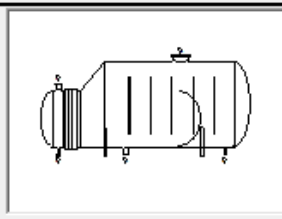
6	Size	2452 / 3685	6000	mm	Type	BKU	Hor	Connected in	1 parallel	1 series			
7	Surf/unit(eff.)	3583.4		m ²	Shells/unit	1	Surf/shell (eff.)			3583.4 m ²			
8	PERFORMANCE OF ONE UNIT												
9	Fluid allocation					Shell Side		Tube Side					
10	Fluid name					R-403		Vap-403					
11	Fluid quantity, Total					15.1944		4.9203					
12	Vapor (In/Out)					0		54585		17713	0		
13	Liquid					54700		115		0	17713		
14	Noncondensable					0		0		0	0		
15													
16	Temperature (In/Out)					42.43		37.47		250	211.58		
17	Dew / Bubble point									212.59	212.6		
18	Density	Vapor/Liquid		kg/m ³	0.6 / 793.23		0.56 / 810.47		8.8 /		/ 855.3		
19	Viscosity					0.0077 / 0.2352		0.008 / 0.2282		0.0183 / / 0.138			
20	Molecular wt, Vap					52.81		52.81		18.01			
21	Molecular wt, NC												
22	Specific heat					1.246 / 2.328		1.216 / 2.316		2.578 / / 4.396			
23	Thermal conductivity					0.0134 / 0.1616		0.0139 / 0.1602		0.0418 / / 0.6515			
24	Latent heat					655.9		662		1894			
25	Pressure (abs)					0.3		0.24712		20			
26	Velocity					0.08		0.08		0.71			
27	Pressure drop, allow./calc.					0.06		0.05288		0.3			
28	Fouling resist. (min)					0		0		0 Ao based			
29	Heat exchanged	9855.1		kW			MTD corrected		179.88		°C		
30	Transfer rate, Service	15.9		Dirty	833.8		Clean		833.8		W/(m ² K)		
31	CONSTRUCTION OF ONE SHELL												
32					Shell Side		Tube Side						
33	Design/vac/test pressure:g	bar		3/ /		22/ /							
34	Design temperature					285		285					
35	Number passes per shell					1		2					
36	Corrosion allowance					3.18		3.18					
37	Connections	In	mm		1	254/ -	1	254/ -					
38	Size/rating	Out	mm		1	914.4/ -	1	50.8/ -					
39	Nominal	Intermediate		/ -		/ -		/ -					
40	Tube No. 4570	OD	19.05	TksAvg	2.11	mm	Length	6000			mm	Pitch	23.81
41	Tube type	Plain		#/m	Material		Carbon Steel				Tube pattern	30	
42	Shell	Carbon Steel		ID	2452	OD	2478	mm	Shell cover	Carbon Steel			
43	Channel or bonnet	Carbon Steel				Channel cover		-					
44	Tubesheet-stationary	Carbon Steel				Tubesheet-floating		-					
45	Floating head cover	-				Impingement protection		None					
46	Baffle-crossing	Carbon Steel		Type	Unbaffled		Cut(%d)	Spacing: c/c		mm			
47	Baffle-long	-				Seal type		Inlet		mm			
48	Supports-tube	U-bend				Type							
49	Bypass seal	-				Tube-tubesheet joint		Exp.					
50	Expansion joint	-				Type		None					
51	RhoV2-Inlet nozzle	112		Bundle entrance	1		Bundle exit	59		kg/(m s ²)			
52	Gaskets - Shell side	Flat Metal Jacket Fibe		Tube Side		Flat Metal Jacket Fibe							
53	Floating head	-											
54	Code requirements	ASME Code Sec VIII Div 1				TEMA class		R - refinerv service					
55	Weight/Shell	85623.8		Filled with water	182914.6		Bundle	62327.8		kg			
56	Remarks												
57													
58													

Figura 11.4.11. Resultados de diseño para el reboiler RB-403.

Es importante destacar que aunque no sea especificado por el usuario, el programa diseñará el número de intercambiadores que sean necesarios para minimizar los costes. Así, para R-401 se puede observar en la figura 11.3.9 que se han diseñado tres reboilers en paralelo.

11.4.1. Diseño mecánico de los reboilers

Para el diseño mecánico de los tres condensadores anteriores se va a seguir usando el mismo programa Exchanger Design and Rating, ya que también proporciona esta información.

Las figuras 11.3.1.1-11.3.1.3 muestran los resultados proporcionados por el programa para los tres reboilers, que incluyen el diámetro externo e interno de la carcasa y los tubos.

Unit Configuration						
Exchanger Type		BKU	Tube number (calcs.)		512	
Position		Hor	Tube length actual	mm	5850	
Arrangement		3 par 1 ser	Tube passes		2	
Baffle type		Unbaffled	Tube type		Plain	
Baffle number		0	Tube O.D.	mm	19.05	
Spacing (center-center)	mm		Tube pitch	mm	23.81	
Spacing at inlet	mm		Tube pattern		30	
		Shell	Kettle	Front head	Rear head	
Outside diameter	mm	647	1280	647		
Inside Diameter	mm	627	1253.02	627		
		Shell Side			Tube Side	
Nozzle type		Inlet	Liquid outlet	Vapor outlet	Inlet	Outlet
Number of nozzles		1	1	1	1	1
Actual outside diameter	mm	273.05	273.05	457.2	323.85	88.9
Inside diameter	mm	254.51	254.51	438.15	304.8	77.93
Height under nozzle	mm	15.26	15.26	15.26		
Dome inside diameter	mm					
Vapor belt inside diameter	mm					
Vapor belt inside width	mm					
Vapor belt slot area	mm ²					
Impingement protection		No impingement	No impingement	No impingement		
Distance to tubesheet	mm	2955	6500	4035		

Figura 11.4.1.1. Diseño mecánico del condensador RB-401.

Planta de producción de Acrilonitrilo

11. Manual de cálculos

Unit Configuration						
Exchanger Type		BKU	Tube number (calcs.)			1196
Position		Hor	Tube length actual	mm		5850
Arrangement	1 par	1 ser	Tube passes			2
Baffle type		Unbaffled	Tube type			Plain
Baffle number		0	Tube O.D.	mm		19.05
Spacing (center-center)	mm		Tube pitch	mm		23.81
Spacing at inlet	mm		Tube pattern			30
		Shell	Kettle	Front head	Rear head	
Outside diameter	mm	951	1880	953		
Inside Diameter	mm	927	1853.28	927		
		Shell Side			Tube Side	
Nozzle type		Inlet	Liquid outlet	Vapor outlet	Inlet	Outlet
Number of nozzles		1	1	1	1	1
Actual outside diameter	mm	219.08	168.28	508	273.05	88.9
Inside diameter	mm	202.72	154.05	488.95	254.51	77.93
Height under nozzle	mm	10.6	10.6	10.6		
Dome inside diameter	mm					
Vapor belt inside diameter	mm					
Vapor belt inside width	mm					
Vapor belt slot area	mm ²					
Impingement protection		No impingement	No impingement	No impingement		
Distance to tubesheet	mm	2965	6800	4530		

Figura 11.4.1.2. Diseño mecánico del condensador RB-402.

Unit Configuration						
Exchanger Type		BKU	Tube number (calcs.)			9140
Position		Hor	Tube length actual	mm		6000
Arrangement	1 par	1 ser	Tube passes			2
Baffle type		Unbaffled	Tube type			Plain
Baffle number		0	Tube O.D.	mm		19.05
Spacing (center-center)	mm		Tube pitch	mm		23.81
Spacing at inlet	mm		Tube pattern			30
		Shell	Kettle	Front head	Rear head	
Outside diameter	mm	2478	3712	2506		
Inside Diameter	mm	2452	3685.66	2452		
		Shell Side			Tube Side	
Nozzle type		Inlet	Liquid outlet	Vapor outlet	Inlet	Outlet
Number of nozzles		1	1	1	1	1
Actual outside diameter	mm	273.05	48.26	914.4	273.05	60.32
Inside diameter	mm	254.51	40.89	895.35	254.51	52.5
Height under nozzle	mm	10.08	10.08	10.08		
Dome inside diameter	mm					
Vapor belt inside diameter	mm					
Vapor belt inside width	mm					
Vapor belt slot area	mm ²					
Impingement protection		No impingement	No impingement	No impingement		
Distance to tubesheet	mm	3100	8475	6075		

Figura 11.4.1.3. Diseño mecánico del condensador RB-403.

11.4.2. Peso de los reboilers

El peso de los condensadores vacíos y en condiciones de operación también lo proporciona el programa Exchanger Design and Rating.

Los resultados para RB-401, RB-402 y RB-403 se muestran en las figuras 11.4.2.1-11.4.2.3, respectivamente.

Weights	kg
Shell	3058.9
Front head	306.6
Rear head	0
Shell cover	
Bundle	2934.1
Total weight - empty	6299.6
Total weight - filled with water	14611.2

Figura 11.4.2.1. Peso del condensador RB-401.

Weights	kg
Shell	5609.9
Front head	578
Rear head	0
Shell cover	
Bundle	7010.3
Total weight - empty	13198.3
Total weight - filled with water	32162.6

Figura 11.4.2.2. Peso del condensador RB-402.

Weights	kg
Shell	18222.1
Front head	5074
Rear head	0
Shell cover	
Bundle	62327.8
Total weight - empty	85623.8
Total weight - filled with water	182914.6

Figura 11.4.2.3. Peso del condensador RB-403.

11.5. Diseño de la Caldera (CV-601/607)

Las calderas de Vapor son equipos de servicio diseñados para generar vapor. Este vapor se genera a través de una transferencia de calor a presión constante, en el cual el fluido, originalmente en estado líquido, se calienta y cambia de estado. Estos equipos tienen la función de suministrar el calor necesario a los equipos que lo requieren.

En vías los determinar el número y el tipo de caldera necesarios en nuestra planta, en primera instancia hemos de definir las condiciones del vapor de salida que requerimos.

En la Tabla 11.5.1, se definen las condiciones de operación de las calderas a implementar en la planta.

Tabla 11.5.1. Condiciones de Operación de la caldera

Condiciones de Operación de la Caldera	
Temperatura de entrada (-C)	105
Temperatura de Salida (-C)	250
Presión de operación (bar)	20
Cp agua (Kj/kg·C)	5,413
Calor latente (Kj/kg)	1894

Conocidas las características del vapor de las calderas en la tabla 11.5.1 y conociendo que nuestra planta requiere 177660 kg/h de vapor en total, para poder otorgar suficiente energía calorífica a los reboilers y a los intercambiadores E-413 y E414, es posible aplicar la siguiente ecuación para determinar la potencia calorífica requerida.

$$P_{calorífica} = m_{fluido} \cdot Cp_{fluido} \cdot (T_{salida} - T_{entrada})$$

Obteniendo de este modo, una potencia calorífica necesaria de 39462,27 kw.

11.5.1. Descripción del Equipo

En función de las condiciones de vapor requeridas, el caudal másico de vapor y la potencia calorífica necesaria, se ha escogido concretamente la caldera de 3 pasos del modelo BWR 270 de la casa Babcock Wanson, cuyo equipo se aprecia en la figura 11.5.1.1.

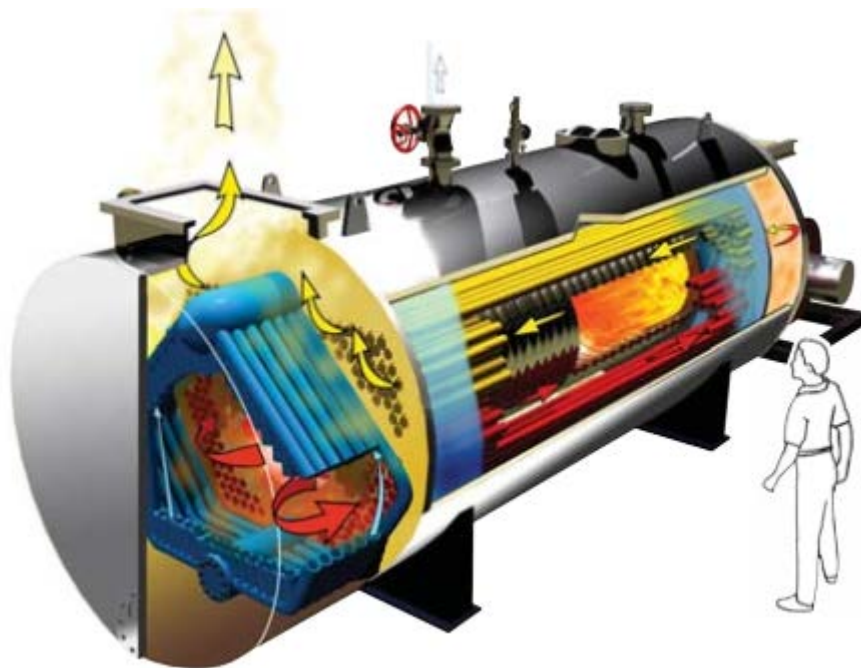


Figura 11.5.1.1 Ilustración de la caldera Babcock Wanson, modelo BWR 270

Y cuyas especificaciones se aprecian en la tabla 11.5.1.1.

Tabla 11.5.1.1 Especificaciones de la caldera

Especificaciones de las calderas	
Caudal másico de vapor (ton/h)	28.2
Salida en kw	18340
Temperatura optima de entrada(·C)	105
Presión de operación (bar)	20
Peso (kg)	84200
Volumen de total de agua (litros)	39152

De este modo, operando a 250·C necesitaríamos de 7 calderas de para poder cumplir con los requisitos de caudal másico.

11.5.2. Cálculo del combustible necesario

En la realización del cálculo de combustible necesario en cada caldera, es necesario conocer previamente la potencia nominal del equipo, lo cual se realiza mediante la siguiente ecuación.

$$P_{nominal} = F \cdot m_{vapor}$$

Por otro lado, el flujo volumétrico de combustible viene determinado, según la siguiente ecuación.

$$Combustible = \frac{P_{nominal}}{\eta \cdot PCI_{combustible}}$$

Y para calcular el rendimiento de la caldera, se ha hecho uso de la gráfica suministrada por el proveedor, la cual se aprecia en la figura 11.5.2.1.

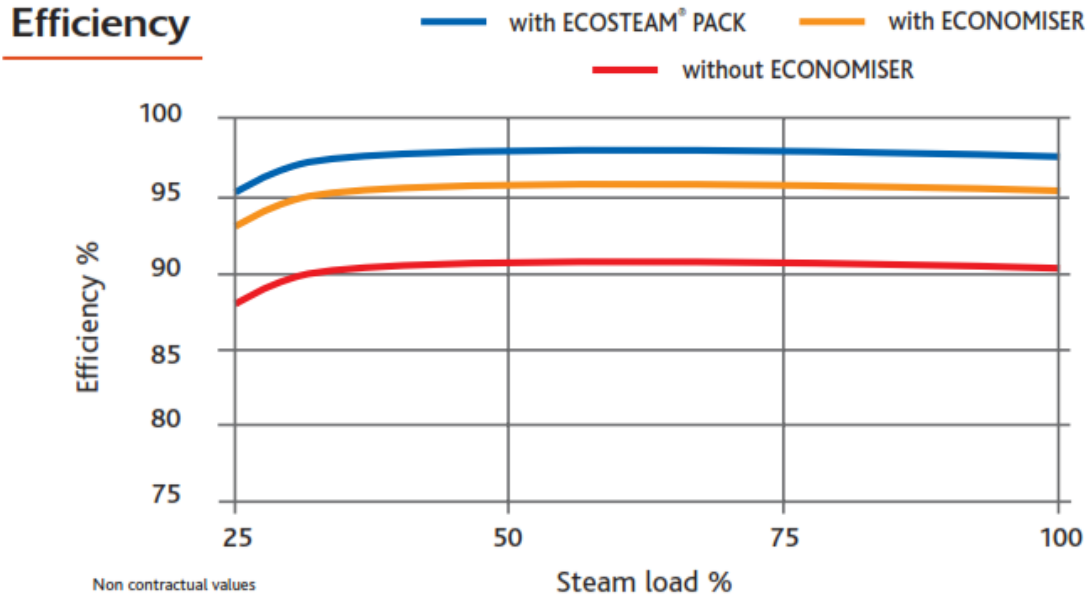


Figura 11.5.2.1 Rendimiento de la Caldera

Los resultados obtenidos del cálculo de 1 caldera, sumiendo una carga del 100 % con economizador, se aprecian en la tabla 11.5.2.1.

Caudal másico de vapor (ton/h)	28.2
Factor F	0.745
Potencia nominal (kw)	21009
PCI combustible (Kcal/m3)	10000
Rendimiento (%)	96
Combustible (m3/h)	2527.5

Tabla 11.5.2.1 Resultados del cálculo de la caldera con economizador

11.5.3. Ventajas del modelo BWR 270

El presente equipo posee las siguientes ventajas:

- Eficacias de hasta el 97%.
- Bajos niveles de NOx y CO2 en los gases exhaustos.
- Otorga gran flexibilidad en los requerimientos de de vapor, además de una puesta en marcha rápida.
- Sistema de super calentado.
- Otorga un vapor de calidad con un nivel de secado de hasta el 99.5 %.
- Opera con seguridad, al trabajar con un bajo nivel de agua, evitando así posibles rebalses.

11.6. Diseño del separador bifásico (S-401)

Nomenclatura

$A = \text{Área [m}^2\text{]}$

$d_N = \text{Diámetro de la tubería de entrada [m]}$

$D_v = \text{Diámetro interno mínimo del separador [m]}$

$H_C = \text{Grosor del separador de neblina [m]}$

H_D

$= \text{Altura entre el separador de neblina y el centro de la tubería de entrada [m]}$

$H_H = \text{Altura desde el nivel más bajo de líquido, hasta el nivel normal [m]}$

H_{LIN}

$= \text{Altura desde el nivel máximo de líquido, hasta el centro de la tubería de entrada [m]}$

$H_{LLL} = \text{Altura mínima del líquido [m]}$

H_{ME}

$= \text{Altura desde el eliminador de neblina, hasta la parte superior del separador [m]}$

$H_s = \text{Altura desde el nivel normal de líquido, hasta el máximo nivel de líquido [m]}$

$H_T = \text{Altura total del separador [m]}$

$K = \text{constante, función de la presión } \left[\frac{m}{s} \right]$

$Q_{v,l} = \text{Caudal volumétrico de líquido o vapor. } \left[\frac{m^3}{s} \right]$

$T_H = \text{Tiempo de residencia del líquido [min]}$

$T_s = \text{Tiempo de acumulación [min]}$

$U_t = \text{velocidad terminal del vapor } \left[\frac{m}{s} \right]$

$V_H = \text{Volumen normal retenido [m}^3\text{]}$

$V_s = \text{Volumen del pico acumulado [m}^3\text{]}$

$W_{v,l} = \text{Caudal másico de vapor o líquido } \left[\frac{kg}{h} \right]$

$\rho_{l,v} = \text{Densidad del líquido o vapor } \left[\frac{kg}{m^3} \right]$

11.6.1. Descripción del equipo

En nuestra planta dispondremos de un separador vertical bifásico, con el objetivo de separar la corriente 413 en una corriente líquida y una gaseosa, y así, solamente enviar al absorber los componentes volátiles que se han de tratar en él, evitando de este modo sobredimensionar la columna SC-401

En el separador bifásico, el fluido entra al separador usualmente a través de un difusor, la fuerza de la gravedad causa que el líquido se vaya hacia el fondo y el gas vaya hacia el domo del recipiente. La existencia de un tiempo de retención para el líquido en el separador ayuda a que el gas y líquido encuentren el equilibrio con la presión del sistema. En este sentido se ha escogido un separador bifásico vertical y no uno horizontal, ya que la proporción de gases en la corriente es mayor a la de líquido.

En conclusión el separador S-401 se diseñara como un separador vertical, de forma cilíndrica, con cabezal y fondo toriesféricos y separador de neblina la cual se aprecia en la figura 11.6.1.1.

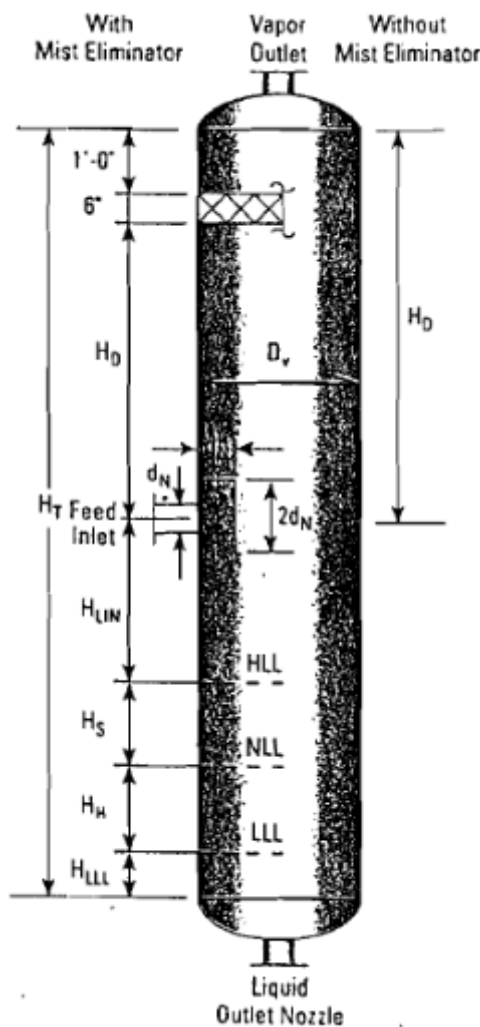


Figura 11.6.1.1. Esquema del Separador S-401

La corriente entrante al separador bifásico posee un caudal de 60991.88 kg/h, de la cual se obtiene una corriente gaseosa y una líquida, de 50004.36 y 10987.51 kg/h, respectivamente.

A continuación se detalla el diseño del separador vertical bifásico.

11.6.2. Diseño del separador bifásico vertical S-401

Para ello se han de seguir una serie de pasos, los cuales se explican a continuación:

1.- Se calcula la velocidad terminal del vapor en dirección vertical, mediante la siguiente ecuación.

$$U_t = K \cdot \left(\frac{\rho_l - \rho_v}{\rho_v} \right)^{\frac{1}{2}}$$

En la que se ha utilizado un factor K de 0.135 m/s, el cual se ha obtenido de la bibliografía, considerando un separador vertical bifásico equipado con un eliminador de neblina.

2.- Cálculo del caudal volumétrico de vapor.

$$Q_v = \frac{W_v}{\rho_v} \quad \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

3.- Cálculo del diámetro interno y del área transversal.

$$D_v = \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{Q_v}{U_t} \right)^{0.5} \quad [m]$$

$$A = \frac{\pi}{4} \cdot D_v^2 \quad [m^2]$$

En este punto hemos de redondear el diámetro mínimo y con ello recalculamos el área transversal del separador.

4.- Cálculo del caudal volumétrico de líquido.

$$Q_l = \frac{W_l}{\rho_l} \quad \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

5.- Se escoge un tiempo de residencia del líquido en el separador de 5 minutos, ya que según las fuentes consultadas, es lo más adecuado para un separador que esta antes de una columna.

Además de ello, se calcula el volumen del líquido dentro del separador.

11. Manual de cálculos

$$V_H = t_H \cdot Q_l \quad [m^3]$$

6.- Se selecciona un tiempo de acumulación de 3 minutos, correspondiente según la bibliografía a un separador que alimenta a una columna y se calcula el volumen retenido es este tiempo.

$$V_s = T_s \cdot Q_l$$

7.- Se selecciona la altura mínima de líquido (HIII) en el separador, siendo según la bibliografía consultada según nuestras condiciones de trabajo de 0.38 m.

8.- Se calcula la altura del nivel del líquido que va desde el nivel más bajo de líquido (HIII) hasta el nivel normal del separador.

$$H_H = \frac{V_H}{\frac{\pi}{4} \cdot D_v^2} \quad [m]$$

Este valor ha de ser como mínimo 0.3048 m, en el caso que en la realización de los cálculos este sea inferior, se escogerá el mínimo para calcular la altura total.

9.- Se calcula la altura desde el nivel normal de líquido hasta la altura máxima de líquido permitido.

$$H_s = \frac{V_s}{\frac{\pi}{4} \cdot D_v^2} \quad [m]$$

Este valor ha de ser como mínimo 0,15 metros.

10.- Se calcula la altura desde el nivel máximo de líquido, hasta el centro de la entrada al separador.

$$H_{LIN} = 12 + d_N$$

En la que d_N es el diámetro de la tubería de entrada al separador.

11.- Se calcula la distancia prevista para la descarga de la mezcla de entrada, es decir, la altura desde el centro de la entrada hasta la parte inferior del eliminador de neblina.

$$H_D = 0.75 \cdot D_v \quad [m]$$

12.- Se ha de tener en cuenta el espesor del eliminador de neblina, así como la distancia entre el eliminador y el cabezal superior del separador (HME).

Se escoge un eliminador de neblina de 0.3 m de grosor y una distancia entre el eliminador de neblina y el cabezal de 0.46m.

13.- Se ha de calcular la altura total del separador como el sumatorio de las alturas anteriores.

$$H_T = H_{LLL} + H_H + H_S + H_{LIN} + H_D + H_{ME} + H_C$$

14.- Se ha de ajustar los cálculos realizados, con el objetivo de cumplir la relación L/D de 1.5 a 3, para ello hemos de ajustar los valores de H_H y H_S aumentándolos hasta que se satisfaga la relación.

11.6.3. Diseño mecánico del separador bifásico

En este apartado se explicará el cálculo del espesor de pared tanto del cuerpo como de los cabezales del separador bifásico S-401.

Una vez se ha realizado el procedimiento de diseño del separador explicado en el 11.6.2, ya se tienen los datos necesarios para realizar el diseño mecánico. Éstos se encuentran resumidos en la tabla 11.6.3.1.

Tabla 11.6.3.1. Características y condiciones de operación del separador bifásico.

Parámetro	Nomenclatura	Valor
Diámetro interno (m)	D	2.1
Radio interno (m)	R	1.05
Altura (m)	H	17.6
Presión de operación (bar)	P_{op}	1
Presión de diseño (bar)	P	1.035
Temperatura de operación (°F)	$T_{m\acute{a}x}$	210.2

La tabla 11.6.3.2 recoge los demás parámetros necesarios para el cálculo del espesor de pared, así como la nomenclatura que se seguirá en las ecuaciones utilizadas a continuación.

Tabla 11.6.3.2. Parámetros para el cálculo del espesor de pared del separador bifásico.

Parámetro	Nomenclatura	Valor
Módulo de tensión del material (bar)	S	1228
Eficacia de la unión	E	0.85
Sobreespesor de corrosión (mm)	C_1	0.75
Tolerancia de fabricación (mm)	C_2	0.3
Factor M	M	1.54

Para conocer el espesor de pared del cuerpo del separador se ha aplicado la ecuación 11.6.3.1, que es válida para cuerpos cilíndricos.

$$t_{cuerpo} = \frac{PR}{SE + 0.4P} + C_1 \quad \text{Ecuación 11.6.3.1}$$

11. Manual de cálculos

Para el cabezal, se debe aplicar la ecuación 11.6.3.2, que es válida para cabezales toriesféricos. Cabe destacar que, como el fondo es del mismo tipo que el cabezal, todas las ecuaciones referentes al segundo són igualmente aplicables al primero.

$$t_{cabezal} = \frac{PDM}{2SE - 0.2P} + C_1 + C_2 \quad \text{Ecuación 11.6.3.2}$$

Otro parámetro importante a conocer es la máxima presión de trabajo permitida. Esta se calcula según la ecuación 11.6.3.3 para el cuerpo y la ecuación 11.6.3.4 para el cabezal del separador.

$$P_{m\acute{a}x,cuerpo} = \frac{SEt_{cuerpo}}{R - 0.4t} \quad \text{Ecuación 11.6.3.3}$$

$$P_{m\acute{a}x,cabezal} = \frac{2SEt_{cuerpo}}{DM - 0.4t} \quad \text{Ecuación 11.6.3.4}$$

El módulo de tensión del material es función del tipo de material y de la máxima temperatura de operación y se determina a partir de la tabla 11.6.3.3.

Tabla 11.6.3.3. Módulos de tensión para diferentes materiales en función de la temperatura de operación.

Specification		MAXIMUM ALLOWABLE STRESS VALUES IN TENSION FOR HIGH-ALLOY STEEL (CAUTION: See UW-12 for vessels constructed under part UW Maximum Allowable Stress, ksi (Multiply by 1000 to Obtain psi), for Metal Temp., °F, Not Exceeding												
Number	Grade	-20 to 100	200	300	400	500	600	650	700	750	800	850	900	950
SA-240	304	18,8	17,8	16,6	16,2	15,9	15,9	15,9	15,9	15,5	15,2	14,9	14,7	14,4
SA-240	304L	15,7	15,7	15,3	14,7	14,4	14	13,7	13,5	13,3	13	---	---	---
SA-240	316	18,8	18,8	18,4	18,1	18,0	17,0	16,7	16,3	16,1	15,9	15,7	15,5	15,4
SA-240	316L	15,7	15,7	15,7	15,5	14,4	13,5	13,2	12,9	12,6	12,4	12,1	---	---

En nuestro caso, se ha elegido un acero SA-240 de grado 304.

La eficacia de unión depende del tipo de soldadura y el radiografiado que se ha llevado a cabo a la hora de fabricar el equipo y se ha determinado a partir de la tabla 11.6.3.4.

Tabla 11.6.3.4. Eficacia de unión en función de la soldadura y el radiografiado.

	Radiografiado total	Radiografiado parcial	Sin radiografiado
Soldadura simple	1	0.85	0.7
Soldadura doble	0.9	0.8	0.65

El sobreespesor de corrosión se calcula en base a la degradación que sufre la chapa metálica a lo largo del tiempo debido a la corrosión según la ecuación 11.6.3.5.

$$C_1 = 0.05 \frac{mm}{a\tilde{n}o} \cdot 15 \text{ años de vida útil} = 0.75 \text{ mm}$$

11. Manual de cálculos

Ecuación 11.6.3.5

La tolerancia de fabricación (C_2) tiene en cuenta las posibles desviaciones entre el valor teórico que debe tener el espesor de pared y el que finalmente tiene a causa de posibles defectos en la fabricación. Se calcula como un 10% del espesor de pared teórico calculado.

El factor M depende del tipo de cabezal que se esté utilizando y se determina a partir de la tabla 11.6.3.5 con el valor obtenido en la ecuación 11.6.3.8, válido para un cabezal tipo Klopper.

$$L = D \quad \text{Ecuación 11.2.4.6}$$

$$r = 0.1D \quad \text{Ecuación 11.2.4.7}$$

$$\frac{L}{r} = \frac{D}{0.1D} = 10 \quad \text{Ecuación 11.2.4.8}$$

Tabla 11.6.3.5. Factor M para diferentes valores de L/r.

VALUES OF FACTOR "M"																	
L/r	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50	2.75	3.00	3.25	3.50	4.00	4.50	5.00	5.50	6.00	6.50
M	1.00	1.03	1.06	1.08	1.10	1.13	1.15	1.17	1.18	1.20	1.22	1.25	1.28	1.31	1.34	1.36	1.39
L/r	7.00	7.50	8.00	8.50	9.00	9.50	10.0	10.5	11.0	11.5	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	16.3	*
M	1.41	1.44	1.46	1.48	1.50	1.52	1.54	1.56	1.58	1.60	1.62	1.65	1.69	1.72	1.75	1.77	

* THE MAXIMUM ALLOWED RATIO : L = D + 2t (see note 2 on facing page)

De esta forma se han obtenido los resultados resumidos en la tabla 11.6.3.6.

Tabla 11.6.3.6. Grosos de pared y presiones máximas para el separador bifásico

Parámetro	Nomenclatura	Valor
Grosor de pared del cuerpo (mm)	t_{cuerpo}	2
Grosor de pared del cabezal (mm)	t_{cabezal}	3
Grosor de pared del fondo (mm)	t_{fondo}	3
Presión máxima en el cuerpo (bar)	$P_{\text{máx,cuerpo}}$	1.99
Presión máxima en el cabezal (bar)	$P_{\text{máx,cabezal}}$	1.94
Presión máxima en el fondo (bar)	$P_{\text{máx,fondo}}$	1.94

11.6.4. Peso del separador bifásico

Para conocer el peso del separador cuando éste se encuentra vacío, cuando está lleno de agua para pruebas hidráulicas y en operación, se debe tener en cuenta el peso del cuerpo cilíndrico del separador, el cabezal y el fondo.

La tabla 11.6.4.1 muestra los resultados obtenidos, así como la nomenclatura que se seguirá en esta apartado.

Tabla 11.6.4.1. Volumen y peso del separador bifásico.

Parámetro	Nomenclatura	Valor
Volumen del cuerpo (m ³)	V _{cuerpo}	0.0832
Volumen del cabezal (m ³)	V _{cabezal}	0.00768
Volumen del fondo (m ³)	V _{fondo}	0.00768
Volumen del equipo vacío (m ³)	V _{vacío}	0.0909
Volumen de agua (m ³)	V _{agua}	21.28
Peso del cuerpo (kg)	W _{cuerpo}	653.2
Peso del cabezal (kg)	W _{cabezal}	120.6
Peso del fondo (kg)	W _{fondo}	120.6
Peso del equipo vacío (kg)	W _{vacío}	773.8
Peso del equipo lleno de agua (kg)	W _{agua}	22058
Peso del equipo en operación (kg)	W _{operación}	797.5

A continuación se va a detallar el procedimiento de cálculo de los pesos para las tres partes que forman el separador, así como del equipo al completo. Para la nomenclatura, referirse a las tablas proporcionadas en este apartado.

Cálculo del peso del cuerpo cilíndrico

El volumen del cuerpo se calcula mediante la ecuación 11.6.4.1.

$$V_{cuerpo} = \frac{\pi}{4} \left((D + 2t_{cuerpo})^2 - D^2 \right) \cdot H \quad \text{Ecuación 11.6.4.1}$$

A partir de este dato y de la densidad del material (ρ_{acero}), que para el AISI 304 es de 7850 kg/m³, se puede calcular el peso del cuerpo con la ecuación 11.6.4.2.

$$W_{cuerpo} = V_{cuerpo} \cdot \rho_{acero} \quad \text{Ecuación 11.6.4.2}$$

Cálculo del peso del cabezal y el fondo

Como el cabezal y el fondo en el separador son del mismo tipo (toriesféricos), el cálculo de su peso también va a ser igual. Es por eso que aunque las ecuaciones proporcionadas en este sub-apartado solo hagan referencia al cabezal, son aplicables también al fondo.

Para calcular el volumen de acero del cabezal primero debe calcularse la superficie que ocupa mediante la ecuación 11.6.4.3.

$$S_{cabezal} = \frac{\pi}{2} D_p^2 + D_e(D_e - 2D_p) \quad \text{Ecuación 11.6.4.3}$$

Donde D_e y D_p se calculan con las ecuaciones 11.6.4.4 y 11.6.4.5, respectivamente.

$$D_e = D + 2t_{cabezal} \quad \text{Ecuación 11.6.4.4}$$

$$\text{Ecuación 11.6.4.5}$$

11. Manual de cálculos

$$D_p = 0.2D_e$$

El volumen del cabezal se calcula con la ecuación 11.6.4.6.

$$V_{cabezal} = S_{cabezal} \cdot t_{cabezal} \quad \text{Ecuación 11.6.4.6}$$

Y el peso se calcula a partir de la densidad del material con la ecuación 11.6.4.7.

$$W_{cabezal} = V_{cabezal} \cdot \rho_{acero} \quad \text{Ecuación 11.6.4.7}$$

Cálculo del peso del equipo

El volumen del equipo vacío se ha calculado a partir de la ecuación 11.6.4.8.

$$V_{vacío} = V_{cuerpo} + V_{cabezal} + V_{fondo} + V_{platos}$$

Ecuación 11.6.4.8

La ecuación 11.6.4.9 se ha utilizado para el cálculo del peso del equipo vacío.

$$W_{vacío} = W_{cuerpo} + W_{cabezal} + W_{fondo} + W_{platos}$$

Ecuación 11.6.4.9

El volumen de agua que puede contener el equipo se ha calculado con la ecuación 11.6.4.10.

$$V_{agua} = \frac{\pi}{4} D^2 (H - h_{cabezal} - h_{fondo}) + V_{cabezal} + V_{fondo} - V_{platos}$$

Ecuación 11.6.4.10

El peso del equipo lleno de agua se ha calculado a partir de la ecuación 11.6.4.11.

$$W_{agua} = W_{vacío} + V_{agua} \cdot \rho_{agua} \quad \text{Ecuación 11.6.4.11}$$

11.7. Diseño de la turbina (TB-701)

En nuestra planta dispondremos de una Turbina, con la que generaremos energía eléctrica a partir del vapor generado en el proceso, disminuyendo así nuestros costos energéticos en la planta. En vías de escoger la turbina que emplearemos en la planta, en primero instancia hemos de decidir, que tipo de turbina será. Existen dos tipos de turbinas en el mercado, de contrapresión y de condensación. La primera se utiliza como expensor para reducir la presión de vapor, generando energía y descargando el vapor de salida a una presión elevada, siendo esta aprovechable en el proceso. El segundo tipo de turbinas presenta un gran rendimiento, esta turbina tiene una presión de descarga que puede ser inferior a la atmosférica debido a la condensación del vapor de salida.

En concreto se ha seleccionado la turbina SST-150 de la casa Siemens para generar energía eléctrica, la cual se aprecia en la figura 11.7.1.



SST-150 (hasta 20 MW)

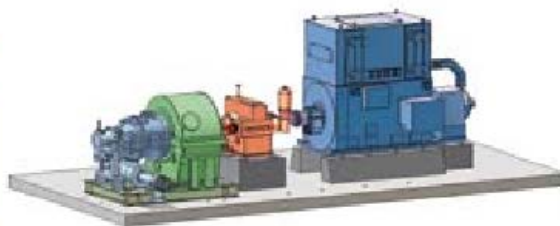


Figura 11.7.1. Ilustración de la turbina SST-150 de la casa Siemens

Se trata de una turbina de condensación monoetapa con capacidad para generar 20 MW . Se selecciona una turbina de condensación, debido a que no se utilizara el vapor de

salida en el proceso industrial, y además, se pretende obtener la máxima potencia eléctrica a partir de la potencia calorífica disponible en el vapor generado y las turbinas de condensación son las que permiten obtener el máximo rendimiento térmico.

Para determinar la energía generada, es necesario situar en un diagrama de Mollier el punto que define el vapor disponible para conocer sus propiedades, las cuales se aprecian en la figura 11.7.2.

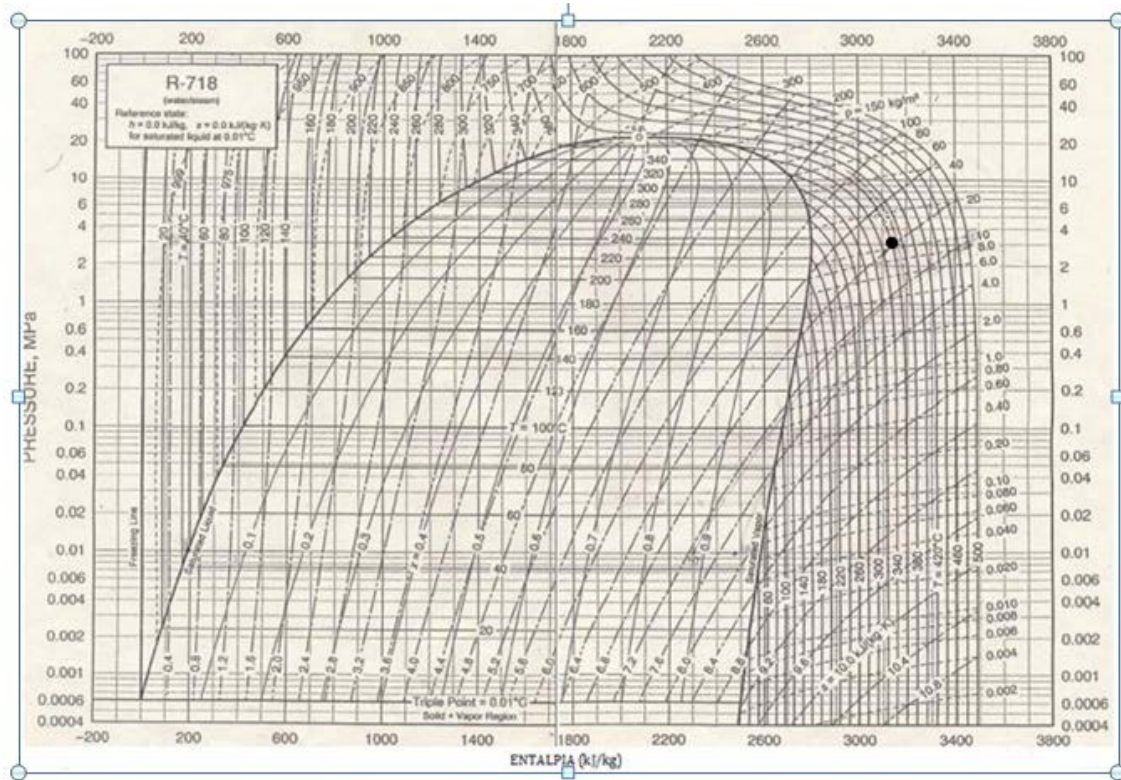


Figura 11.7.2. Diagrama de Mollier del Agua, antes de la expansión.

Cuyas condiciones y propiedades se aprecian en la tabla 11.7.1.

Tabla 11.7.1. Condiciones de Operación de la turbina

Temperatura	·C	360.67
Presión	bar	29.5
Caudal másico	kg/h	68580
Densidad	kg/m ³	10.61
Entalpia	kJ/kg	3125

A continuación se realiza una expansión isoentrópica desde el punto indicado en la figura anterior hasta el punto correspondiente a la presión de salida de 0.25 atm,

11. Manual de cálculos

correspondiente a la presión de salida del vapor de la turbina SSt-150, tal como se aprecia en la figura 11.7.3.

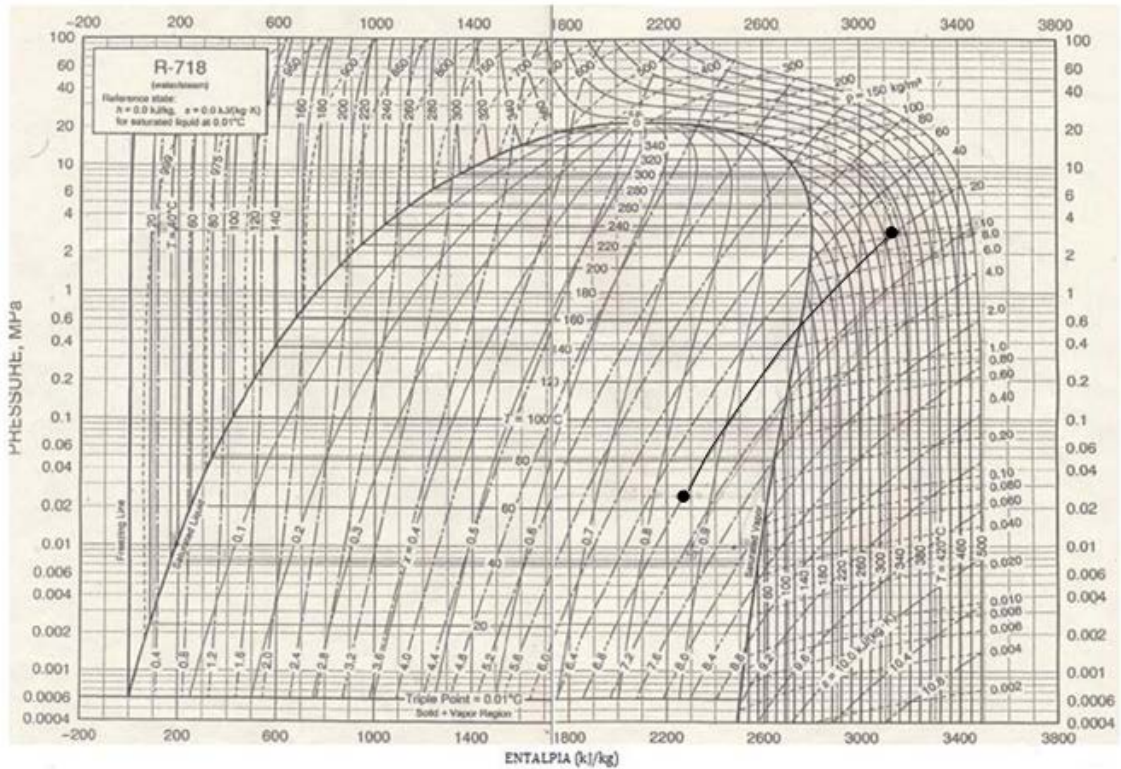


Figura 11.7.3. Diagrama de Mollier del Agua con el recorrido de la turbina

Cuyas condiciones de salida se aprecian en la tabla 11.7.2

Tabla 11.7.2. Condiciones de Salida de la turbina

Temperatura	·C	65
Presión	bar	0.25
Entalpia	kJ/kg	2260
Caudal másico	kg/h	68580

En vista que la expansión no se produce de manera ideal, se ha de calcular el valor real de la entalpia de salida. Para ello, se considera una eficacia de la turbina del 85%, según la siguiente ecuación.

$$\eta = \frac{h_{1v} - h_{2R}}{h_{1v} - h_{2T}}$$

Siendo:

- h_{1v} : Entalpia antes de la expansión iso-entrópica.

11. Manual de cálculos

- h_{2t} : Entalpia teórica después de la expansión.
- h_{2r} : Entalpia después de la expansión, considerando una eficacia del 85%.

Obteniéndose una entalpia real de salida de 2389,75 kJ/kg

Teniendo en cuenta que la energía generada, se aplica la siguiente ecuación.

$$W = m_v \cdot (h_{1v} - h_{2r})$$

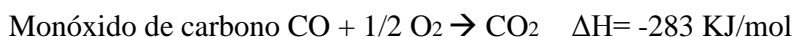
Se obtiene una energía generada de 14 MW.

11.8. Diseño de la incineradora térmica (IT-501)

En este apartado se explicará el procedimiento de cálculo de la incineradora que se usará para tratar el corriente de salida de la torre de absorción SC-401, que entrara a la incineradora a 5°C y 1 atmósfera de presión. El corriente de entrada de la incineradora se presenta en la tabla siguiente.

	kmol/h	kg/h
C₃H₆	43.10	1810.25
H₂O	9.27	166.91
CO₂	89.28	3928.50
CO	87.48	2449.31
N₂	822.92	23041.89
TOTAL	1052.07	31397.57

En primer lugar se determinará el caudal de salida de cada componente, teniendo en cuenta la estequiometría de la reacción. Las reacciones de combustión que tendrán lugar en la incineradora son las siguientes:



Seguidamente se presentan los cálculos realizados para determinar la composición de los gases de salida.

Determinación de la cantidad de dióxido de carbono formado

$$43.10 \text{ kmol/h C}_3\text{H}_6 \times 3 \text{ kmol CO}_2 / \text{ kmol C}_3\text{H}_6 = 129.3 \text{ kmol CO}_2 / \text{ h}$$

$$87.48 \text{ kmol/h CO} \times 1 \text{ kmol CO}_2 / \text{ kmol CO} = 87.48 \text{ kmol CO}_2 / \text{ h}$$

Por tanto, en total se forman 216.78 kmol/h de CO₂.

Determinación de la cantidad de agua formada

$$43.10 \text{ kmol/h C}_3\text{H}_6 \times 3 \text{ kmol H}_2\text{O} / \text{ kmol C}_3\text{H}_6 = 129.3 \text{ kmol H}_2\text{O} / \text{ h}$$

En total se forman 129.3 kmol H₂O / h

Requerimientos de oxígeno

Teniendo en cuenta la estequiometría de las reacciones se calcularán las necesidades de oxígeno para oxidar los componentes.

$$43.10 \text{ kmol/h } C_3H_6 \times 4.5 \text{ kmol } O_2 / \text{ kmol } C_3H_6 = 193.95 \text{ kmol } O_2 / \text{ h}$$

$$87.48 \text{ kmol/h } CO \times 0.5 \text{ kmol } O_2 / \text{ kmol } CO = 43.74 \text{ kmol } O_2 / \text{ h}$$

Por tanto, se requieren 237.69 kmol O₂ / h, que se aportará de aire corriente.

A pesar de disponer de grandes cantidades de nitrógeno no se formarán óxidos de nitrógeno en exceso, al disponer de una cantidad de oxígeno limitada. Cabe destacar que se introducirá un exceso de aire como en cualquier operación, para poder asegurar que la combustión se realiza prácticamente al 100%, pero se considerará que este pequeño exceso sobrante no influirá en la formación de cantidades considerables de los mencionados óxidos de nitrógeno.

Determinación de los contaminantes

Según el Decreto 323/1994 las emisiones máximas permitidas de NO_x y CO son, respectivamente, 300 y 100 mg/m³ a 273K y 1 atmósfera.

Respecto al monóxido de carbono, se asume que la combustión es total y que la concentración de salida de la cámara de incineración estará por debajo del límite establecido por la legislación.

Por otra parte, respecto a los óxidos de nitrógeno ya se ha comentado que se supondrá que el pequeño exceso de oxígeno del que se dispone no será suficiente para producir una cantidad considerable de éstos.

Las composiciones de salida del corriente incinerado se muestran a continuación, teniendo en cuenta el nitrógeno añadido junto al oxígeno estequiométrico calculado anteriormente.

	kmol/h	Kg/h
C₃H₆	0	0
H₂O	138,57	2494,26
CO₂	306,06	13466,64
CO	0	0
N₂	1773,68	49663,04
Total	2218,31	65623,94

Balance de energía

Seguidamente se realiza un balance de energía calorífica para determinar el calor asociado a los gases de salida.

El balance completo se entiende como $G+E=S+A$, pero se considera estado estacionario y generación nula obteniendo un balance final de $E=S$.

El balance de energía se expresa como:

$$m_{\text{aire}} \cdot \Delta H_{\text{aire}} + m_{\text{residuo}} \cdot \Delta H_{\text{residuo}} + m_{\text{residuo}} \cdot \Delta H_{\text{combustión}} - \lambda_v \times m_{\text{H}_2\text{O}} = m_{\text{gases}} \cdot \Delta H_{\text{gases}} \cdot (1-\eta)$$

Se ha supuesto nula la formación de escorias y por tanto no se ha tenido en cuenta el término en el balance. El primer término, $m_{\text{aire}} \cdot \Delta H_{\text{aire}}$, es 0 ya que no se ha calentado el aire antes de introducirlo en la incineradora.

En cuanto al segundo término, $m_{\text{residuo}} \cdot \Delta H_{\text{residuo}}$, se presentan los valores en la tabla siguiente.

m residuo (kmol/h)	ΔH residuo (KJ/Kmol)
1052.07	44544

Seguidamente se calcula el tercer término del balance, $m_{\text{residuo}} \cdot \Delta H_{\text{combustión}}$, a partir de las entalpias de combustión de los gases. Éste término desglosado se presenta en la siguiente tabla. Tanto el CO_2 como el N_2 y el H_2O no participan en este término ya que no sufren combustión.

	kmol/h	kg/h	ΔHc (KJ/mol)	ΔHc (Kcal/mol)	ΔH (Kcal/h)
C₃H₆	43.10	1810.25	2058	492.34	21219854
H₂O	9.27	166.91	-	-	
CO₂	89.28	3928.50	-	-	
CO	87.48	2449.31	283	67.70	5922396
N₂	822.92	23041.89	-	-	
TOTAL	1052.07	31397.57	2341	560.04	27142250

En cuarto lugar se debe calcular el término $\lambda_v \times m_{\text{H}_2\text{O}}$ mediante el caudal de agua que entra a la incineración y su calor latente.

Kg/h agua entrada	λ_v	ΔH (Kcal/h)
--------------------------	----------------------	--------------------

Planta de producción de Acrilonitrilo

11. Manual de cálculos

166.91	539	89964.5
--------	-----	---------

Finalmente, se presenta el cálculo del último término del balance, $m_{\text{gases}} \cdot \Delta H_{\text{gases}} \cdot (1-\eta)$, que es el calor de los gases de salida teniendo en cuenta las pérdidas de calor con el término $(1-\eta)$, siendo éstas de un 5%.

En primer lugar es necesario calcular la entalpia de cada componente, realizado con la siguiente ecuación:

$$h = \int_{T_0}^T C_p dT = \int_{T_0}^T (a + bT + cT^2) dT = \left[aT + \frac{bT^2}{2} + \frac{cT^3}{3} \right]_{T_0}^T$$

Dónde T es la temperatura de los gases y T_0 la temperatura de entrada del aire de combustión de la propia mezcla. Los valores de a, b y c se presentan a continuación.

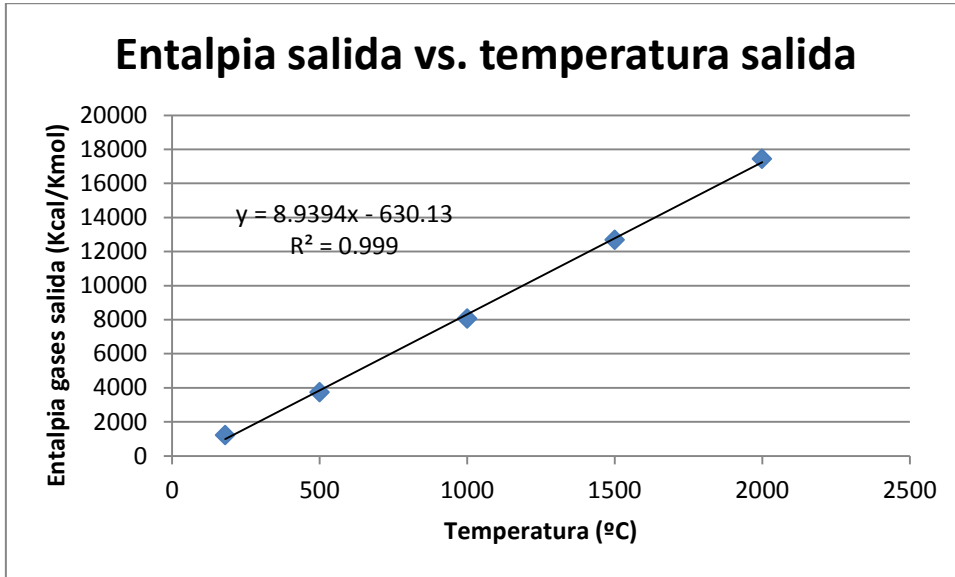
	a	b	c
CO₂	9	0.007183	-0.000002475
H₂O	7.76	0.003096	-0.000000343
N₂	6.77	0.001631	-0.000000345

A continuación se presenta un ejemplo de cálculo para el caso del nitrógeno y una T de 180 °C.

$$h = 6,77 \times (180 - 15) + \frac{0,001931}{2} (180^2 - 15^2) + \frac{(-0,000000345)}{3} (180^3 - 15^3) = 1142,62 \text{ kcal / kmol}$$

Seguidamente se construirá una curva h vs. T para diferentes temperaturas de salida de los gases. A continuación se presenta una tabla con los valores obtenidos, con los que después se realizara un gráfico de entalpías de salida vs. temperatura.

T (°C)	180	500	1000	1500	2000
Cp CO2 (Kcal/h)	488394.60	1578946.61	3559690.42	5711292.22	7844377.39
Cp H2O(Kcal/h)	184234.43	573120.04	1257788.63	2025945.65	2865708.72
Cp N2(Kcal/h)	2026639.44	6159577.20	13069834.48	20397349.98	27989143.80
Kcal/h totales	2699268.47	8311643.85	17887313.53	28134587.85	38699229.91
entalpia salida(Kcal/Kmol)	1216.81	3746.84	8063.49	12682.89	17445.37



Resolución del balance de energía

$$Q_{\text{salida}} = Q_{\text{entrada}} - Q_{\text{pérdidas}} \quad (5\% Q_{\text{entrada}})$$

$$Q_{\text{entrada}} = 11211341.17 \text{ kcal/h} + 27142250 \text{ kcal/h} - 89964.5 \text{ kcal/h} = 38263626.67 \text{ kcal/h}$$

El término de la derecha del igual ha sido calculado sumando los otros tres términos.

Seguidamente se puede calcular el término $Q_{\text{pérdidas}}$ como $Q_{\text{entrada}} \cdot 5\%$.

$$Q_{\text{pérdidas}} = 38263626.67 \cdot 0.05 = 1913181.3 \text{ kcal/h}$$

Finalmente el término Q_{salida} se calcula como $38263626.67 - 1913181.3 = 36350445.37 \text{ kcal/h}$.

Con la energía total de salida calculada y el caudal de gases de salida se puede calcular la entalpia de salida en Kcal/kmol.

$$\Delta H = 36350445.37 \text{ kcal/h} / 2218.31 \text{ kmol/h} = 16386.55 \text{ kcal/kmol}$$

Y en último lugar, conociendo la entalpia de salida se puede leer la temperatura de salida de los gases en la figura anteriormente presentada de h vs. T gráficamente o mediante la regresión.

Así, se obtiene un valor de temperatura de salida de $1903.56 \text{ }^\circ\text{C}$, muy superior a los 900°C que marca el Decreto 323/1994 para la incineración de residuos especiales que contengan sustancias orgánicas. Esta alta temperatura de salida puede deberse al alto calor de combustión del propileno.

Al tener esta temperatura de salida tan elevada no será necesario añadir un combustible adicional como el gas natural.

Dimensionamiento de la cámara de combustión

Para dimensionar la cámara de combustión se toma como tiempo de residencia 2 segundos, establecido en el Decreto 323/1994.

Sabiendo que el caudal de gases de salida es 213500 m³/h, se calcula el volumen de la incineradora como $V=Q \cdot \tau$, obteniendo un volumen de 118.6 m³.

La incineradora será de carcasa cilíndrica y para obtener el diámetro se fija una altura de 10 metros. El diámetro se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$V = \pi \cdot D^2 \cdot h / 4$$

Obteniendo un diámetro de 3.89 metros.

11.8.1. Diseño de la chimenea para evacuación de los gases de la incineración

Como ya se ha comentado en el apartado de medio ambiente la legislación que afecta al diseño de la chimenea es la Ley del 18 de Octubre de 1976.

La chimenea se construirá si es posible de sección circular y de manera que se consiga una buena difusión de los gases y que no se sobrepasen los niveles admisibles. El valor H de la altura mínima de la chimenea se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$H = \sqrt{\frac{A \times Q \times F}{C_m} \times \sqrt[3]{\frac{n}{V \times \Delta T}}}$$

Dónde:

A. Parámetro que refleja las condiciones climatológicas del lugar.

Q. Caudal máximo de sustancias contaminantes (Kg/h).

F. Coeficiente adimensional relacionado con la velocidad de sedimentación de las impurezas en la atmósfera. Para contaminantes gaseosos, que es nuestro caso, F vale 1.

C_m. Concentración máxima de contaminantes, a nivel de tierra, expresado en mg/m³N.

n. Número de chimeneas situadas en una distancia horizontal inferior a 2H del emplazamiento de la chimenea de referencia.

V. Caudal de gases emitidos (m³/h)

ΔT . Diferencia entre la temperatura de los gases a la salida de la chimenea y la temperatura mediana anual del aire ambiente en el lugar considerado (°C)

Determinación del parámetro climatológico A

El parámetro A se obtiene multiplicando 70 por un índice climatológico I_o que se calcula con la siguiente ecuación:

$$I_o = \frac{\Delta T + 2\delta t}{T_m} + \frac{80}{H}$$

Dónde:

- ΔT . Máxima oscilación de temperatura del lugar.

- δt . Diferencia entre la temperatura media del mes más cálido y la temperatura media del mes más frío.

- T_m . Temperatura media anual.

- H . Humedad relativa media de los meses de Junio, Julio, Agosto y Setiembre.

Para calcular I_o se usan los parámetros presentados en la siguiente tabla, obteniendo un valor de I_o de 5.

ΔT	δt	T_m	H
33	15	16.5	69.3

Por tanto, se obtiene un valor de A de 350.

Determinación de la concentración máxima admisible de contaminantes

El valor de C_m se determina con el valor de referencia fijado en el anexo 1 del Decreto 833/1975 por el cual se despliega la ley 38/1972 de protección del ambiente atmosférico.

Se concluye un valor de 0.25 para C_m .

Determinación de la altura mínima H

A	Q	F	C_m	n	V	ΔT
350	2	1	0.25	1	213500	10

Por tanto, se obtiene un valor de altura mínima de la chimenea de 4.66 metros.

11.9. Diseño de los tanques de almacenamiento de materias primas (T-101/127)

En este apartado se va a detallar el cálculo de los tanques de almacenamiento de propileno (T-101/115), de amoníaco (T-116/125) y de ácido sulfúrico (T-126/127), que se encuentran en el área 100.

Para realizar el dimensionamiento de los tanques, se han cogido valores de equipos reales que se han encontrado en la bibliografía. Estos se encuentran resumidos en la tabla 11.9.1.

Tabla 11.9.1. Parámetros de diseño de los tanques de almacenamiento de materias primas.

PROPILENO (T-101/115)		
Diámetro (m)	D	3
Altura (m)	H	15
AMONÍACO (T-116/125)		
Diámetro (m)	D	2.5
Altura (m)	H	12
ÁCIDO SULFÚRICO (T-126/127)		
Diámetro (m)	D	4
Altura (m)	H	8

A partir de estos datos se ha calculado el volumen de los tanques con la ecuación 11.9.1.

$$V = \frac{\pi}{4} D^2 H + 0.0809 D^3 \quad \text{Ecuación 11.9.1}$$

El cálculo del número de camiones necesarios se ha realizado a partir del caudal volumétrico diario de cada componente con la ecuación 11.9.2, asumiendo que los camiones tienen una capacidad de 25m³. Para el caso del propileno, éste llega con una tubería directamente de Repsol a los tanques, por lo que este cálculo no se ha realizado. Toda la nomenclatura se puede consultar en las tablas más adelante.

$$\frac{n^{\circ} \text{camiones}}{\text{dia}} = \frac{Q}{V_{\text{camión}}} \quad \text{Ecuación 11.9.2}$$

Para el cálculo del número de tanques es necesario primero conocer el volumen real que ocupa el producto dentro del tanque y el volumen de estoc que necesitaremos en la planta. Estos parámetros se pueden calcular con las ecuaciones 11.9.3 y 11.9.4, respectivamente.

$$V_{\text{ocupación}} = 0.95V \quad \text{Ecuación 11.9.3}$$

$$V_{\text{estoc}} = Q \cdot t_{\text{estoc}} \quad \text{Ecuación 11.9.4}$$

Así, el número de tanques necesarios se puede calcular con la ecuación 11.9.5.

Planta de producción de Acrilonitrilo

11. Manual de cálculos

$$n^{\circ} \text{tanques} = \frac{V_{\text{estoc}}}{V_{\text{ocupación}}} \quad \text{Ecuación 11.9.5}$$

Los resultados obtenidos para las tres materias primas se encuentran resumidos en la tabla 11.9.2.

Tabla 11.9.1. Resultados del diseño de los tanques de materias primas.

PROPILENO (T-101/115)		
Caudal volumétrico (m ³ /día)	Q	370.92
Volumen del tanque (m ³)	V	108
Volumen del camión (m ³)	V _{camión}	-
Volumen ocupado (m ³)	V _{ocupación}	102.6
Días de estoc	t _{estoc}	4
Número de camiones al día	n° camiones/día	-
Número de tanques	n° tanques	15
AMONÍACO (T-116/125)		
Caudal volumétrico (m ³ /día)	Q	129.74
Volumen del tanque (m ³)	V	60.1
Volumen del camión (m ³)	V _{camión}	25
Volumen ocupado (m ³)	V _{ocupación}	57.1
Días de estoc	t _{estoc}	4
Número de camiones al día	n° camiones/día	6
Número de tanques	n° tanques	10
ÁCIDO SULFÚRICO (T-126/127)		
Caudal volumétrico (m ³ /día)	Q	32.09
Volumen del tanque (m ³)	V	106
Volumen del camión (m ³)	V _{camión}	25
Volumen ocupado (m ³)	V _{ocupación}	100.7
Días de estoc	t _{estoc}	4
Número de camiones al día	n° camiones/día	2
Número de tanques	n° tanques	2

11.9.1. Diseño mecánico de los tanques

En este apartado se explicará el cálculo del espesor de pared tanto del cuerpo como de los cabezales de los tanques de almacenamiento de materias primas.

Una vez se ha realizado el procedimiento de diseño de los tanques explicado en el 11.9, ya se tienen los datos necesarios para realizar el diseño mecánico. Éstos se encuentran resumidos en la tabla 11.9.1.1.

Tabla 11.9.1.1. Características y condiciones de los tanques.

PROPILENO (T-101/115)		
Diámetro interno (m)	D	3
Radio interno (m)	R	1.5
Altura (m)	H	15
Presión de operación (bar)	P _{op}	18
Presión de diseño (bar)	P	20.7
Temperatura de operación (°F)	T _{máx}	90

AMONÍACO (T-116/125)		
Diámetro interno (m)	D	2.5
Radio interno (m)	R	1.25
Altura (m)	H	12
Presión de operación (bar)	P _{op}	12
Presión de diseño (bar)	P	22
Temperatura de operación (°F)	T _{máx}	90
ÁCIDO SULFÚRICO (T-126/127)		
Diámetro interno (m)	D	4
Radio interno (m)	R	2
Altura (m)	H	8
Presión de operación (bar)	P _{op}	1
Presión de diseño (bar)	P	1.15
Temperatura de operación (°F)	T _{máx}	90

La tabla 11.9.1.2 recoge los demás parámetros necesarios para el cálculo del espesor de pared, así como la nomenclatura que se seguirá en las ecuaciones utilizadas a continuación.

Tabla 11.9.1.2. Parámetros para el cálculo del espesor de pared del separador bifásico.

PROPILENO (T-101/115)		
Módulo de tensión del material (bar)	S	1297
Eficacia de la unión	E	0.85
Sobreespesor de corrosión (mm)	C ₁	0.75
Tolerancia de fabricación (mm)	C ₂	5
Factor M	M	1.54
Altura de líquido (m)	h _{líquido}	14.51
Número de Sherwood	Sh	1144.51
AMONÍACO (T-116/125)		
Módulo de tensión del material (bar)	S	1297
Eficacia de la unión	E	0.85
Sobreespesor de corrosión (mm)	C ₁	0.75
Tolerancia de fabricación (mm)	C ₂	4.4
Factor M	M	1.54
Altura de líquido (m)	h _{líquido}	11.63
Número de Sherwood	Sh	954.65
ÁCIDO SULFÚRICO (T-126/127)		
Módulo de tensión del material (bar)	S	1228
Eficacia de la unión	E	0.85
Sobreespesor de corrosión (mm)	C ₁	0.75
Tolerancia de fabricación (mm)	C ₂	0.5
Factor M	M	1.54
Altura de líquido (m)	h _{líquido}	7.8
Número de Sherwood	Sh	4046

Para conocer el espesor de pared del cuerpo del sparador se ha aplicado la ecuación 11.9.1.1, que es válida para cuerpos cilíndricos.

$$t_{cuerpo} = \frac{PR}{SE + 0.4P} + C_1 \quad \text{Ecuación 11.9.1.1}$$

Para el cabezal, se debe aplicar la ecuación 11.9.1.2, que es válida para cabezales toriesféricos.

$$t_{cabezal} = \frac{PDM}{2SE - 0.2P} + C_1 + C_2 \quad \text{Ecuación 11.9.1.2}$$

Para el fondo inferior, al ser plano, se debe conocer la altura de líquido que éste deberá soportar y calcular el espesor en función del número adimensional de Sherwood, representado en la ecuación 11.9.1.3.

$$Sh = \frac{0.0005 \cdot D \cdot (h_{líquido} - 30.48) \cdot G}{t_{cuerpo}} \quad \text{Ecuación 11.9.1.3}$$

Donde la altura del líquido se ha calculada a partir de la ecuación 11.9.1.4.

$$h_{líquido} = \frac{4 \cdot 0.95 \cdot V}{\pi \cdot D^2} \quad \text{Ecuación 11.9.1.4}$$

La elección del espesor se ha hecho en base a la tabla 11.9.1.3.

Tabla 11.9.1.3. Espesores del fondo plano en función del número de Sherwood.

Espesor Mínimo (mm) del Primer Anillo del Cuerpo	Esfuerzo Calculado para Prueba Hidrostática en el Primer Anillo del Cuerpo (Kg/cm ²)			
	<1989	<2109	<2320	<2530
t < 19.05	6.35	6.35	7.14	8.73
09.05 < 25.4	6.35	7.14	9.52	11.11
25.4 < 31.75	6.35	8.73	11.91	14.28
31.75 < 38.10	7.93	11.11	14.28	17.46
38.10 < 44.45	8.73	12.7	15.87	19.05

Otro parámetro importante a conocer es la máxima presión de trabajo permitida. Esta se calcula según la ecuación 11.9.1.5 para el cuerpo y la ecuación 11.9.1.5 para el cabezal de los tanques.

$$P_{m\acute{a}x,cuerpo} = \frac{SEt_{cuerpo}}{R - 0.4t} \quad \text{Ecuación 11.9.1.5}$$

$$P_{m\acute{a}x,cabezal} = \frac{2SEt_{cuerpo}}{DM - 0.4t} \quad \text{Ecuación 11.9.1.6}$$

El módulo de tensión del material es función del tipo de material y de la máxima temperatura de operación y se determina a partir de la tabla 11.9.1.4.

Tabla 11.9.1.4. Módulos de tensión para diferentes materiales en función de la temperatura de operación.

Planta de producción de Acrilonitrilo

11. Manual de cálculos

MAXIMUM ALLOWABLE STRESS VALUES IN TENSION FOR HIGH-ALLOY STEEL
(CAUTION: See UW-12 for vessels constructed under part UW)

Specification		Maximum Allowable Stress, ksi (Multiply by 1000 to Obtain psi), for Metal Temp., °F, Not Exceeding												
Number	Grade	-20 to 100	200	300	400	500	600	650	700	750	800	850	900	950
SA-240	304	18,8	17,8	16,6	16,2	15,9	15,9	15,9	15,9	15,5	15,2	14,9	14,7	14,4
SA-240	304L	15,7	15,7	15,3	14,7	14,4	14	13,7	13,5	13,3	13	---	---	---
SA-240	316	18,8	18,8	18,4	18,1	18,0	17,0	16,7	16,3	16,1	15,9	15,7	15,5	15,4
SA-240	316L	15,7	15,7	15,7	15,5	14,4	13,5	13,2	12,9	12,6	12,4	12,1	---	---

En nuestro caso, se ha elegido un acero SA-240 de grado 304 para todos los casos.

La eficacia de unión depende del tipo de soldadura y el radiografiado que se ha llevado a cabo a la hora de fabricar el equipo y se ha determinado a partir de la tabla 11.9.1.5.

Tabla 11.9.1.5. Eficacia de unión en función de la soldadura y el radiografiado.

	Radiografiado total	Radiografiado parcial	Sin radiografiado
Soldadura simple	1	0.85	0.7
Soldadura doble	0.9	0.8	0.65

El sobreespesor de corrosión se calcula en base a la degradación que sufre la chapa metálica a lo largo del tiempo debido a la corrosión según la ecuación 11.9.1.7.

$$C_1 = 0.05 \frac{mm}{año} \cdot 15 \text{ años de vida útil} = 0.75 \text{ mm}$$

Ecuación 11.9.1.7

La tolerancia de fabricación (C_2) tiene en cuenta las posibles desviaciones entre el valor teórico que debe tener el espesor de pared y el que finalmente tiene a causa de posibles defectos en la fabricación. Se calcula como un 10% del espesor de pared teórico calculado.

El factor M depende del tipo de cabezal que se esté utilizando y se determina a partir de la tabla 11.9.1.6 con el valor obtenido en la ecuación 11.9.1.10, válido para un cabezal tipo Klopper.

$$L = D \quad \text{Ecuación 11.9.1.8}$$

$$r = 0.1D \quad \text{Ecuación 11.9.1.9}$$

$$\frac{L}{r} = \frac{D}{0.1D} = 10 \quad \text{Ecuación 11.9.1.10}$$

Tabla 11.9.1.6. Factor M para diferentes valores de L/r.

L/r	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50	2.75	3.00	3.25	3.50	4.00	4.50	5.00	5.50	6.00	6.50
M	1.00	1.03	1.06	1.08	1.10	1.13	1.15	1.17	1.18	1.20	1.22	1.25	1.28	1.31	1.34	1.36	1.39
L/r	7.00	7.50	8.00	8.50	9.00	9.50	10.0	10.5	11.0	11.5	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	16.5	*
M	1.41	1.44	1.46	1.48	1.50	1.52	1.54	1.56	1.58	1.60	1.62	1.65	1.69	1.72	1.75	1.77	
* THE MAXIMUM ALLOWED RATIO : $L = D + 2t$ (see note 2 on facing page)																	

De esta forma se han obtenido los resultados resumidos en la tabla 11.9.1.7.

Tabla 11.9.1.7. Grosos de pared y presiones máximas para los tanques de almacenamiento.

PROPILENO (T-101/115)		
Grosor de pared del cuerpo (mm)	t_{cuerpo}	29
Grosor de pared del cabezal (mm)	t_{cabezal}	50
Grosor de pared del fondo (mm)	t_{fondo}	7
Presión máxima en el cuerpo (bar)	$P_{\text{máx,cuerpo}}$	21.5
Presión máxima en el cabezal (bar)	$P_{\text{máx,cabezal}}$	23.8
AMONÍACO (T-116/125)		
Grosor de pared del cuerpo (mm)	t_{cuerpo}	26
Grosor de pared del cabezal (mm)	t_{cabezal}	44
Grosor de pared del fondo (mm)	t_{fondo}	7
Presión máxima en el cuerpo (bar)	$P_{\text{máx,cuerpo}}$	23.1
Presión máxima en el cabezal (bar)	$P_{\text{máx,cabezal}}$	25.1
ÁCIDO SULFÚRICO (T-126/127)		
Grosor de pared del cuerpo (mm)	t_{cuerpo}	3
Grosor de pared del cabezal (mm)	t_{cabezal}	5
Grosor de pared del fondo (mm)	t_{fondo}	7
Presión máxima en el cuerpo (bar)	$P_{\text{máx,cuerpo}}$	1.65
Presión máxima en el cabezal (bar)	$P_{\text{máx,cabezal}}$	1.79

11.9.2. Peso de los tanques

Para conocer el peso de los tanques cuando estos se encuentran vacíos, cuando están llenos de agua para pruebas hidráulicas y en operación, se debe tener en cuenta el peso del cuerpo cilíndrico del separador, el cabezal y el fondo.

La tabla 11.9.2.1 muestra los resultados obtenidos para los tres tipos de tanque, así como la nomenclatura que se seguirá en esta apartado.

Tabla 11.9.2.1. Volumen y peso de los tanques de almacenamiento.

PROPILENO (T-101/115)		
Volumen del cuerpo (m ³)	V_{cuerpo}	4.14
Volumen del cabezal (m ³)	V_{cabezal}	0.318
Volumen del equipo vacío (m ³)	$V_{\text{vacío}}$	4.458
Volumen de agua (m ³)	V_{agua}	104.17
Peso del cuerpo (kg)	W_{cuerpo}	32701
Peso del cabezal (kg)	W_{cabezal}	2513
Peso del equipo vacío (kg)	$W_{\text{vacío}}$	35215

Planta de producción de Acrilonitrilo

11. Manual de cálculos

Peso del equipo lleno de agua (kg)	W_{agua}	139383
Peso del equipo en operación (kg)	$W_{\text{operación}}$	87393
AMONIACO (T-116/125)		
Volumen del cuerpo (m ³)	V_{cuerpo}	2.48
Volumen del cabezal (m ³)	V_{cabezal}	0.195
Volumen del equipo vacío (m ³)	$V_{\text{vacío}}$	2.67
Volumen de agua (m ³)	V_{agua}	57.80
Peso del cuerpo (kg)	W_{cuerpo}	19560
Peso del cabezal (kg)	W_{cabezal}	1542
Peso del equipo vacío (kg)	$W_{\text{vacío}}$	21102
Peso del equipo lleno de agua (kg)	W_{agua}	78906
Peso del equipo en operación (kg)	$W_{\text{operación}}$	55316
ÁCIDO SULFÚRICO (T-126/127)		
Volumen del cuerpo (m ³)	V_{cuerpo}	0.302
Volumen del cabezal (m ³)	V_{cabezal}	0.0533
Volumen del equipo vacío (m ³)	$V_{\text{vacío}}$	0.355
Volumen de agua (m ³)	V_{agua}	96.54
Peso del cuerpo (kg)	W_{cuerpo}	2384
Peso del cabezal (kg)	W_{cabezal}	421
Peso del equipo vacío (kg)	$W_{\text{vacío}}$	2805
Peso del equipo lleno de agua (kg)	W_{agua}	99343
Peso del equipo en operación (kg)	$W_{\text{operación}}$	180628

A continuación se va a detallar el procedimiento de cálculo de los pesos para las tres partes que forman el separador, así como del equipo al completo. Para la nomenclatura, referirse a las tablas proporcionadas en este apartado.

Cálculo del peso del cuerpo cilíndrico

El volumen del cuerpo se calcula mediante la ecuación 11.9.2.1.

$$V_{\text{cuerpo}} = \frac{\pi}{4} \left((D + 2t_{\text{cuerpo}})^2 - D^2 \right) \cdot H \quad \text{Ecuación 11.9.2.1}$$

A partir de este dato y de la densidad del material (ρ_{acero}), que para el AISI 304 es de 7850 kg/m³, se puede calcular el peso del cuerpo con la ecuación 11.9.2.2.

$$W_{\text{cuerpo}} = V_{\text{cuerpo}} \cdot \rho_{\text{acero}} \quad \text{Ecuación 11.9.2.2}$$

Cálculo del peso del cabezal y el fondo

Para calcular el volumen de acero del cabezal primero debe calcularse la superficie que ocupa mediante la ecuación 11.9.2.3.

$$S_{\text{cabezal}} = \frac{\pi}{2} D_p^2 + D_e(D_e - 2D_p) \quad \text{Ecuación 11.9.2.3}$$

Donde D_e y D_p se calculan con las ecuaciones 11.9.2.4 y 11.9.2.5, respectivamente.

11. Manual de cálculos

$$D_e = D + 2t_{cabezal} \quad \text{Ecuación 11.9.2.4}$$

$$D_p = 0.2D_e \quad \text{Ecuación 11.9.2.5}$$

El volumen del cabezal se calcula con la ecuación 11.9.2.6.

$$V_{cabezal} = S_{cabezal} \cdot t_{cabezal} \quad \text{Ecuación 11.9.2.6}$$

Y el peso se calcula a partir de la densidad del material con la ecuación 11.9.2.7.

$$W_{cabezal} = V_{cabezal} \cdot \rho_{acero} \quad \text{Ecuación 11.9.2.7}$$

Cálculo del peso del equipo

El volumen del equipo vacío se ha calculado a partir de la ecuación 11.9.2.8.

$$V_{vacío} = V_{cuerpo} + V_{cabezal} + V_{fondo} + V_{platos}$$

$$\text{Ecuación 11.9.2.8}$$

La ecuación 11.9.2.9 se ha utilizado para el cálculo del peso del equipo vacío.

$$W_{vacío} = W_{cuerpo} + W_{cabezal} + W_{fondo} + W_{platos}$$

$$\text{Ecuación 11.9.2.9}$$

El volumen de agua que puede contener el equipo se ha calculado con la ecuación 11.9.2.10.

$$V_{agua} = \frac{\pi}{4} D^2 (H - h_{cabezal} - h_{fondo}) + V_{cabezal} + V_{fondo} - V_{platos}$$

$$\text{Ecuación 11.9.2.10}$$

El peso del equipo lleno de agua se ha calculado a partir de la ecuación 11.9.2.11.

$$W_{agua} = W_{vacío} + V_{agua} \cdot \rho_{agua} \quad \text{Ecuación 11.9.2.11}$$

11.10. Diseño de los tanques de almacenamiento de producto acabado (T-901/913)

En este apartado se va a detallar el cálculo de los tanques de almacenamiento de acrilonitrilo (T-901/909) y de ácido cianhídrico (T-910/913), que se encuentran en el área 900.

Para realizar el dimensionamiento de los tanques, se han cogido valores de equipos reales que se han encontrado en la bibliografía. Estos se encuentran resumidos en la tabla 11.10.1.

Tabla 11.10.1. Parámetros de diseño de los tanques de almacenamiento de productos líquidos.

ACRILONITRILO (T-901/909)		
Diámetro (m)	D	3.4
Altura (m)	H	11
ÁCIDO CIANHÍDRICO (T-910/913)		
Diámetro (m)	D	3.4
Altura (m)	H	11

A partir de estos datos se ha calculado el volumen de los tanques con la ecuación 11.10.1.

$$V = \frac{\pi}{4} D^2 H + 0.0809 D^3 \quad \text{Ecuación 11.10.1}$$

El cálculo del número de camiones necesarios se ha realizado a partir del caudal volumétrico diario de cada componente con la ecuación 11.10.2, asumiendo que los camiones tienen una capacidad de 25m³. Toda la nomenclatura se puede consultar en las tablas más adelante.

$$\frac{n^{\circ} \text{camiones}}{\text{día}} = \frac{Q}{V_{\text{camión}}} \quad \text{Ecuación 11.10.2}$$

Para el cálculo del número de tanques es necesario primero conocer el volumen real que ocupa el producto dentro del tanque y el volumen de estoc que necesitaremos en la planta. Estos parámetros se pueden calcular con las ecuaciones 11.10.3 y 11.10.4, respectivamente.

$$V_{\text{ocupación}} = 0.95V \quad \text{Ecuación 11.10.3}$$

$$V_{\text{estoc}} = Q \cdot t_{\text{estoc}} \quad \text{Ecuación 11.10.4}$$

Así, el número de tanques necesarios se puede calcular con la ecuación 11.10.5.

$$n^{\circ} \text{tanques} = \frac{V_{\text{estoc}}}{V_{\text{ocupación}}} \quad \text{Ecuación 11.10.5}$$

Los resultados obtenidos para las tres materias primas se encuentran resumidos en la tabla 11.10.2.

Tabla 11.10.1. Resultados del diseño de los tanques de productos líquidos.

ACRILONITRILO (T-901/909)		
Caudal volumétrico (m ³ /día)	Q	791.52
Volumen del tanque (m ³)	V	100
Volumen del camión (m ³)	V _{camión}	25
Volumen ocupado (m ³)	V _{ocupación}	95
Días de estoc	t _{estoc}	4
Número de camiones al día	nº camiones/día	8
Número de tanques	nº tanques	9
ÁCIDO CIANHÍDRICO (T-910/913)		
Caudal volumétrico (m ³ /día)	Q	81.06
Volumen del tanque (m ³)	V	100
Volumen del camión (m ³)	V _{camión}	25
Volumen ocupado (m ³)	V _{ocupación}	95
Días de estoc	t _{estoc}	4
Número de camiones al día	nº camiones/día	4
Número de tanques	nº tanques	4

11.10.1. Diseño mecánico de los tanques

En este apartado se explicará el cálculo del espesor de pared tanto del cuerpo como de los cabezales de los tanques de almacenamiento de productos líquidos.

Una vez se ha realizado el procedimiento de diseño de los tanques explicado en el 11.10, ya se tienen los datos necesarios para realizar el diseño mecánico. Éstos se encuentran resumidos en la tabla 11.10.1.1.

Tabla 11.10.1.1. Características y condiciones de los tanques..

ACRILONITRILO (T-901/909)		
Diámetro interno (m)	D	3.4
Radio interno (m)	R	1.7
Altura (m)	H	11
Presión de operación (bar)	P _{op}	1
Presión de diseño (bar)	P	1.15
Temperatura de operación (°F)	T _{máx}	50
ÁCIDO CIANHÍDRICO (T-910/913)		
Diámetro interno (m)	D	3.4
Radio interno (m)	R	1.7
Altura (m)	H	11
Presión de operación (bar)	P _{op}	1
Presión de diseño (bar)	P	1.15
Temperatura de operación (°F)	T _{máx}	50

La tabla 11.10.1.2 recoge los demás parámetros necesarios para el cálculo del espesor de pared, así como la nomenclatura que se seguirá en las ecuaciones utilizadas a continuación.

Tabla 11.10.1.2. Parámetros para el cálculo del espesor de pared del separador bifásico.

ACRILONITRILO (T-901/909)		
Módulo de tensión del material (bar)	S	1297
Eficacia de la unión	E	0.85
Sobreespesor de corrosión (mm)	C ₁	0.75
Tolerancia de fabricación (mm)	C ₂	0.4
Factor M	M	1.54
Altura de líquido (m)	h _{líquido}	10.46
Número de Sherwood	Sh	1274
ÁCIDO CIANHÍDRICO (T-910/913)		
Módulo de tensión del material (bar)	S	1297
Eficacia de la unión	E	0.85
Sobreespesor de corrosión (mm)	C ₁	0.75
Tolerancia de fabricación (mm)	C ₂	0.4
Factor M	M	1.54
Altura de líquido (m)	h _{líquido}	10.46
Número de Sherwood	Sh	1274

Para conocer el espesor de pared del cuerpo del sparador se ha aplicado la ecuación 11.10.1.1, que es válida para cuerpos cilíndricos.

$$t_{cuerpo} = \frac{PR}{SE + 0.4P} + C_1 \quad \text{Ecuación 11.10.1.1}$$

Para el cabezal, se debe aplicar la ecuación 11.10.1.2, que es válida para cabezales toriesféricos.

$$t_{cabezal} = \frac{PDM}{2SE - 0.2P} + C_1 + C_2 \quad \text{Ecuación 11.10.1.2}$$

Para el fondo inferior, al ser plano, se debe conocer la altura de líquido que éste deberá soportar y calcular el espesor en función del número adimensional de Sherwood, representado en la ecuación 11.10.1.3.

$$Sh = \frac{0.0005 \cdot D \cdot (h_{líquido} - 30.48) \cdot G}{t_{cuerpo}} \quad \text{Ecuación 11.10.1.3}$$

Donde la altura del líquido se ha calculada a partir de la ecuación 11.10.1.4.

$$h_{líquido} = \frac{4 \cdot 0.95 \cdot V}{\pi \cdot D^2} \quad \text{Ecuación 11.10.1.4}$$

La elección del espesor se ha hecho en base a la tabla 11.10.1.3.

Tabla 11.10.1.3. Espesores del fondo plano en función del número de Sherwood.

11. Manual de cálculos

Espesor Mínimo (mm) del Primer Anillo del Cuerpo	Esfuerzo Calculado para Prueba Hidrostática en el Primer Anillo del Cuerpo (Kg/cm ²)			
	<1989	<2109	<2320	<2530
t < 19.05	6.35	6.35	7.14	8.73
09.05 < 25.4	6.35	7.14	9.52	11.11
25.4 < 31.75	6.35	8.73	11.91	14.28
31.75 < 38.10	7.93	11.11	14.28	17.46
38.10 < 44.45	8.73	12.7	15.87	19.05

Otro parámetro importante a conocer es la máxima presión de trabajo permitida. Ésta se calcula según la ecuación 11.10.1.5 para el cuerpo y la ecuación 11.10.1.6 para el cabezal de los tanques.

$$P_{m\acute{a}x,cuerpo} = \frac{SEt_{cuerpo}}{R - 0.4t} \quad \text{Ecuación 11.10.1.5}$$

$$P_{m\acute{a}x,cabezal} = \frac{2SEt_{cuerpo}}{DM - 0.4t} \quad \text{Ecuación 11.10.1.6}$$

El módulo de tensión del material es función del tipo de material y de la máxima temperatura de operación y se determina a partir de la tabla 11.10.1.4.

Tabla 11.10.1.4. Módulos de tensión para diferentes materiales en función de la temperatura de operación.

MAXIMUM ALLOWABLE STRESS VALUES IN TENSION FOR HIGH-ALLOY STEEL
(CAUTION: See UW-12 for vessels constructed under part UW)

Specification		Maximum Allowable Stress, ksi (Multiply by 1000 to Obtain psi), for Metal Temp., °F, Not Exceeding												
Number	Grade	-20 to 100	200	300	400	500	600	650	700	750	800	850	900	950
SA-240	304	18,8	17,8	16,6	16,2	15,9	15,9	15,9	15,9	15,5	15,2	14,9	14,7	14,4
SA-240	304L	15,7	15,7	15,3	14,7	14,4	14	13,7	13,5	13,3	13	---	---	---
SA-240	316	18,8	18,8	18,4	18,1	18,0	17,0	16,7	16,3	16,1	15,9	15,7	15,5	15,4
SA-240	316L	15,7	15,7	15,7	15,5	14,4	13,5	13,2	12,9	12,6	12,4	12,1	---	---

En nuestro caso, se ha elegido un acero SA-240 de grado 304 para todos los casos.

La eficacia de unión depende del tipo de soldadura y el radiografiado que se ha llevado a cabo a la hora de fabricar el equipo y se ha determinado a partir de la tabla 11.10.1.5.

Tabla 11.10.1.5. Eficacia de unión en función de la soldadura y el radiografiado.

	Radiografiado total	Radiografiado parcial	Sin radiografiado
Soldadura simple	1	0.85	0.7
Soldadura doble	0.9	0.8	0.65

El sobreespesor de corrosión se calcula en base a la degradación que sufre la chapa metálica a lo largo del tiempo debido a la corrosión según la ecuación 11.10.1.7.

$$C_1 = 0.05 \frac{mm}{a\tilde{n}o} \cdot 15 \text{ años de vida útil} = 0.75 \text{ mm}$$

Ecuación 11.10.1.7

11. Manual de cálculos

La tolerancia de fabricación (C_2) tiene en cuenta las posibles desviaciones entre el valor teórico que debe tener el espesor de pared y el que finalmente tiene a causa de posibles defectos en la fabricación. Se calcula como un 10% del espesor de pared teórico calculado.

El factor M depende del tipo de cabezal que se esté utilizando y se determina a partir de la tabla 11.10.1.6 con el valor obtenido en la ecuación 11.10.1.10, válido para un cabezal tipo Klopfer.

$$L = D \quad \text{Ecuación 11.10.1.8}$$

$$r = 0.1D \quad \text{Ecuación 11.10.1.9}$$

$$\frac{L}{r} = \frac{D}{0.1D} = 10 \quad \text{Ecuación 11.10.1.10}$$

Tabla 11.10.1.6. Factor M para diferentes valores de L/r.

VALUES OF FACTOR "M"																	
L/r	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50	2.75	3.00	3.25	3.50	4.00	4.50	5.00	5.50	6.00	6.50
M	1.00	1.03	1.06	1.08	1.10	1.13	1.15	1.17	1.18	1.20	1.22	1.25	1.28	1.31	1.34	1.36	1.39
L/r	7.00	7.50	8.00	8.50	9.00	9.50	10.0	10.5	11.0	11.5	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	16.3	*
M	1.41	1.44	1.46	1.48	1.50	1.52	1.54	1.56	1.58	1.60	1.62	1.65	1.69	1.72	1.75	1.77	
* THE MAXIMUM ALLOWED RATIO : L = D + 2t (see note 2 on facing page)																	

De esta forma se han obtenido los resultados resumidos en la tabla 11.10.1.7.

Tabla 11.10.1.7. Grosos de pared y presiones máximas para los tanques de almacenamiento.

ACRILONITRILO (T-901/909)		
Grosor de pared del cuerpo (mm)	t_{cuerpo}	3
Grosor de pared del cabezal (mm)	t_{cabezal}	4
Grosor de pared del fondo (mm)	t_{fondo}	7
Presión máxima en el cuerpo (bar)	$P_{\text{máx,cuerpo}}$	1.95
Presión máxima en el cabezal (bar)	$P_{\text{máx,cabezal}}$	1.68
ÁCIDO CIANHÍDRICO (T-910/913)		
Grosor de pared del cuerpo (mm)	t_{cuerpo}	3
Grosor de pared del cabezal (mm)	t_{cabezal}	4
Grosor de pared del fondo (mm)	t_{fondo}	7
Presión máxima en el cuerpo (bar)	$P_{\text{máx,cuerpo}}$	1.95
Presión máxima en el cabezal (bar)	$P_{\text{máx,cabezal}}$	1.68

11.10.2. Peso de los tanques

Para conocer el peso de los tanques cuando estos se encuentran vacíos, cuando están llenos de agua para pruebas hidráulicas y en operación, se debe tener en cuenta el peso del cuerpo cilíndrico del separador, el cabezal y el fondo.

La tabla 11.10.2.1 muestra los resultados obtenidos para los tres tipos de tanque, así como la nomenclatura que se seguirá en esta apartado.

Tabla 11.10.2.1. Volumen y peso de los tanques de almacenamiento.

ACRILONITRILLO (T-901/909)		
Volumen del cuerpo (m ³)	V _{cuerpo}	0.353
Volumen del cabezal (m ³)	V _{cabezal}	0.0308
Volumen del equipo vacío (m ³)	V _{vacío}	0.384
Volumen de agua (m ³)	V _{agua}	97.39
Peso del cuerpo (kg)	W _{cuerpo}	2787
Peso del cabezal (kg)	W _{cabezal}	243.23
Peso del equipo vacío (kg)	W _{vacío}	3030
Peso del equipo lleno de agua (kg)	W _{agua}	100418
Peso del equipo en operación (kg)	W _{operación}	80103
ÁCIDO CIANHÍDRICO (T-910/913)		
Volumen del cuerpo (m ³)	V _{cuerpo}	0.353
Volumen del cabezal (m ³)	V _{cabezal}	0.0308
Volumen del equipo vacío (m ³)	V _{vacío}	0.384
Volumen de agua (m ³)	V _{agua}	97.39
Peso del cuerpo (kg)	W _{cuerpo}	2787
Peso del cabezal (kg)	W _{cabezal}	243.23
Peso del equipo vacío (kg)	W _{vacío}	3030
Peso del equipo lleno de agua (kg)	W _{agua}	100418
Peso del equipo en operación (kg)	W _{operación}	80103

A continuación se va a detallar el procedimiento de cálculo de los pesos para las tres partes que forman el separador, así como del equipo al completo. Para la nomenclatura, referirse a las tablas proporcionadas en este apartado.

Cálculo del peso del cuerpo cilíndrico

El volumen del cuerpo se calcula mediante la ecuación 11.10.2.1.

$$V_{cuerpo} = \frac{\pi}{4} \left((D + 2t_{cuerpo})^2 - D^2 \right) \cdot H \quad \text{Ecuación 11.10.2.1}$$

A partir de este dato y de la densidad del material (ρ_{acero}), que para el AISI 304 es de 7850 kg/m³, se puede calcular el peso del cuerpo con la ecuación 11.10.2.2.

$$W_{cuerpo} = V_{cuerpo} \cdot \rho_{acero} \quad \text{Ecuación 11.10.2.2}$$

Cálculo del peso del cabezal y el fondo

Para calcular el volumen de acero del cabezal primero debe calcularse la superficie que ocupa mediante la ecuación 11.10.2.3.

$$S_{cabezal} = \frac{\pi}{2} D_p^2 + D_e(D_e - 2D_p) \quad \text{Ecuación 11.10.2.3}$$

Donde D_e y D_p se calculan con las ecuaciones 11.10.2.4 y 11.10.2.5, respectivamente.

$$D_e = D + 2t_{cabezal} \quad \text{Ecuación 11.10.2.4}$$

$$D_p = 0.2D_e \quad \text{Ecuación 11.10.2.5}$$

El volumen del cabezal se calcula con la ecuación 11.10.2.6.

$$V_{cabezal} = S_{cabezal} \cdot t_{cabezal} \quad \text{Ecuación 11.10.2.6}$$

Y el peso se calcula a partir de la densidad del material con la ecuación 11.10.2.7.

$$W_{cabezal} = V_{cabezal} \cdot \rho_{acero} \quad \text{Ecuación 11.10.2.7}$$

Cálculo del peso del equipo

El volumen del equipo vacío se ha calculado a partir de la ecuación 11.10.2.8.

$$V_{vacío} = V_{cuerpo} + V_{cabezal} + V_{fondo} + V_{platos}$$

$$\text{Ecuación 11.10.2.8}$$

La ecuación 11.10.2.9 se ha utilizado para el cálculo del peso del equipo vacío.

$$W_{vacío} = W_{cuerpo} + W_{cabezal} + W_{fondo} + W_{platos}$$

$$\text{Ecuación 11.10.2.9}$$

El volumen de agua que puede contener el equipo se ha calculado con la ecuación 11.10.2.10.

$$V_{agua} = \frac{\pi}{4} D^2 (H - h_{cabezal} - h_{fondo}) + V_{cabezal} + V_{fondo} - V_{platos}$$

$$\text{Ecuación 11.10.2.10}$$

El peso del equipo lleno de agua se ha calculado a partir de la ecuación 11.10.2.11.

$$W_{agua} = W_{vacío} + V_{agua} \cdot \rho_{agua} \quad \text{Ecuación 11.10.2.11}$$

11.11. Diseño de los silos (SL-901/902)

En este apartado se va a detallar el cálculo de los silos (SL-901/902) para almacenar el sulfato de amonio producido en el cristalizador, que se encuentran en el área 900.

Para realizar el dimensionamiento de los silos, se han utilizado valores típicos de equipos reales que se han encontrado en la bibliografía. Estos se encuentran resumidos en la tabla 11.11.1.

Tabla 11.11.1. Parámetros de diseño de los silos.

Parámetro	Nomenclatura	Valor
Diámetro (m)	D	3
Diámetro inferior	d	0.2
Altura cilindro (m)	H ₁	12
Altura cono (m)	H ₂	3
Altura total (m)	H	15
Ángulo (°)	A	25

La figura 11.11.1 muestra un esquema de los silos con la nomenclatura seguida.

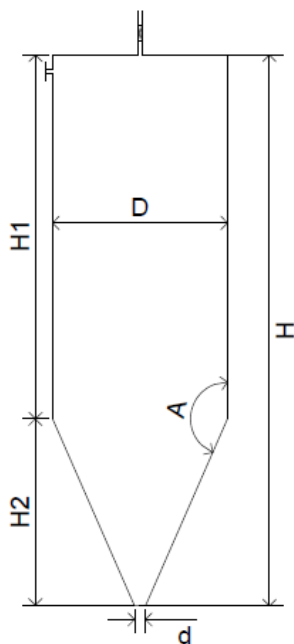


Figura 11.11.1. Esquema de los silos utilizados.

A partir de estos datos se ha calculado el volumen de los tanques con la ecuación 11.11.1.

$$V = \frac{\pi}{4} D_1^2 H_1 + \frac{\pi}{12} D^2 H_2 - \frac{\pi}{12} d^2 \cdot \tan(\alpha) \cdot \frac{d}{2} \quad \text{Ecuación 11.11.1}$$

Para el cálculo del número de silos es necesario primero conocer el volumen real que ocupa el producto dentro del silo y el volumen de estoc que necesitaremos en la planta. Estos parámetros se pueden calcular con las ecuaciones 11.11.3 y 11.11.4, respectivamente.

$$V_{ocupación} = 0.95V \quad \text{Ecuación 11.11.3}$$

$$V_{estoc} = Q \cdot t_{estoc} \quad \text{Ecuación 11.11.4}$$

Así, el número de tanques necesarios se puede calcular con la ecuación 11.11.5.

$$n^{\circ} \text{tanques} = \frac{V_{estoc}}{V_{ocupación}} \quad \text{Ecuación 11.11.5}$$

Los resultados obtenidos para las tres materias primas se encuentran resumidos en la tabla 11.11.2.

Tabla 11.11.1. Resultados del diseño de los tanques de productos líquidos.

Parámetro	Nomenclatura	Valor
Caudal volumétrico (m ³ /día)	Q	43.07
Volumen del silo (m ³)	V	91.89
Volumen ocupado (m ³)	V _{ocupación}	87.3
Días de estoc	t _{estoc}	4
Número de tanques	n ^o tanques	2

La presión de operación se ha calculado según la ecuación 11.11.6, teniendo en cuenta que se necesitará almacenar 77217 kg de sulfato de amonio en cada silo y que el área que soportará el peso es de 7.48 m².

$$P = \frac{M}{A} \quad \text{Ecuación 11.11.6}$$

11.11.1. Diseño mecánico de los silos

En este apartado se explicará el calculo del espesor de pared tanto del cuerpo como de los cabezales de los tanques de almacenamiento de productos líquidos.

Una vez se ha realizado el procedimiento de diseño de los tanques explicado en el 11.10, ya se tienen los datos necesarios para realizar el diseño mecánico. Éstos se encuentran resumidos en la tabla 11.11.1.1.

Tabla 11.11.1.1. Características y condiciones de los silos.

Parámetro	Nomenclatura	Valor
Diámetro interno cilindro (m)	D	3
Radio interno cilindro (m)	R	1.5
Altura cilindro (m)	H ₁	12
Diámetro cono (m)	D	3

Diámetro inferior cono (m)	d	0.2
Altura cilindro (m)	H ₂	3
Presión de operación (bar)	P _{op}	1.03
Presión de diseño (bar)	P	2.06
Temperatura de operación (°F)	T _{máx}	50

La tabla 11.11.1.2 recoge los demás parámetros necesarios para el cálculo del espesor de pared, así como la nomenclatura que se seguirá en las ecuaciones utilizadas a continuación.

Tabla 11.11.1.2. Parámetros para el cálculo del espesor de pared de los silos.

Parámetro	Nomenclatura	Valor
Módulo de tensión del material (bar)	S	1297
Eficacia de la unión	E	0.85
Sobreespesor de corrosión (mm)	C ₁	0.75
Tolerancia de fabricación (mm)	C ₂	0.7
Factor M	M	1.54

Para conocer el espesor de pared del cuerpo del sparador se ha aplicado la ecuación 11.11.1.1, que es válida para cuerpos cilíndricos.

$$t_{cilindro} = \frac{PR}{SE + 0.4P} + C_1 \quad \text{Ecuación 11.11.1.1}$$

Para el cono, se debe aplicar la ecuación 11.11.1.2.

$$t_{cono} = \frac{PD}{2\cos(\alpha)(SE - 0.6P)} + C_1 + C_2 \quad \text{Ecuación 11.11.1.2}$$

Otro parámetro importante a conocer es la máxima presión de trabajo permitida. Ésta se calcula según la ecuación 11.11.1.5 para el cuerpo y la ecuación 11.11.1.6 para el cabezal de los tanques.

$$P_{máx,cilindro} = \frac{SEt_{cuerpo}}{R - 0.4t} \quad \text{Ecuación 11.11.1.5}$$

$$P_{máx,cono} = \frac{2SEt_{cuerpo}\cos(\alpha)}{D + 1.2t\cos(\alpha)} \quad \text{Ecuación 11.11.1.6}$$

El módulo de tensión del material es función del tipo de material y de la máxima temperatura de operación y se determina a partir de la tabla 11.11.1.4.

Tabla 11.11.1.4. Módulos de tensión para diferentes materiales en función de la temperatura de operación.

Planta de producción de Acrilonitrilo

11. Manual de cálculos

MAXIMUM ALLOWABLE STRESS VALUES IN TENSION FOR HIGH-ALLOY STEEL
(CAUTION: See UW-12 for vessels constructed under part UW)

Specification		Maximum Allowable Stress, ksi (Multiply by 1000 to Obtain psi), for Metal Temp., °F, Not Exceeding												
Number	Grade	-20 to 100	200	300	400	500	600	650	700	750	800	850	900	950
SA-240	304	18,8	17,8	16,6	16,2	15,9	15,9	15,9	15,9	15,5	15,2	14,9	14,7	14,4
SA-240	304L	15,7	15,7	15,3	14,7	14,4	14	13,7	13,5	13,3	13	---	---	---
SA-240	316	18,8	18,8	18,4	18,1	18,0	17,0	16,7	16,3	16,1	15,9	15,7	15,5	15,4
SA-240	316L	15,7	15,7	15,7	15,5	14,4	13,5	13,2	12,9	12,6	12,4	12,1	---	---

En nuestro caso, se ha elegido un acero SA-240 de grado 304 para todos los casos.

La eficacia de unión depende del tipo de soldadura y el radiografiado que se ha llevado a cabo a la hora de fabricar el equipo y se ha determinado a partir de la tabla 11.11.1.5.

Tabla 11.11.1.5. Eficacia de unión en función de la soldadura y el radiografiado.

	Radiografiado total	Radiografiado parcial	Sin radiografiado
Soldadura simple	1	0.85	0.7
Soldadura doble	0.9	0.8	0.65

El sobreespesor de corrosión se calcula en base a la degradación que sufre la chapa metálica a lo largo del tiempo debido a la corrosión según la ecuación 11.11.1.7.

$$C_1 = 0.05 \frac{mm}{año} \cdot 15 \text{ años de vida útil} = 0.75 \text{ mm}$$

Ecuación 11.11.1.7

La tolerancia de fabricación (C_2) tiene en cuenta las posibles desviaciones entre el valor teórico que debe tener el espesor de pared y el que finalmente tiene a causa de posibles defectos en la fabricación. Se calcula como un 10% del espesor de pared teórico calculado.

De esta forma se han obtenido los resultados resumidos en la tabla 11.11.1.7.

Tabla 11.11.1.7. Grososres de pared y presiones máximas para los tanques de almacenamiento.

Parámetro	Nomenclatura	Valor
Grosor de pared del cilindro (mm)	$t_{cilindro}$	4
Grosor de pared del cono (mm)	t_{cono}	9
Presión máxima en el cilindro (bar)	$P_{m\acute{a}x,cuerpo}$	2.94
Presión máxima en el cono (bar)	$P_{m\acute{a}x,cabezal}$	2.79

11.11.2. Peso de los silos

Para conocer el peso de los tanques cuando estos se encuentran vacíos, cuando están llenos de agua para pruebas hidráulicas y en operación, se debe tener en cuenta el peso del cuerpo cilíndrico del separador, el cabezal y el fondo.

La tabla 11.11.2.1 muestra los resultados obtenidos para los tres tipos de tanque, así como la nomenclatura que se seguirá en esta apartado.

Tabla 11.11.2.1. Volumen y peso de los tanques de almacenamiento.

Parámetro	Nomenclatura	Valor
Volumen del cilindro (m ³)	V _{cilindro}	0.453
Volumen del cono (m ³)	V _{cono}	0.0454
Volumen del equipo vacío (m ³)	V _{vacío}	0.498
Volumen de agua (m ³)	V _{agua}	92.4
Peso del cilindro (kg)	W _{cilindro}	3579
Peso del cono (kg)	W _{cono}	359
Peso del equipo vacío (kg)	W _{vacío}	3937
Peso del equipo lleno de agua (kg)	W _{agua}	96338
Peso del equipo en operación (kg)	W _{operación}	167394

A continuación se va a detallar el procedimiento de cálculo de los pesos para las dos partes que forman el silo, así como del equipo al completo. Para la nomenclatura, referirse a las tablas proporcionadas en este apartado.

Cálculo del peso del cuerpo cilíndrico

El volumen del cuerpo se calcula mediante la ecuación 11.11.2.1.

$$V_{cilindro} = \frac{\pi}{4} ((D + 2t_{cilindro})^2 - D^2) \cdot H \quad \text{Ecuación 11.11.2.1}$$

A partir de este dato y de la densidad del material (ρ_{acero}), que para el AISI 304 es de 7850 kg/m³, se puede calcular el peso del cuerpo con la ecuación 11.11.2.2.

$$W_{cilindro} = V_{cilindro} \cdot \rho_{acero} \quad \text{Ecuación 11.11.2.2}$$

Cálculo del cono

El volumen del cabezal se calcula con la ecuación 11.11.2.6.

$$V_{cono} = \frac{1}{12} ((D + t)^2 - D^2) H_2 - \frac{1}{12} ((d + t)^2 - d^2) \cdot \frac{d}{2} \tan(\alpha)$$

$$\text{Ecuación 11.11.2.6}$$

Y el peso se calcula a partir de la densidad del material con la ecuación 11.11.2.7.

$$W_{cono} = V_{cono} \cdot \rho_{acero} \quad \text{Ecuación 11.11.2.7}$$

Cálculo del peso del equipo

El volumen del equipo vacío se ha calculado a partir de la ecuación 11.11.2.8.

$$V_{vacío} = V_{cilindro} + V_{cono} \quad \text{Ecuación 11.11.2.8}$$

La ecuación 11.11.2.9 se ha utilizado para el cálculo del peso del equipo vacío.

$$W_{vacío} = W_{cilindro} + W_{cono}$$

Ecuación 11.11.2.9

El volumen de agua que puede contener el equipo se ha calculado con la ecuación 11.11.2.10.

$$V_{agua} = \frac{\pi}{4} D_1^2 H_1 + \frac{\pi}{12} D^2 H_2 - \frac{\pi}{12} d^2 \cdot \tan(\alpha) \cdot \frac{d}{2}$$

Ecuación 11.11.2.10

El peso del equipo lleno de agua se ha calculado a partir de la ecuación 11.11.2.11.

$$W_{agua} = W_{vacío} + V_{agua} \cdot \rho_{agua} \quad \text{Ecuación 11.11.2.11}$$

Planta de producción de Acrilonitrilo

11. Manual de cálculos

	11	10	12	13
Propene	0,0000	0,0245	0,0409	0,0000
Ammonia	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Oxygen	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
AcryloNitril	0,0000	0,0805	0,0000	0,0165
H2O	1,0000	0,2768	0,0088	0,9732
Acrolein	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
AcetoNitrile	0,0000	0,0042	0,0000	0,0009
CO2	0,0000	0,0508	0,0847	0,0000
CO	0,0000	0,0497	0,0831	0,0000
HCN	0,0000	0,0458	0,0000	0,0094
Nitrogen	0,0000	0,4678	0,7825	0,0001
H2SO4	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
(NH4)2SO4*	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Figura 11.12.2. Composición de las corrientes del absorbedor.

La corriente de entrada de agua y de proceso se conecta a la columna y se eligen los parámetros de operación de esta, esto es, la presión y temperatura de operación, entre otros. La elección de estos parámetros se ha elegido para garantizar la mínima presencia de componentes ligeros en la corriente que sale por colas. Estos parámetros de diseño se ven reflejados en la figura 11.12.3.

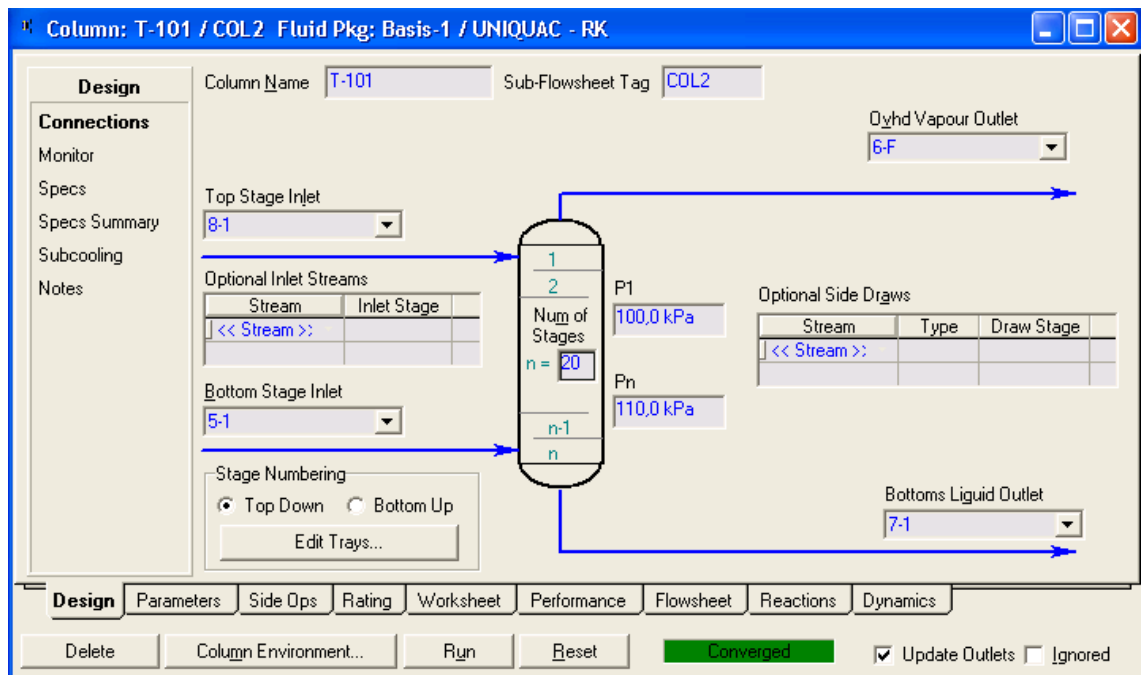


Figura 11.12.3. Condiciones de operación del absorbedor SC-401.

Como se puede apreciar, la columna tiene 20 platos y trabaja a presión atmosférica.

De esta forma, una vez el integrador que incorpora Hysys ha logrado obtener una solución para la columna, se obtienen los corrientes de salida (12 y 13) que se han mostrado en las figuras 11.12.1 y 11.12.2.

Como se ha podido apreciar, se ha conseguido que la corriente que sale por colas esté formada básicamente por agua, acrilonitrilo, acetonitrilo y ácido cianhídrico, consiguiendo que los componentes más ligeros abandonen el absorbedor en forma de gas por la parte superior.

11.12.1. Diseño mecánico del absorbedor

En este apartado se explicará el cálculo del espesor de pared tanto del cuerpo como de los cabezales del absorbedor SC-401.

Una vez se ha realizado el procedimiento de diseño del separador explicado en el 11.12, ya se tienen los datos necesarios para realizar el diseño mecánico. Éstos se encuentran resumidos en la tabla 11.12.1.1.

Tabla 11.12.1.1. Características y condiciones de operación del absorbedor.

Parámetro	Nomenclatura	Valor
Diámetro interno (m)	D	1.9
Radio interno (m)	R	0.95
Altura (m)	H	12
Presión de operación (bar)	P _{op}	1.1
Presión de diseño (bar)	P	1.265
Temperatura de operación (°F)	T _{máx}	150

La tabla 11.12.1.2 recoge los demás parámetros necesarios para el cálculo del espesor de pared, así como la nomenclatura que se seguirá en las ecuaciones utilizadas a continuación.

Tabla 11.12.1.2. Parámetros para el cálculo del espesor de pared del absorbedor.

Parámetro	Nomenclatura	Valor
Módulo de tensión del material (bar)	S	1228
Eficacia de la unión	E	0.85
Sobreespesor de corrosión (mm)	C ₁	0.75
Tolerancia de fabricación (mm)	C ₂	0.3
Factor M	M	1.54

Para conocer el espesor de pared del cuerpo del absorbedor se ha aplicado la ecuación 11.12.1.1, que es válida para cuerpos cilíndricos.

$$t_{cuerpo} = \frac{PR}{SE + 0.4P} + C_1 \quad \text{Ecuación 11.12.1.1}$$

Planta de producción de Acrilonitrilo

11. Manual de cálculos

Para el cabezal, se debe aplicar la ecuación 11.12.1.2, que es válida para cabezales toriesféricos. Cabe destacar que, como el fondo es del mismo tipo que el cabezal, todas las ecuaciones referentes al segundo son igualmente aplicables al primero.

$$t_{cabezal} = \frac{PDM}{2SE - 0.2P} + C_1 + C_2 \quad \text{Ecuación 11.12.1.2}$$

Otro parámetro importante a conocer es la máxima presión de trabajo permitida. Ésta se calcula según la ecuación 11.12.1.3 para el cuerpo y la ecuación 11.12.1.4 para el cabezal del separador.

$$P_{m\acute{a}x,cuerpo} = \frac{SEt_{cuerpo}}{R - 0.4t} \quad \text{Ecuación 11.12.1.3}$$

$$P_{m\acute{a}x,cabezal} = \frac{2SEt_{cuerpo}}{DM - 0.4t} \quad \text{Ecuación 11.12.1.4}$$

El módulo de tensión del material es función del tipo de material y de la máxima temperatura de operación y se determina a partir de la tabla 11.12.1.3.

Tabla 11.12.1.3. Módulos de tensión para diferentes materiales en función de la temperatura de operación.

Specification		MAXIMUM ALLOWABLE STRESS VALUES IN TENSION FOR HIGH-ALLOY STEEL (CAUTION: See UW-12 for vessels constructed under part UW Maximum Allowable Stress, ksi (Multiply by 1000 to Obtain psi), for Metal Temp., °F, Not Exceeding												
Number	Grade	-20 to 100	200	300	400	500	600	650	700	750	800	850	900	950
SA-240	304	18,8	17,8	16,6	16,2	15,9	15,9	15,9	15,9	15,5	15,2	14,9	14,7	14,4
SA-240	304L	15,7	15,7	15,3	14,7	14,4	14	13,7	13,5	13,3	13	---	---	---
SA-240	316	18,8	18,8	18,4	18,1	18,0	17,0	16,7	16,3	16,1	15,9	15,7	15,5	15,4
SA-240	316L	15,7	15,7	15,7	15,5	14,4	13,5	13,2	12,9	12,6	12,4	12,1	---	---

En nuestro caso, se ha elegido un acero SA-240 de grado 304.

La eficacia de unión depende del tipo de soldadura y el radiografiado que se ha llevado a cabo a la hora de fabricar el equipo y se ha determinado a partir de la tabla 11.12.1.4.

Tabla 11.12.1.4. Eficacia de unión en función de la soldadura y el radiografiado.

	Radiografiado total	Radiografiado parcial	Sin radiografiado
Soldadura simple	1	0.85	0.7
Soldadura doble	0.9	0.8	0.65

El sobreespesor de corrosión se calcula en base a la degradación que sufre la chapa metálica a lo largo del tiempo debido a la corrosión según la ecuación 11.12.1.5.

$$C_1 = 0.05 \frac{mm}{a\tilde{n}o} \cdot 15 \text{ años de vida útil} = 0.75 \text{ mm}$$

11. Manual de cálculos

Ecuación 11.12.1.5

La tolerancia de fabricación (C_2) tiene en cuenta las posibles desviaciones entre el valor teórico que debe tener el espesor de pared y el que finalmente tiene a causa de posibles defectos en la fabricación. Se calcula como un 10% del espesor de pared teórico calculado.

El factor M depende del tipo de cabezal que se esté utilizando y se determina a partir de la tabla 11.12.1.5 con el valor obtenido en la ecuación 11.12.1.8, válido para un cabezal tipo Klopper.

$$L = D \quad \text{Ecuación 11.12.1.6}$$

$$r = 0.1D \quad \text{Ecuación 11.12.1.7}$$

$$\frac{L}{r} = \frac{D}{0.1D} = 10 \quad \text{Ecuación 11.12.1.8}$$

Tabla 11.12.1.5. Factor M para diferentes valores de L/r.

VALUES OF FACTOR "M"																	
L/r	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50	2.75	3.00	3.25	3.50	4.00	4.50	5.00	5.50	6.00	6.50
M	1.00	1.03	1.06	1.08	1.10	1.13	1.15	1.17	1.18	1.20	1.22	1.25	1.28	1.31	1.34	1.36	1.39
L/r	7.00	7.50	8.00	8.50	9.00	10.0	10.5	11.0	11.5	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	16.3	*	
M	1.41	1.44	1.46	1.48	1.50	1.52	1.54	1.56	1.58	1.60	1.62	1.65	1.69	1.72	1.75	1.77	
* THE MAXIMUM ALLOWED RATIO : L = D + 2t (see note 2 on facing page)																	

De esta forma se han obtenido los resultados resumidos en la tabla 11.12.1.6.

Tabla 11.12.1.6. Grosos de pared y presiones máximas para el absorbedor.

Parámetro	Nomenclatura	Valor
Grosor de pared del cuerpo (mm)	t_{cuerpo}	2
Grosor de pared del cabezal (mm)	t_{cabezal}	3
Grosor de pared del fondo (mm)	t_{fondo}	3
Presión máxima en el cuerpo (bar)	$P_{\text{máx,cuerpo}}$	2.20
Presión máxima en el cabezal (bar)	$P_{\text{máx,cabezal}}$	2.14
Presión máxima en el fondo (bar)	$P_{\text{máx,fondo}}$	2.14

11.12.2. Peso del absorbedor

Para conocer el peso del absorbedor cuando éste se encuentra vacío, cuando está lleno de agua para pruebas hidráulicas y en operación, se debe tener en cuenta el peso del cuerpo cilíndrico del absorbedor, el cabezal y el fondo.

La tabla 11.12.2.1 muestra los resultados obtenidos, así como la nomenclatura que se seguirá en esta apartado.

Tabla 11.12.2.1. Volumen y peso del absorbedor.

Parámetro	Nomenclatura	Valor
Volumen del cuerpo (m ³)	V _{cuerpo}	0.143
Volumen del cabezal (m ³)	V _{cabezal}	0.00675
Volumen del fondo (m ³)	V _{fondo}	0.00675
Volumen del equipo vacío (m ³)	V _{vacío}	0.150
Volumen de agua (m ³)	V _{agua}	32.92
Peso del cuerpo (kg)	W _{cuerpo}	1126
Peso del cabezal (kg)	W _{cabezal}	106.0
Peso del fondo (kg)	W _{fondo}	106.0
Peso del relleno (kg)	W _{relleno}	94.4
Peso del equipo vacío (kg)	W _{vacío}	1232
Peso del equipo lleno de agua (kg)	W _{agua}	34246
Peso del equipo en operación (kg)	W _{operación}	29209

A continuación se va a detallar el procedimiento de cálculo de los pesos para las tres partes que forman el absorbedor, así como del equipo al completo. Para la nomenclatura, referirse a las tablas proporcionadas en este apartado.

Cálculo del peso del cuerpo cilíndrico

El volumen del cuerpo se calcula mediante la ecuación 11.12.2.1.

$$V_{cuerpo} = \frac{\pi}{4} \left((D + 2t_{cuerpo})^2 - D^2 \right) \cdot H \quad \text{Ecuación 11.12.2.1}$$

A partir de este dato y de la densidad del material (ρ_{acero}), que para el AISI 304 es de 7850 kg/m³, se puede calcular el peso del cuerpo con la ecuación 11.12.2.2.

$$W_{cuerpo} = V_{cuerpo} \cdot \rho_{acero} \quad \text{Ecuación 11.12.2.2}$$

Cálculo del peso del cabezal y el fondo

Como el cabezal y el fondo en el absorbedor son del mismo tipo (torisféricos), el cálculo de su peso también va a ser igual. Es por eso que aunque las ecuaciones proporcionadas en este sub-apartado solo hagan referencia al cabezal, son aplicables también al fondo.

Para calcular el volumen de acero del cabezal primero debe calcularse la superficie que ocupa mediante la ecuación 11.12.2.3.

$$S_{cabezal} = \frac{\pi}{2} D_p^2 + D_e(D_e - 2D_p) \quad \text{Ecuación 11.12.2.3}$$

Donde D_e y D_p se calculan con las ecuaciones 11.12.2.4 y 11.12.2.5, respectivamente.

11. Manual de cálculos

$$D_e = D + 2t_{cabezal} \quad \text{Ecuación 11.12.2.4}$$

$$D_p = 0.2D_e \quad \text{Ecuación 11.12.2.5}$$

El volumen del cabezal se calcula con la ecuación 11.12.2.6.

$$V_{cabezal} = S_{cabezal} \cdot t_{cabezal} \quad \text{Ecuación 11.12.2.6}$$

Y el peso se calcula a partir de la densidad del material con la ecuación 11.12.2.7.

$$W_{cabezal} = V_{cabezal} \cdot \rho_{acero} \quad \text{Ecuación 11.12.2.7}$$

Cálculo del peso del equipo

El volumen del equipo vacío se ha calculado a partir de la ecuación 11.12.2.8.

$$V_{vacío} = V_{cuerpo} + V_{cabezal} + V_{fondo} + V_{relleno}$$

$$\text{Ecuación 11.6.2.8}$$

La ecuación 11.12.2.9 se ha utilizado para el cálculo del peso del equipo vacío.

$$W_{vacío} = W_{cuerpo} + W_{cabezal} + W_{fondo} + W_{relleno}$$

$$\text{Ecuación 11.6.2.9}$$

El volumen de agua que puede contener el equipo se ha calculado con la ecuación 11.12.2.10.

$$V_{agua} = \frac{\pi}{4} D^2 (H - h_{cabezal} - h_{fondo}) + V_{cabezal} + V_{fondo}$$

$$\text{Ecuación 11.6.2.10}$$

El peso del equipo lleno de agua se ha calculado a partir de la ecuación 11.12.2.11.

$$W_{agua} = W_{vacío} + V_{agua} \cdot \rho_{agua} \quad \text{Ecuación 11.6.2.11}$$

11.13 Diseño de los Separadores Trifásicos

11.13.1 Separador Trifásico D-401

El Separador Trifásico D-401 tiene como objetivo principal la separación de la fase acuosa, orgánica y gaseosa, de la corriente que sale del intercambiador E-409.

Esta separación se realiza por los siguientes motivos:

- Fase acuosa: En vías de obtener un corriente de agua libre de impurezas, para poder ser reutilizada en el proceso como fuente de alimentación de los Quench y el absorber.
- La fase Orgánica resultante de esta corriente es tratada por una empresa externa, por ello, con el objetivo de reducir el volumen de los tanques de almacenaje de este residuo, así como la minimización del volumen a tratar, hemos de concentrarlo.
- Fase gaseosa: Esta fase tendrá un caudal mínimo, debido a que principalmente los gases no condensables han sido extraídos en las columnas previas. Esta corriente será tratada en el área 500.

El diseño del Separador Trifásico D401 se ha realizado con el programa Hysys. Este programa requiere para el dimensionamiento del separador:

- La corriente de entrada al equipo definida.
- Las condiciones de operación fijadas.
- Las especificaciones de diseño de separador.

Para ello en primera instancia hemos de caracterizar la corriente que entrará al separador trifásico. Esta información se puede ver en las figuras 11.13.1.1 y 11.13.1.2, que muestran las condiciones y la composición de las corrientes, respectivamente.

Worksheet	Name	Entrada Fluido	F_Orgánica	F_Gaseosa	F_Acuosa
Conditions	Vapour	0,0000	0,0000	1,0000	0,0000
Properties	Temperature [C]	20,00	20,00	20,00	20,00
Properties	Pressure [kPa]	100,0	100,0	100,0	100,0
Composition	Molar Flow [kgmole/h]	8930	26,00	0,0000	8904
Composition	Mass Flow [kg/h]	1,617e+005	1296	0,0000	1,604e+005
PF Specs	Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	162,4	1,620	0,0000	160,7
PF Specs	Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	-2,841e+005	1,216e+005	0,0000	-2,853e+005
PF Specs	Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	5,375	39,30	0,0000	5,276
PF Specs	Heat Flow [kJ/h]	-2,537e+009	3,160e+006	0,0000	-2,540e+009

Figura 11.13.1.1. Condiciones de operación de las corrientes del Separador Trifásico D-401

Worksheet	Entrada Fluído	F_Orgánica	F_Gaseosa	F_Acuosa
Propene	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Ammonia	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Oxygen	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
AcryloNitril	0,0021	0,7307	0,7577	0,0000
H2O	0,9971	0,0005	0,0279	1,0000
Acrolein	0,0000	0,0018	0,0049	0,0000
AcetoNitrile	0,0008	0,2670	0,2096	0,0000
CO2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
CO	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
HCN	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Nitrogen	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
H2SO4	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
EGlycol	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
(NH4)2SO4*	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Air	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Figura 11.13.1.2. Composición molar de las corrientes del Separador Trifásico D-401

Una vez caracterizada las corrientes de entrada y salida del separador Trifásico, se ha procedido a su dimensionamiento mediante la Utility “Vessel Sizing” de Hysys.

En ella, se ha especificado que sea un separador trifásico horizontal, la relación L/D y el tiempo de residencia de la fase acuosa y orgánica, tal como se aprecia en las figuras 11.13.1.3 y 11.13.1.4.

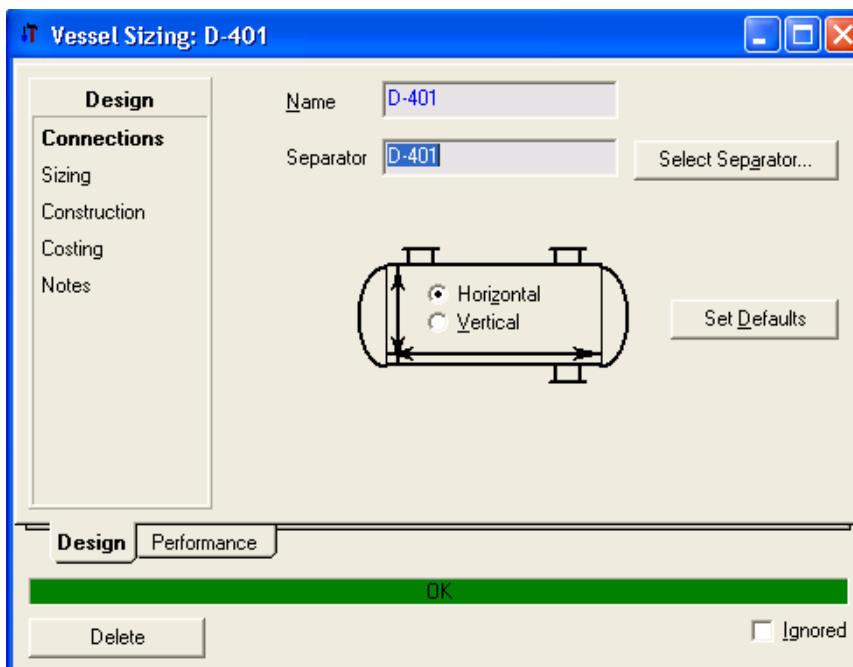


Figura 11.13.1.3. Especificación de diseño del Separador Trifásico D-401

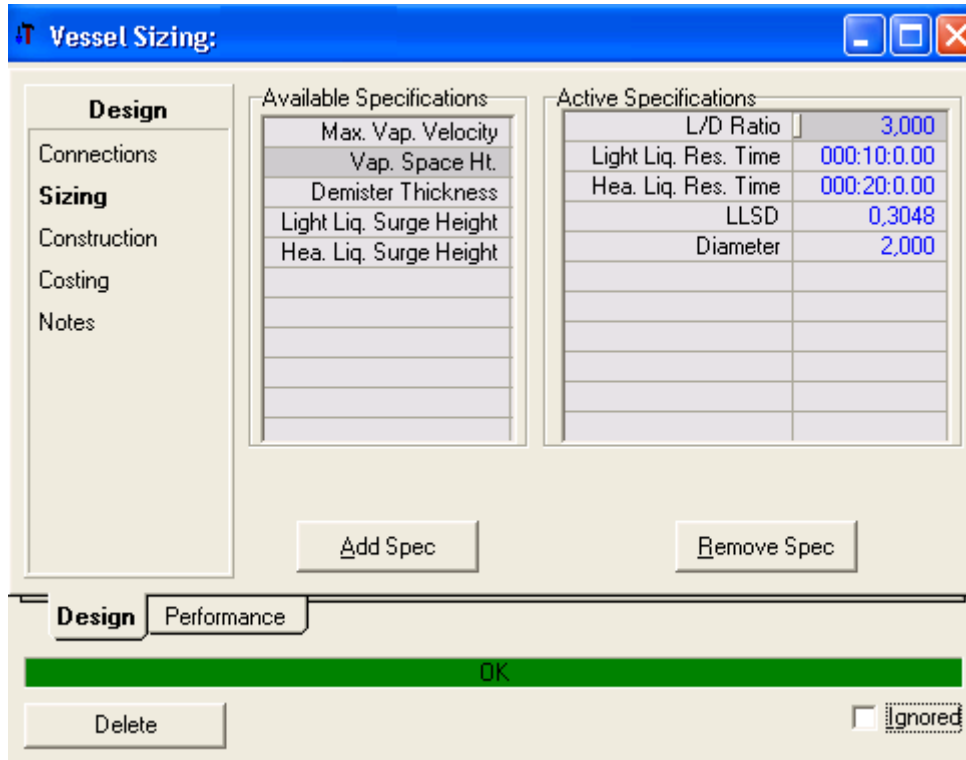


Figura 11.13.1.4. Especificaciones del Separador Trifásico D-401

En función de las variables especificadas en el dimensionamiento de nuestro separador, hysys nos otorga los resultados del dimensionamiento del equipo, información de la construcción del equipo, los costos y el espacio para la fase gaseosa en el equipo, tal como se aprecia en las figuras 11.13.1.5-11.13.1.8.

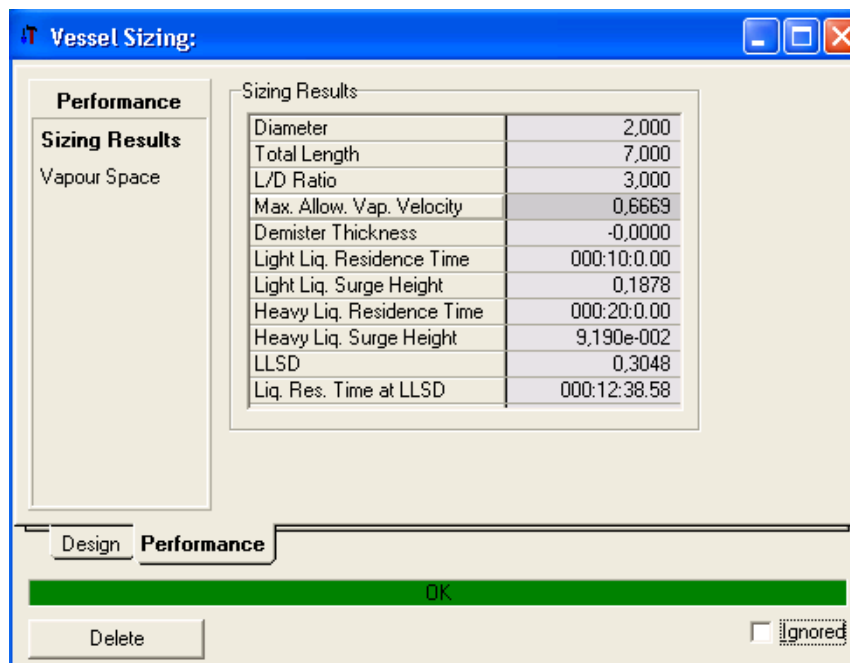


Figura 11.13.1.5. Resultados del dimensionamiento del Separador Trifásico D-401

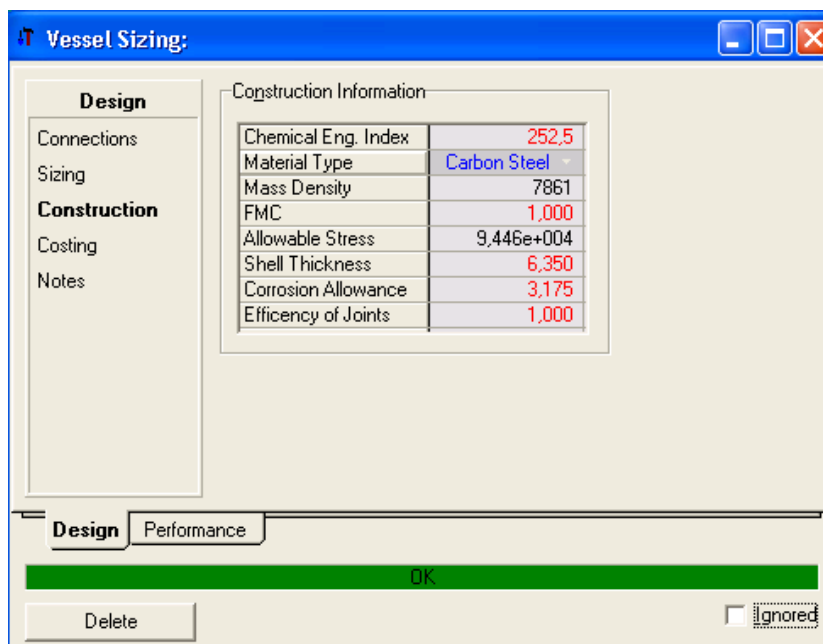


Figura 11.13.1.6. Información de la construcción del Separador Trifásico D-401

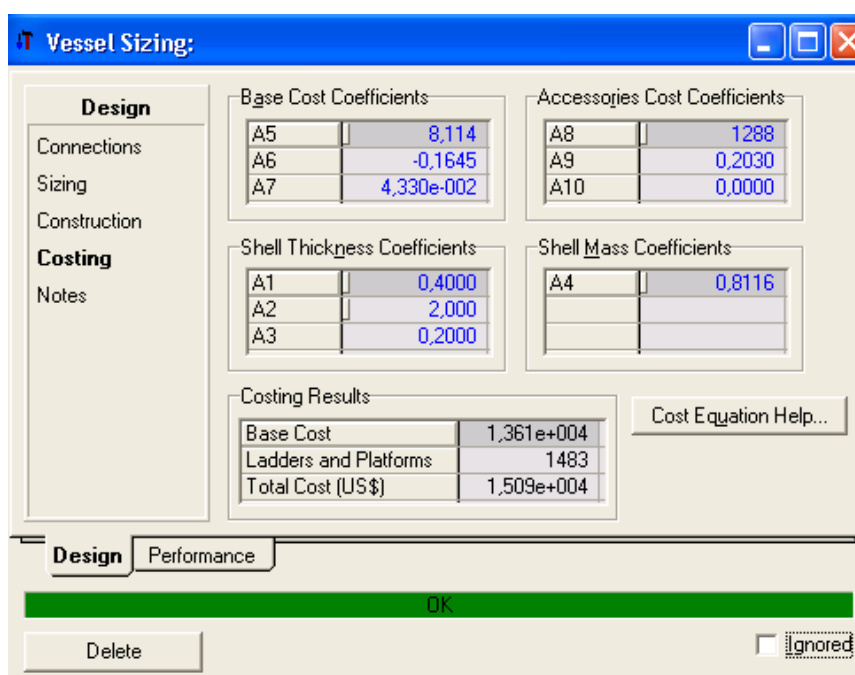


Figura 11.13.1.7. Información de los costos del Separador Trifásico D-401

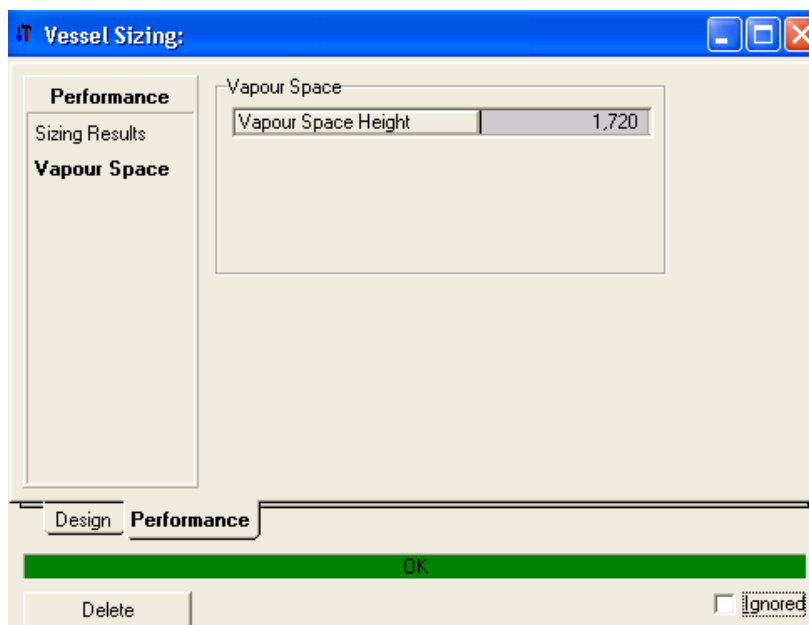


Figura 11.13.1.8. Información del espacio de la fase Gaseosa del Separador Trifásico D-401

Tal como se puede apreciar en la figura 11.13.1.2, con la implementación del separador D-401 se logra obtener una corriente Acuosa, cuya fracción molar del agua es de 1 y una corriente Orgánica concentrada en Acrilonitrilo y Acetonitrilo.

11.13.2 Separador Trifásico D-402

El Separador Trifásico D-402 tiene como objetivo principal la separación de la fase acuosa, orgánica y gaseosa, de la corriente que sale del intercambiador E-411.

Esta separación se realiza por los siguientes motivos:

- Fase acuosa: Es indispensable extraer el agua de la corriente líquida que va a la columna TD-403, ya que además de ser de un volumen considerable, ello ocasionaría más dificultades en la separación del Acrilonitrilo en la columna, así como unos gastos energéticos innecesarios.
- Fase orgánica: Esta es nuestra corriente de interés y será la que introduzcamos en la columna TD403.
- Fase gaseosa: Esta fase tendrá un caudal mínimo, debido a que principalmente los gases no condensables han sido extraídos en las columnas previas. Esta corriente será tratada en el área 500.

El diseño del Separador Trifásico D402 se ha realizado con el programa Hysys. Este programa requiere para el dimensionamiento del separador

Planta de producción de Acrilonitrilo

11. Manual de cálculos

- La corriente de entrada al equipo definida.
- las condiciones de operación fijadas.
- Las especificaciones de diseño de separador.

Para ello en primera instancia hemos de caracterizar la corriente que entrará al separador trifásico. Esta información se puede ver en las figuras 11.13.2.1 y 11.13.2.2, que muestran las condiciones y la composición de las corrientes, respectivamente.

Worksheet	Name	Entrada	Fase Orgánica	Fase Gaseosa	Fase Acuosa
Conditions	Vapour	0,0000	0,0000	1,0000	0,0000
	Temperature [C]	20,00	20,00	20,00	20,00
Properties	Pressure [kPa]	100,0	100,0	100,0	100,0
	Molar Flow [kgmole/h]	178,4	125,5	0,0000	52,87
Composition	Mass Flow [kg/h]	7599	6647	0,0000	952,5
	Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	9,212	8,258	0,0000	0,9544
PF Specs	Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	1,911e+004	1,474e+005	0,0000	-2,853e+005
	Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	22,52	29,78	0,0000	5,276
	Heat Flow [kJ/h]	3,408e+006	1,849e+007	0,0000	-1,508e+007

Figura 11.13.2.1. Condiciones de operación de las corrientes del Separador Trifásico D-402

Worksheet		Entrada	Fase Orgánica	Fase Gaseosa	Fase Acuosa
Conditions	Propene	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	Ammonia	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Properties	Oxygen	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	AcryloNitril	0,6988	0,9933	0,9676	0,0000
Composition	H2O	0,2968	0,0005	0,0276	1,0000
	Acrolein	0,0000	0,0001	0,0002	0,0000
	AcetoNitrile	0,0043	0,0061	0,0045	0,0000
	CO2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	CO	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	HCN	0,0000	0,0000	0,0001	0,0000
	Nitrogen	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	H2SO4	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	EGlycol	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	(NH4)2SO4*	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	Air	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Figura 11.13.2.2. Composición molar de las corrientes del Separador Trifásico D-402

Una vez caracterizada las corrientes de entrada y salida del separador Trifásico, se ha procedido a su dimensionamiento mediante la Utility “Vessel Sizing” de Hysys.

En ella, se ha especificado que sea un separador trifásico horizontal, la relación L/D y el tiempo de residencia de la fase acuosa y orgánica, tal como se aprecia en las figuras 11.13.2.3 y 11.13.2.4.

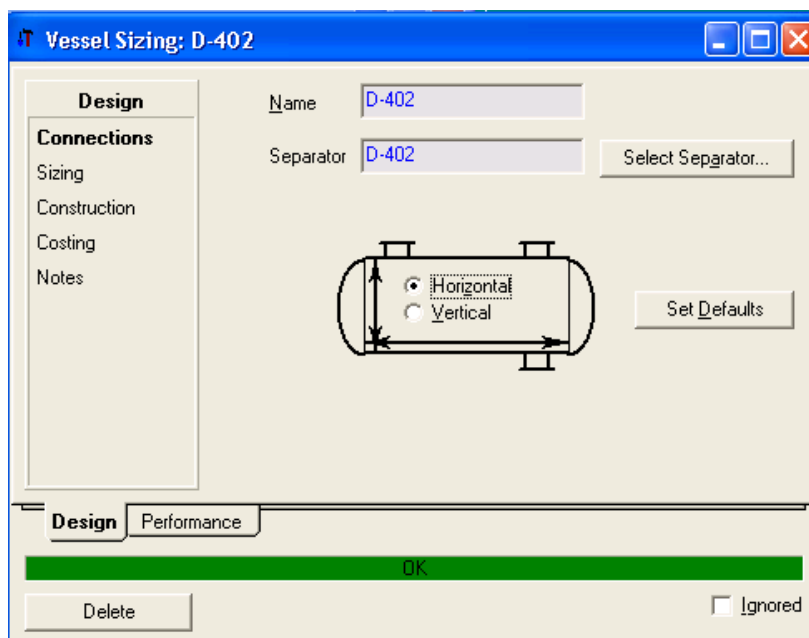


Figura 11.13.2.3. Especificación de diseño del Separador Trifásico D-402

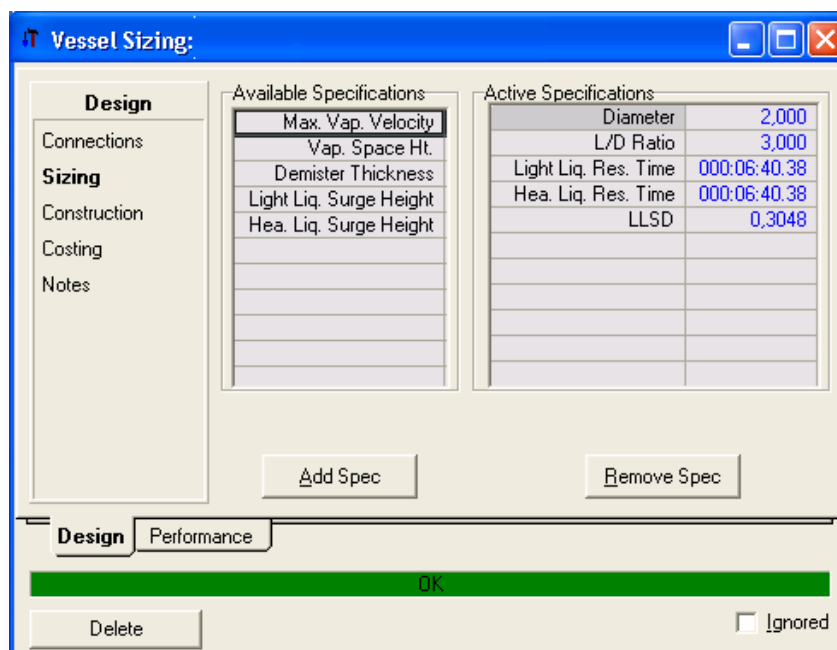


Figura 11.13.2.4. Especificaciones del Separador Trifásico D-402

En función de las variables especificadas en el dimensionamiento de nuestro separador, hysys nos otorga los resultados del dimensionamiento del equipo, información de la

construcción del equipo, los costos y el espacio para la fase gaseosa en el equipo, tal como se aprecia en las figuras 11.13.2.5-11.13.2.8.

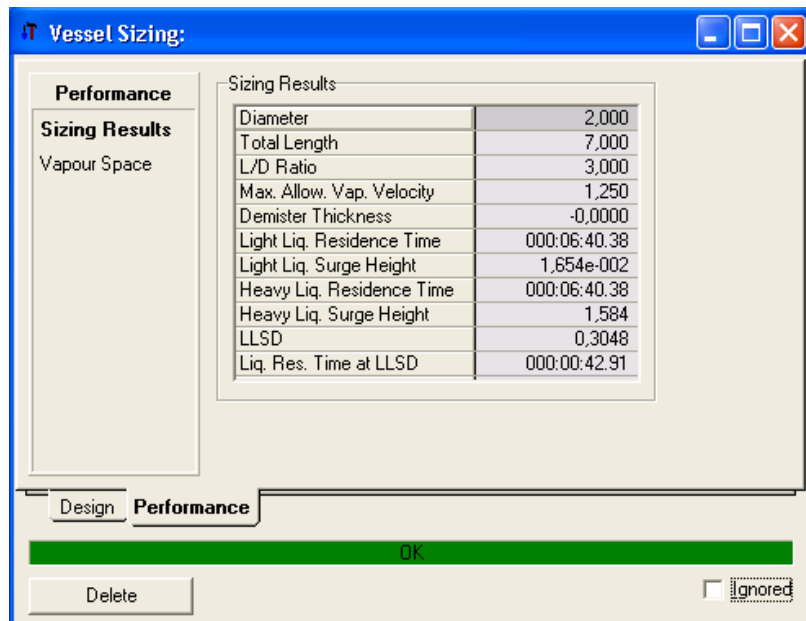


Figura 11.13.2.5. Resultados del dimensionamiento del Separador Trifásico D-402

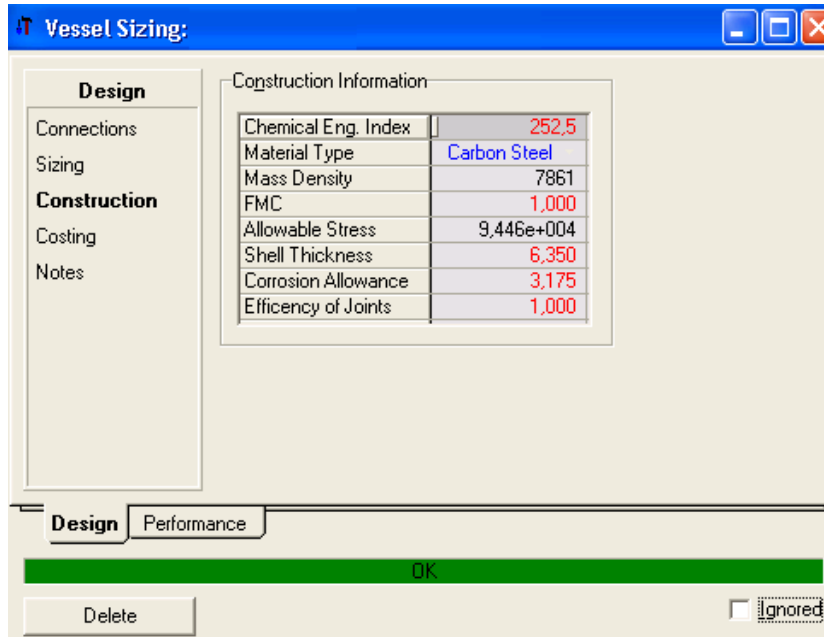


Figura 11.13.2.6. Información de la construcción del Separador Trifásico D-402

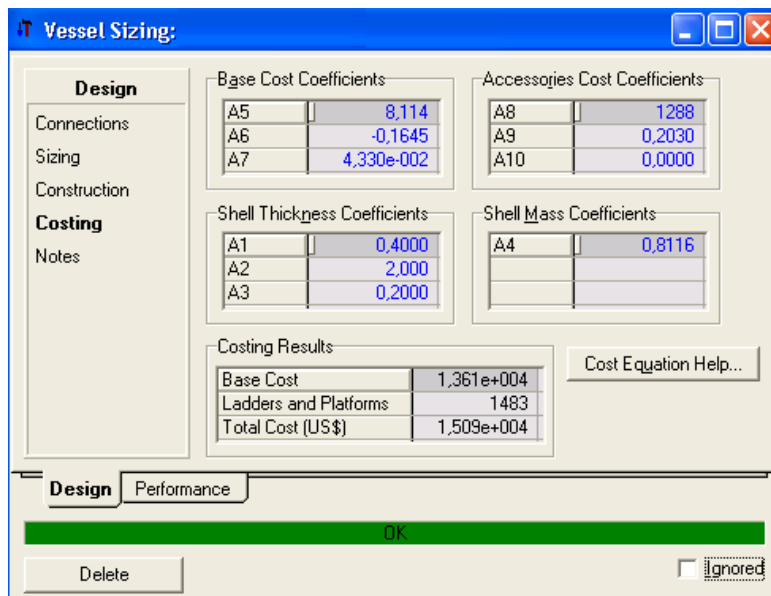


Figura 11.13.2.7. Información de los costos del Separador Trifásico D-402

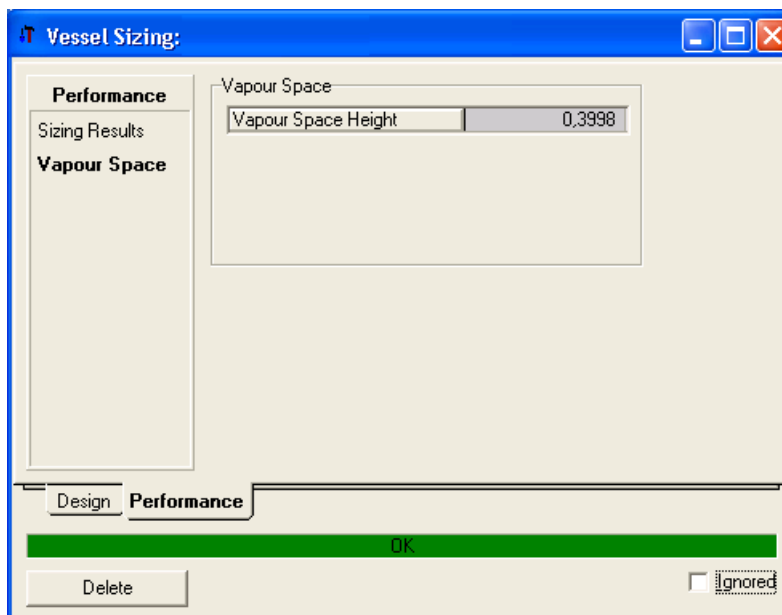


Figura 11.13.2.8. Información del espacio de la fase Gaseosa del Separador Trifásico D-402

Tal como se puede apreciar en la figura 11.13.2.2, con la implementación del separador D-402 se logra obtener:

- Una corriente Acuosa, cuya fracción molar del agua es de 1.
- Una corriente Orgánica, en la que se ha logrado concentrar el Acrilonitrilo, pasando de 0.6991 a 0.9934 en fracción molar.

11.13.3. Diseño mecánico de los separadores trifásicos

En este apartado se explicará el cálculo del espesor de pared tanto del cuerpo como de los cabezales de los separadores trifásicos D-401 y D-402.

Una vez se ha realizado el procedimiento de diseño de los separadores explicado en los 11.13.1 y 11.13.2, ya se tienen los datos necesarios para realizar el diseño mecánico. Éstos se encuentran resumidos en la tabla 11.13.3.1.

Tabla 11.13.3.1. Características y condiciones de operación de los separadores trifásicos.

D-401		
Diámetro interno (m)	D	2.3
Radio interno (m)	R	1.15
Longitud (m)	L	8.1
Presión de operación (bar)	P _{op}	1
Presión de diseño (bar)	P	1.15
Temperatura de operación (°F)	T _{máx}	75
D-402		
Diámetro interno (m)	D	1.1
Radio interno (m)	R	0.55
Longitud (m)	L	8.1
Presión de operación (bar)	P _{op}	1
Presión de diseño (bar)	P	1.15
Temperatura de operación (°F)	T _{máx}	140

La tabla 11.13.3.2 recoge los demás parámetros necesarios para el cálculo del espesor de pared, así como la nomenclatura que se seguirá en las ecuaciones utilizadas a continuación.

Tabla 11.13.3.2. Parámetros para el cálculo del espesor de pared del trifásico.

D-401		
Módulo de tensión del material (bar)	S	1297
Eficacia de la unión	E	0.85
Sobreespesor de corrosión (mm)	C ₁	0.75
Tolerancia de fabricación (mm)	C ₂	0.3
Factor M	M	1.54
D-402		
Módulo de tensión del material (bar)	S	1297
Eficacia de la unión	E	0.85
Sobreespesor de corrosión (mm)	C ₁	0.75
Tolerancia de fabricación (mm)	C ₂	0.2
Factor M	M	1.54

Para conocer el espesor de pared del cuerpo del separador se ha aplicado la ecuación 11.13.3.1, que es válida para cuerpos cilíndricos.

$$t_{cuerpo} = \frac{PR}{SE + 0.4P} + C_1 \quad \text{Ecuación 11.13.3.1}$$

Planta de producción de Acrilonitrilo

11. Manual de cálculos

Para el cabezal, se debe aplicar la ecuación 11.13.3.2, que es válida para cabezales toriesféricos. Cabe destacar que, como el fondo es del mismo tipo que el cabezal, todas las ecuaciones referentes al segundo són igualmente aplicables al primero.

$$t_{cabezal} = \frac{PDM}{2SE - 0.2P} + C_1 + C_2 \quad \text{Ecuación 11.13.3.2}$$

Otro parámetro importante a conocer es la máxima presión de trabajo permitida. Esta se calcula según la ecuación 11.13.3.3 para el cuerpo y la ecuación 11.13.3.4 para el cabezal del separador.

$$P_{m\acute{a}x,cuerpo} = \frac{SEt_{cuerpo}}{R - 0.4t} \quad \text{Ecuación 11.13.3.3}$$

$$P_{m\acute{a}x,cabezal} = \frac{2SEt_{cuerpo}}{DM - 0.4t} \quad \text{Ecuación 11.13.3.4}$$

El módulo de tensión del material es función del tipo de material y de la máxima temperatura de operación y se determina a partir de la tabla 11.13.3.3.

Tabla 11.13.3.3. Módulos de tensión para diferentes materiales en función de la temperatura de operación.

Specification		MAXIMUM ALLOWABLE STRESS VALUES IN TENSION FOR HIGH-ALLOY STEEL (CAUTION: See UW-12 for vessels constructed under part UW Maximum Allowable Stress, ksi (Multiply by 1000 to Obtain psi), for Metal Temp., °F, Not Exceeding												
Number	Grade	-20 to 100	200	300	400	500	600	650	700	750	800	850	900	950
SA-240	304	18,8	17,8	16,6	16,2	15,9	15,9	15,9	15,9	15,5	15,2	14,9	14,7	14,4
SA-240	304L	15,7	15,7	15,3	14,7	14,4	14	13,7	13,5	13,3	13	---	---	---
SA-240	316	18,8	18,8	18,4	18,1	18,0	17,0	16,7	16,3	16,1	15,9	15,7	15,5	15,4
SA-240	316L	15,7	15,7	15,7	15,5	14,4	13,5	13,2	12,9	12,6	12,4	12,1	---	---

En nuestro caso, se ha elegido un acero SA-240 de grado 304 para D-401 y de grado 316 para D-402.

La eficacia de unión depende del tipo de soldadura y el radiografiado que se ha llevado a cabo a la hora de fabricar el equipo y se ha determinado a partir de la tabla 11.13.3.4.

Tabla 11.13.3.4. Eficacia de unión en función de la soldadura y el radiografiado.

	Radiografiado total	Radiografiado parcial	Sin radiografiado
Soldadura simple	1	0.85	0.7
Soldadura doble	0.9	0.8	0.65

El sobreespesor de corrosión se calcula en base a la degradación que sufre la chapa metálica a lo largo del tiempo debido a la corrosión según la ecuación 11.13.3.5.

$$C_1 = 0.05 \frac{mm}{a\acute{n}o} \cdot 15 \text{ años de vida útil} = 0.75 \text{ mm}$$

Ecuación 11.13.3.5

11. Manual de cálculos

La tolerancia de fabricación (C_2) tiene en cuenta las posibles desviaciones entre el valor teórico que debe tener el espesor de pared y el que finalmente tiene a causa de posibles defectos en la fabricación. Se calcula como un 10% del espesor de pared teórico calculado.

El factor M depende del tipo de cabezal que se esté utilizando y se determina a partir de la tabla 11.13.3.5 con el valor obtenido en la ecuación 11.13.3.8, válido para un cabezal tipo Klopfer.

$$L = D \quad \text{Ecuación 11.13.4.6}$$

$$r = 0.1D \quad \text{Ecuación 11.13.4.7}$$

$$\frac{L}{r} = \frac{D}{0.1D} = 10 \quad \text{Ecuación 11.13.4.8}$$

Tabla 11.13.3.5. Factor M para diferentes valores de L/r.

VALUES OF FACTOR "M"																	
L/r	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50	2.75	3.00	3.25	3.50	4.00	4.50	5.00	5.50	6.00	6.50
M	1.00	1.03	1.06	1.08	1.10	1.13	1.15	1.17	1.18	1.20	1.22	1.25	1.28	1.31	1.34	1.36	1.39
L/r	7.00	7.50	8.00	8.50	9.00	9.50	10.0	10.5	11.0	11.5	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	16.3	*
M	1.41	1.44	1.46	1.48	1.50	1.52	1.54	1.56	1.58	1.60	1.62	1.65	1.69	1.72	1.75	1.77	
* THE MAXIMUM ALLOWED RATIO : L = D + 2t (see note 2 on facing page)																	

De esta forma se han obtenido los resultados resumidos en la tabla 11.13.3.6.

Tabla 11.13.3.6. Grosos de pared y presiones máximas para el trifásico

D-401		
Grosor de pared del cuerpo (mm)	t_{cuerpo}	2
Grosor de pared del cabezal (mm)	t_{cabezal}	3
Grosor de pared del fondo (mm)	t_{fondo}	3
Presión máxima en el cuerpo (bar)	$P_{\text{máx,cuerpo}}$	1.92
Presión máxima en el cabezal (bar)	$P_{\text{máx,cabezal}}$	1.87
Presión máxima en el fondo (bar)	$P_{\text{máx,fondo}}$	1.87
D-402		
Grosor de pared del cuerpo (mm)	t_{cuerpo}	2
Grosor de pared del cabezal (mm)	t_{cabezal}	2
Grosor de pared del fondo (mm)	t_{fondo}	2
Presión máxima en el cuerpo (bar)	$P_{\text{máx,cuerpo}}$	4.01
Presión máxima en el cabezal (bar)	$P_{\text{máx,cabezal}}$	2.60
Presión máxima en el fondo (bar)	$P_{\text{máx,fondo}}$	2.60

11.13.4. Peso de los separadores trifásicos

Para conocer el peso de los separadores cuando éstos se encuentran vacíos, cuando están llenos de agua para pruebas hidráulicas y en operación, se debe tener en cuenta el peso del cuerpo cilíndrico de los separadores, el cabezal y el fondo.

La tabla 11.13.4.1 muestra los resultados obtenidos, así como la nomenclatura que se seguirá en esta apartado.

Tabla 11.13.4.1. Volumen y peso del trifásico.

D-401		
Volumen del cuerpo (m ³)	V _{cuerpo}	0.0117
Volumen del cabezal (m ³)	V _{cabezal}	0.0102
Volumen del fondo (m ³)	V _{fondo}	0.0102
Volumen del equipo vacío (m ³)	V _{vacío}	0.127
Volumen de agua (m ³)	V _{agua}	21.28
Peso del cuerpo (kg)	W _{cuerpo}	919.7
Peso del cabezal (kg)	W _{cabezal}	159.7
Peso del fondo (kg)	W _{fondo}	159.7
Peso del equipo vacío (kg)	W _{vacío}	1079
Peso del equipo lleno de agua (kg)	W _{agua}	33990
Peso del equipo en operación (kg)	W _{operación}	33914
D-402		
Volumen del cuerpo (m ³)	V _{cuerpo}	0.0263
Volumen del cabezal (m ³)	V _{cabezal}	0.00147
Volumen del fondo (m ³)	V _{fondo}	0.00147
Volumen del equipo vacío (m ³)	V _{vacío}	0.0278
Volumen de agua (m ³)	V _{agua}	3.53
Peso del cuerpo (kg)	W _{cuerpo}	206.5
Peso del cabezal (kg)	W _{cabezal}	23.01
Peso del fondo (kg)	W _{fondo}	23.01
Peso del equipo vacío (kg)	W _{vacío}	229.6
Peso del equipo lleno de agua (kg)	W _{agua}	3757
Peso del equipo en operación (kg)	W _{operación}	3752

A continuación se va a detallar el procedimiento de cálculo de los pesos para las tres partes que forman el separador, así como del equipo al completo. Para la nomenclatura, referirse a las tablas proporcionadas en este apartado.

Cálculo del peso del cuerpo cilíndrico

El volumen del cuerpo se calcula mediante la ecuación 11.13.4.1.

$$V_{cuerpo} = \frac{\pi}{4} \left((D + 2t_{cuerpo})^2 - D^2 \right) \cdot L \quad \text{Ecuación 11.13.4.1}$$

A partir de este dato y de la densidad del material (ρ_{acero}), que para el AISI 304 es de 7850 kg/m³, se puede calcular el peso del cuerpo con la ecuación 11.13.4.2.

$$W_{cuerpo} = V_{cuerpo} \cdot \rho_{acero} \quad \text{Ecuación 11.13.4.2}$$

Cálculo del peso del cabezal y el fondo

Como el cabezal y el fondo en el separador son del mismo tipo (toriesféricos), el cálculo de su peso también va a ser igual. Es por eso que aunque las ecuaciones proporcionadas en este sub-apartado solo hagan referencia al cabezal, son aplicables también al fondo.

Para calcular el volumen de acero del cabezal primero debe calcularse la superficie que ocupa mediante la ecuación 11.13.4.3.

$$S_{cabezal} = \frac{\pi}{2} D_p^2 + D_e(D_e - 2D_p) \quad \text{Ecuación 11.13.4.3}$$

Donde D_e y D_p se calculan con las ecuaciones 11.13.4.4 y 11.13.4.5, respectivamente.

$$D_e = D + 2t_{cabezal} \quad \text{Ecuación 11.13.4.4}$$

$$D_p = 0.2D_e \quad \text{Ecuación 11.13.4.5}$$

El volumen del cabezal se calcula con la ecuación 11.13.4.6.

$$V_{cabezal} = S_{cabezal} \cdot t_{cabezal} \quad \text{Ecuación 11.13.4.6}$$

Y el peso se calcula a partir de la densidad del material con la ecuación 11.13.4.7.

$$W_{cabezal} = V_{cabezal} \cdot \rho_{acero} \quad \text{Ecuación 11.13.4.7}$$

Cálculo del peso del equipo

El volumen del equipo vacío se ha calculado a partir de la ecuación 11.13.4.8.

$$V_{vacío} = V_{cuerpo} + V_{cabezal} + V_{fondo}$$

$$\text{Ecuación 11.13.4.8}$$

La ecuación 11.13.4.9 se ha utilizado para el cálculo del peso del equipo vacío.

$$W_{vacío} = W_{cuerpo} + W_{cabezal} + W_{fondo}$$

$$\text{Ecuación 11.13.4.9}$$

El volumen de agua que puede contener el equipo se ha calculado con la ecuación 11.13.4.10.

$$V_{agua} = \frac{\pi}{4} D^2 (L - h_{cabezal} - h_{fondo}) + V_{cabezal} + V_{fondo}$$

$$\text{Ecuación 11.6.4.10}$$

El peso del equipo lleno de agua se ha calculado a partir de la ecuación 11.13.4.11.

$$W_{agua} = W_{vacío} + V_{agua} \cdot \rho_{agua} \quad \text{Ecuación 11.13.4.11}$$

11.14. Diseño de los intercambiadores de calor (E-301/302 y E-401/415)

El diseño de los intercambiadores de calor del proceso, encargados de llevar las corrientes a la temperatura deseada de entrada a los diferentes equipos que forman parte del proceso, se ha realizado de forma análoga a lo explicado en los apartados 11.3 y 11.4, correspondientes al diseño de los condensadores y los reboilers de las columnas de destilación, respectivamente.

Debido a que el procedimiento de diseño es exactamente el mismo para cada uno de ellos, en este apartado no se va a detallar el cálculo de cada uno de ellos de forma individual, si no que se dará una visión global de la metodología. Para una explicación más detallada, referirse a los citados apartados 11.3 y 11.4.

Para el diseño se ha utilizado el programa Hysys para realizar el balance de materia y energía y el programa Aspen Exchanger Design and Rating para su dimensionamiento.

El primer paso a seguir es conocer las características de las corrientes que debe tratar cada intercambiador. Para ello, se debe acceder a la pestaña *Worksheet* del intercambiador.

Con esta información, se ha utilizado el programa Exchanger Design and Rating de la familia AspenTech pensado explícitamente para el diseño de intercambiadores de calor. Así, los condensadores serán asimilados a intercambiadores de calor de carcasa y tubos.

Las figuras 11.14.1 y 11.3.9 muestran la forma en la que se han introducidos los datos de E-401, a modo de ejemplo.

	Hot Stream (1) Tube Side		Cold Stream (2) Shell Side	
	In	Out	In	Out
Fluid name	From_Reactor/To_Que		t4/To_Turbine	
Mass flow rate (total)	kg/h	14154	31500	
Temperature	C	470	250	158.4
Vapor mass fraction				
Operating pressure (absolute)	bar	2	1.88	31
Pressure at liquid surface in column				
Heat exchanged	kW			
Adjust if over-specified		Heat load		Outlet temperature
Estimated pressure drop	bar	0.12		0.41
Allowable pressure drop	bar	0.2		0.5
Fouling resistance	m ² *K/W	0		0

Figura 11.14.1. Introducción de información de las corrientes de entrada y salida en Exchanger Design and Rating.

Physical property package **B-JAC**

Hot side composition specification Mole flowrate or %

	Components	Composition	Component type
1	Propylene	2.03	Program
2	Ammonia	2.39	Program
3	Oxygen	0	Program
4	Acrylonitrile	6.77	Program
5	Water	37.34	Program
6	Acrolein	0.003	Program
7	Acetonitrile	0.36	Program
8	Carbon dioxide	4.21	Program
9	Carbon monoxide	4.12	Program
10	Hydrogen cyanide	3.98	Program
11	Nitrogen	38.79	Program
12	Ammonium sulfate	0	Program
13			

Figura 11.14.2. Introducción de información de la composición en Exchanger Design and Rating.

En base a la información introducida, el programa utiliza un método iterativo para encontrar el diseño óptimo del intercambiador de carcasa y tubos. La figura 11.14.3 muestra los resultados obtenidos para el intercambiador E-401.

Esta información es la que se encuentra reflejada en las hojas de especificación de los intercambiadores en el apartado de equipos.

Planta de producción de Acrilonitrilo

11. Manual de cálculos

6	Size	476 - 2100	mm	Type	BEM	Hor	Connected in	1 parallel	1 series		
7	Surf/unit(eff.)	37	m ²	Shells/unit	1		Surf/shell (eff.)		37 m ²		
8	PERFORMANCE OF ONE UNIT										
9	Fluid allocation	Shell Side			Tube Side						
10	Fluid name	t4/To_Turbine			From_Reactor/To_Quench						
11	Fluid quantity, Total	31500			14154						
12	Vapor (In/Out)	kg/s			kg/s						
13	Liquid	kg/s			kg/s						
14	Noncondensable	kg/s			kg/s						
15											
16	Temperature (In/Out)	°C			°C						
17	Dew / Bubble point	°C			°C						
18	Density Vapor/Liquid	kg/m ³			kg/m ³						
19	Viscosity	mPa s			mPa s						
20	Molecular wt, Vap										
21	Molecular wt, NC										
22	Specific heat	kJ/(kg K)			kJ/(kg K)						
23	Thermal conductivity	W/(m K)			W/(m K)						
24	Latent heat	kJ/kg			kJ/kg						
25	Pressure (abs)	bar			bar						
26	Velocity	m/s			m/s						
27	Pressure drop, allow./calc.	bar			bar						
28	Fouling resist. (min)	m ² K/W			m ² K/W						
29	Heat exchanged	1319.1	kW	MTD corrected			168.53	°C			
30	Transfer rate, Service	211.8	Dirty	218	Clean	218	W/(m ² K)				
31	CONSTRUCTION OF ONE SHELL						Sketch				
32		Shell Side			Tube Side						
33	Design/vac/test pressure:g	bar			bar						
34	Design temperature	°C			°C						
35	Number passes per shell	1			1						
36	Corrosion allowance	mm			mm						
37	Connections	In	mm		1	254 / -					
38	Size/rating	Out	mm		1	254 / -					
39	Nominal	Intermediate	mm		mm						
40	Tube No. 314	OD	19.05	TksAvg	2.11	mm	Length	2100	mm		
41	Tube type	Plain	#/m			Material	Carbon Steel	Tube pattern	30		
42	Shell	Carbon Steel	ID	476.25	OD	558.8	mm	Shell cover	-		
43	Channel or bonnet	Carbon Steel				Channel cover	-				
44	Tubesheet-stationary	Carbon Steel				Tubesheet-floating	-				
45	Floating head cover	-				Impingement protection	None				
46	Baffle-crossing	Carbon Steel	Type	Single segmental		Cut(%d)	41.34	H	Spacing: c/c	440	mm
47	Baffle-long	-	Seal type			Inlet		763.48		mm	
48	Supports-tube	-	U-bend		Type						
49	Bypass seal	-	Tube-tubesheet joint			Exp.					
50	Expansion joint	-	Type			None					
51	RhoV2-Inlet nozzle	1902	Bundle entrance		21	Bundle exit		22	kg/(m s ²)		
52	Gaskets - Shell side	-	Tube Side			Flat Metal Jacket Fibe					
53	Floating head	-									
54	Code requirements	ASME Code Sec VIII Div 1			TEMA class		R - refinerv service				
55	Weight/Shell	2540	Filled with water		2990.8	Bundle	880.5		kg		
56	Remarks										
57											
58											

Figura 11.14.3. Ejemplo de los resultados proporcionados por Aspen Exchanger Design and Rating.

11.14.1. Diseño mecánico de los intercambiadores

Para el diseño mecánico de los tres condensadores anteriores se va a seguir usando el mismo programa Exchanger Design and Rating, ya que también proporciona esta información.

Planta de producción de Acrilonitrilo

11. Manual de cálculos

Las figuras 11.14.1.1 muestra los resultados proporcionados por el programa para el intercambiador E-401, nuevamente a modo de ejemplo.

Unit Configuration						
Exchanger Type		BEM	Tube number (calcs.)			314
Position		Hor	Tube length actual		mm	2100
Arrangement		1 par 1 ser	Tube passes			1
Baffle type		Single segmental	Tube type			Plain
Baffle number		2	Tube O.D.		mm	19.05
Spacing (center-center)	mm	440	Tube pitch		mm	23.81
Spacing at inlet	mm	763.48	Tube pattern			30
Shell Kettle Front head Rear head						
Outside diameter	mm	558.8				496.25
Inside Diameter	mm	476.25				476.25
Shell Side Tube Side						
Nozzle type		Inlet	Outlet		Inlet	Outlet
Number of nozzles		1	1		1	1
Actual outside diameter	mm	114.3	101.6		273.05	273.05
Inside diameter	mm	92.05	85.45		254.51	254.51
Height under nozzle	mm	22.38	22.38			
Dome inside diameter	mm					
Vapor belt inside diameter	mm					
Vapor belt inside width	mm					
Vapor belt slot area	mm ²					
Impingement protection		No impingement	No impingement	No impingement		
Distance to tubesheet	mm	1895	190			

Figura 11.3.1.1. Ejemplo de los resultado de diseño mecánico proporcionados por Aspen Exchanger Design and Rating.

11.14.2. Peso de los intercambiadores

El peso de los intercambiadores vacíos y en condiciones de operación también lo proporciona el programa Exchanger Design and Rating.

Para ejemplificar los resultados obtenidos, la figura 11.14.2.1 muestra los correspondientes a E-401.

Weights	kg
Shell	1308.7
Front head	161.1
Rear head	189.6
Shell cover	
Bundle	880.5
Total weight - empty	
	2540
Total weight - filled with water	
	2990.8

Figura 11.3.2.1. Ejemplo de resultados de los pesos de los intercambiadores en Aspen Exchanger Design and Rating.

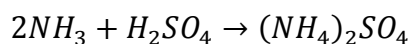
11.15. Diseño de los quench (Q-401/402)

Los dos quench de los que dispone la planta tienen como objetivo neutralizar el amoníaco de la corriente que abandona el reactor, además de reducir su temperatura. Para ello, el corriente gaseoso se hace circular en contracorriente con una solución de ácido sulfúrico, que reaccionará con el amoníaco, obteniendo una solución de sulfato de amonio por la parte inferior del quench.

Debido a que la reacción entre el amoníaco y el ácido sulfúrico se puede considerar espontánea, el diseño del quench se ha realizado igual que un absorbedor de platos, obviando la reacción y solo dando peso a la hidrodinámica del sistema.

Para dimensionar los quench se ha utilizado el programa Hysys, que además proporcionará también el balance de materia y energía. Debido a que el caudal a tratar es muy elevado, se ha decidido trabajar con dos columnas operando en paralelo, para que éstas tuvieran unas dimensiones menores. Debido a que se está trabajando con ácido sulfúrico y esta es una sustancia altamente corrosiva, se ha optado por utilizar una columna de relleno en vez de una de platos, ya que los costes asociados a la primera en estos casos suelen ser inferiores a los de la segunda.

Como ya se ha comentado, la reacción que se da lugar en el quench es instantánea, de manera que con tal de simular el sistema en Hysys, la corriente de entrada que se utilizará contendrá ya el sulfato de amonio, calculando para que esté en proporción estequiométrica con el amoníaco, según la reacción:



De esta forma se ha calculado también la cantidad de ácido sulfúrico que hay que utilizar.

La figura 11.15.1 muestra la configuración del sistema en el programa Hysys. En ella se pueden apreciar las corrientes de entrada de ácido sulfúrico (por arriba) y las del proceso (por abajo), así como la corriente gaseosa obtenida y la corriente líquida por abajo que contiene principalmente sulfato de amonio y agua. Además, también se puede apreciar la disminución de temperatura que se consigue en la columna, ya que el corriente gaseoso entra a 200°C y sale a 75.75°C.

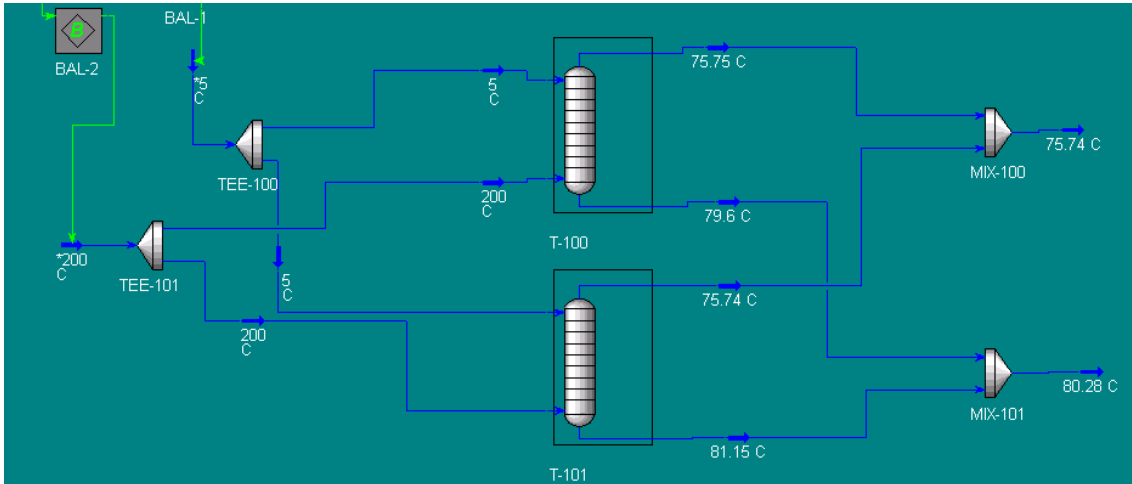


Figura 11.15.1. Configuración del sistema de quench en Hysys.

En vías de diseñar la columna, se han fijado especificaciones de presión en el Quench, tal como se aprecia en la figura 11.15.2.

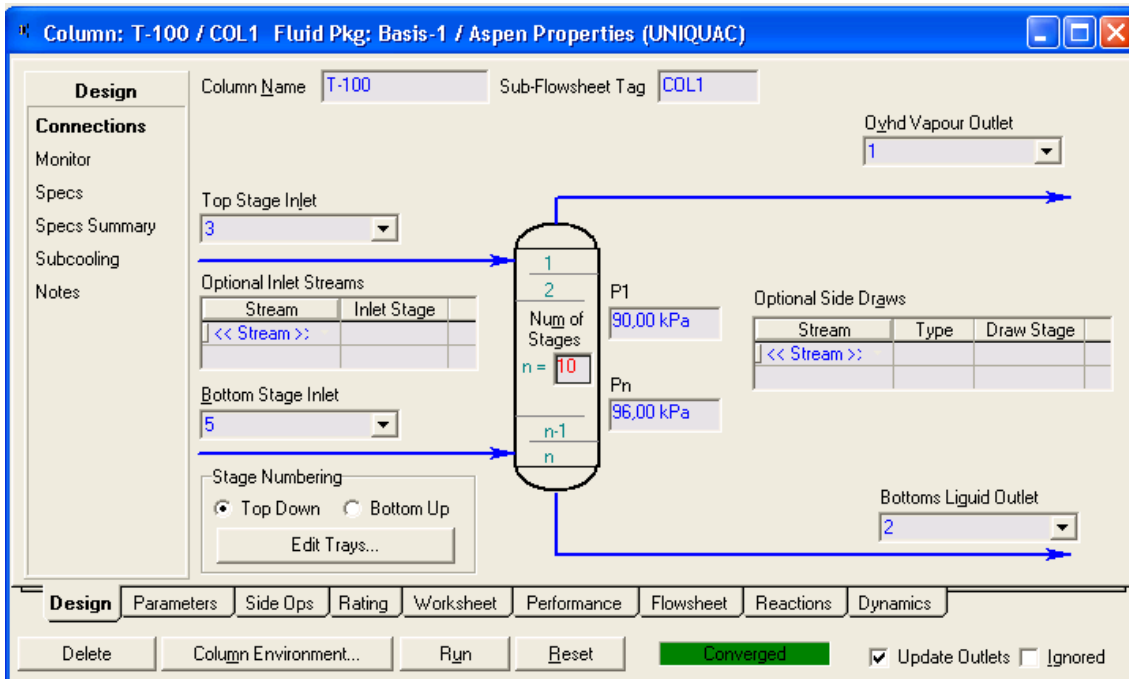


Figura 11.15.2. Especificación de Presión del Quench.

El dimensionamiento del equipo se ha realizado utilizando la herramienta *Tray Sizing* que ofrece Hysys. Las figuras 11.15.3 y 11.15.4 muestran los resultados de cada uno de los dos quench diseñados.

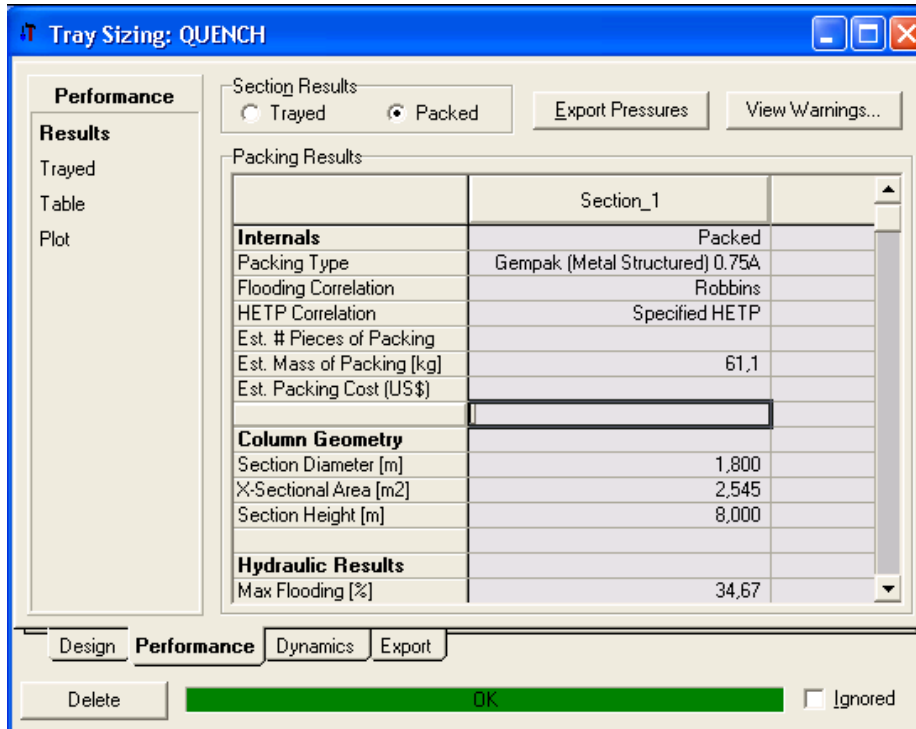


Figura 11.15.3. Resultados del dimensionamiento de los Quench

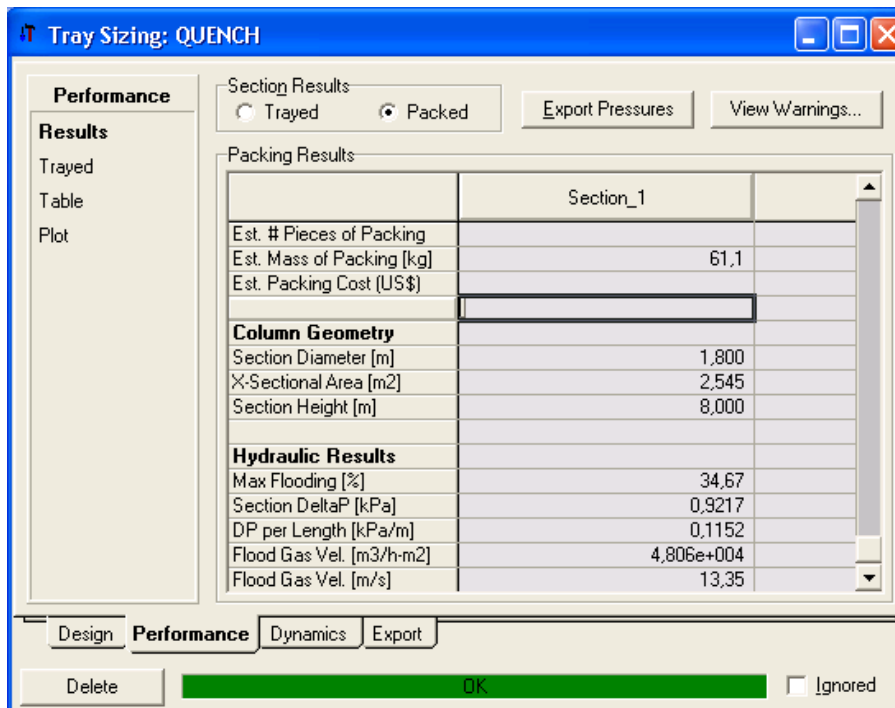


Figura 11.15.4. Resultados del dimensionamiento de los Quench

Planta de producción de Acrilonitrilo

11. Manual de cálculos

Como se ha comentado, el programa Hysys también proporciona el balance de materia y energético de las corrientes que entran y salen del quench. Las figuras 11.15.5 y 11.15.6 muestran las condiciones operacionales y la composición de estas corrientes, respectivamente.

Worksheet	Name	water @COL1	to quench @CC	Quench_vap @	Quench_liq @C
Conditions	Vapour	0,0000	0,9874	1,0000	0,0000
	Temperature [C]	5,000	200,0	75,74	81,07
Properties	Pressure [kPa]	240,0	160,0	90,00	96,00
Compositions	Molar Flow [kgmole/h]	145,7	1048	1138	56,09
	Mass Flow [kg/h]	2625	2,955e+004	2,968e+004	2488
PF Specs	Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	2,630	44,77	44,11	3,292
	Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	-2,870e+005	-8,794e+004	-1,073e+005	-2,130e+005
	Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	-167,3	26,24	-1,647	219,2
	Heat Flow [kJ/h]	-4,182e+007	-9,218e+007	-1,221e+008	-1,195e+007

Figura 11.15.5. Condiciones de operación de las corrientes de entrada y salida al quench.

Worksheet		water	to quench	Quench_vap	Quench_liq
Conditions	Ammonium-Sulfate	0,0000	0,0121	0,0000	0,2257
	Water	1,0000	0,3779	0,4392	0,7522
Properties	Propylene	0,0000	0,0206	0,0189	0,0004
	Ammonia	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Compositions	Oxygen	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	Nitrogen	0,0000	0,3925	0,3616	0,0003
PF Specs	Carbon-Dioxide	0,0000	0,0426	0,0392	0,0002
	Carbon-Monoxide	0,0000	0,0417	0,0384	0,0000
	Sulfuric-Acid	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	Acrylonitrile	0,0000	0,0685	0,0625	0,0135
	Acetonitrile	0,0000	0,0037	0,0033	0,0014
	Acrolein	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	Hydrogen-Cyanide	0,0000	0,0403	0,0368	0,0064
	P-Hydroquinone	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Figura 11.15.6. Composición de las corrientes de entrada y salida al quench.

Cabe recordar que, como ya se ha comentado, a nivel de simulación se ha supuesto que la corriente de entrada ya contiene el sulfato de amonio, pero en realidad esta corriente contiene la correspondiente cantidad de amoníaco según su proporción estequiométrica.

11.15.1. Diseño mecánico de los quench

En este apartado se explicará el cálculo del espesor de pared tanto del cuerpo como de los cabezales los quench Q-401 y Q-402. Como los dos quench son idénticos, los datos aquí proporcionados son válidos para cualquiera de los dos.

Una vez se ha realizado el procedimiento de diseño del quench explicado en el 11.15, ya se tienen los datos necesarios para realizar el diseño mecánico. Éstos se encuentran resumidos en la tabla 11.15.1.1.

Tabla 11.15.1.1. Características y condiciones de operación del quench.

Parámetro	Nomenclatura	Valor
Diámetro interno (m)	D	1.8
Radio interno (m)	R	0.95
Altura (m)	H	8
Presión de operación (bar)	P _{op}	1
Presión de diseño (bar)	P	1.15
Temperatura de operación (°F)	T _{máx}	400

La tabla 11.15.1.2 recoge los demás parámetros necesarios para el cálculo del espesor de pared, así como la nomenclatura que se seguirá en las ecuaciones utilizadas a continuación.

Tabla 11.15.1.2. Parámetros para el cálculo del espesor de pared del quench.

Parámetro	Nomenclatura	Valor
Módulo de tensión del material (bar)	S	1248
Eficacia de la unión	E	0.85
Sobreespesor de corrosión (mm)	C ₁	0.75
Tolerancia de fabricación (mm)	C ₂	0.3
Factor M	M	1.54

Para conocer el espesor de pared del cuerpo del absorbedor se ha aplicado la ecuación 11.15.1.1, que es válida para cuerpos cilíndricos.

$$t_{cuerpo} = \frac{PR}{SE + 0.4P} + C_1 \quad \text{Ecuación 11.15.1.1}$$

Para el cabezal, se debe aplicar la ecuación 11.15.1.2, que es válida para cabezales toriesféricos. Cabe destacar que, como el fondo es del mismo tipo que el cabezal, todas las ecuaciones referentes al segundo son igualmente aplicables al primero.

$$t_{cabezal} = \frac{PDM}{2SE - 0.2P} + C_1 + C_2 \quad \text{Ecuación 11.15.1.2}$$

Otro parámetro importante a conocer es la máxima presión de trabajo permitida. Ésta se calcula según la ecuación 11.15.1.3 para el cuerpo y la ecuación 11.15.1.4 para el cabezal del separador.

Planta de producción de Acrilonitrilo

11. Manual de cálculos

$$P_{m\acute{a}x,cuerpo} = \frac{SEt_{cuerpo}}{R - 0.4t} \quad \text{Ecuación 11.15.1.3}$$

$$P_{m\acute{a}x,cabezal} = \frac{2SEt_{cuerpo}}{DM - 0.4t} \quad \text{Ecuación 11.15.1.4}$$

El módulo de tensión del material es función del tipo de material y de la máxima temperatura de operación y se determina a partir de la tabla 11.15.1.3.

Tabla 11.15.1.3. Módulos de tensión para diferentes materiales en función de la temperatura de operación.

Specification		MAXIMUM ALLOWABLE STRESS VALUES IN TENSION FOR HIGH-ALLOY STEEL (CAUTION: See UW-12 for vessels constructed under part UW) Maximum Allowable Stress, ksi (Multiply by 1000 to Obtain psi), for Metal Temp., °F, Not Exceeding												
Number	Grade	-20 to 100	200	300	400	500	600	650	700	750	800	850	900	950
SA-240	304	18,8	17,8	16,6	16,2	15,9	15,9	15,9	15,9	15,5	15,2	14,9	14,7	14,4
SA-240	304L	15,7	15,7	15,3	14,7	14,4	14	13,7	13,5	13,3	13	---	---	---
SA-240	316	18,8	18,8	18,4	18,1	18,0	17,0	16,7	16,3	16,1	15,9	15,7	15,5	15,4
SA-240	316L	15,7	15,7	15,7	15,5	14,4	13,5	13,2	12,9	12,6	12,4	12,1	---	---

En nuestro caso, se ha elegido un acero SA-240 de grado 304.

La eficacia de unión depende del tipo de soldadura y el radiografiado que se ha llevado a cabo a la hora de fabricar el equipo y se ha determinado a partir de la tabla 11.15.1.4.

Tabla 11.15.1.4. Eficacia de unión en función de la soldadura y el radiografiado.

	Radiografiado total	Radiografiado parcial	Sin radiografiado
Soldadura simple	1	0.85	0.7
Soldadura doble	0.9	0.8	0.65

El sobreespesor de corrosión se calcula en base a la degradación que sufre la chapa metálica a lo largo del tiempo debido a la corrosión según la ecuación 11.15.1.5.

$$C_1 = 0.05 \frac{mm}{a\acute{n}o} \cdot 15 \text{ a\acute{n}os de vida \acute{u}til} = 0.75 \text{ mm}$$

Ecuación 11.15.1.5

La tolerancia de fabricación (C₂) tiene en cuenta las posibles desviaciones entre el valor teórico que debe tener el espesor de pared y el que finalmente tiene a causa de posibles defectos en la fabricación. Se calcula como un 10% del espesor de pared teórico calculado.

El factor M depende del tipo de cabezal que se esté utilizando y se determina a partir de la tabla 11.15.1.5 con el valor obtenido en la ecuación 11.15.1.8, válido para un cabezal tipo Klopfer.

$$L = D \quad \text{Ecuación 11.15.1.6}$$

$$r = 0.1D \text{ Ecuación 11.15.1.7}$$

$$\frac{L}{r} = \frac{D}{0.1D} = 10 \text{ Ecuación 11.15.1.8}$$

Tabla 11.15.1.5. Factor M para diferentes valores de L/r.

VALUES OF FACTOR "M"																	
L/r	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50	2.75	3.00	3.25	3.50	4.00	4.50	5.00	5.50	6.00	6.50
M	1.00	1.03	1.06	1.08	1.10	1.13	1.15	1.17	1.18	1.20	1.22	1.25	1.28	1.31	1.34	1.36	1.39
L/r	7.00	7.50	8.00	8.50	9.00	9.50	10.0	10.5	11.0	11.5	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	16.5	*
M	1.41	1.44	1.46	1.48	1.50	1.52	1.54	1.56	1.58	1.60	1.62	1.65	1.69	1.72	1.75	1.77	

* THE MAXIMUM ALLOWED RATIO : L = D + 2t (see note 2 on facing page)

De esta forma se han obtenido los resultados resumidos en la tabla 11.15.1.6.

Tabla 11.15.1.6. Grosos de pared y presiones máximas para el absorbedor.

Parámetro	Nomenclatura	Valor
Grosor de pared del cuerpo (mm)	t _{cuerpo}	2
Grosor de pared del cabezal (mm)	t _{cabezal}	3
Grosor de pared del fondo (mm)	t _{fondo}	3
Presión máxima en el cuerpo (bar)	P _{máx,cuerpo}	2.20
Presión máxima en el cabezal (bar)	P _{máx,cabezal}	2.14
Presión máxima en el fondo (bar)	P _{máx,fondo}	2.14

11.15.2. Peso de los quench

Para conocer el peso del quench cuando éste se encuentra vacío, cuando está lleno de agua para pruebas hidráulicas y en operación, se debe tener en cuenta el peso del cuerpo cilíndrico del quench, el cabezal y el fondo.

La tabla 11.12.2.1 muestra los resultados obtenidos, así como la nomenclatura que se seguirá en esta apartado.

Tabla 11.12.2.1. Volumen y peso del absorbedor.

Parámetro	Nomenclatura	Valor
Volumen del cuerpo (m ³)	V _{cuerpo}	0.0906
Volumen del cabezal (m ³)	V _{cabezal}	0.0108
Volumen del fondo (m ³)	V _{fondo}	0.0108
Volumen del equipo vacío (m ³)	V _{vacío}	0.101
Volumen de agua (m ³)	V _{agua}	19.41
Peso del cuerpo (kg)	W _{cuerpo}	711.0
Peso del cabezal (kg)	W _{cabezal}	42.43
Peso del fondo (kg)	W _{fondo}	42.43
Peso del relleno (kg)	W _{relleno}	61.1
Peso del equipo vacío (kg)	W _{vacío}	795.9

Peso del equipo lleno de agua (kg)	W_{agua}	20269
Peso del equipo en operación (kg)	$W_{\text{operación}}$	19411

A continuación se va a detallar el procedimiento de cálculo de los pesos para las tres partes que forman el absorbedor, así como del equipo al completo. Para la nomenclatura, referirse a las tablas proporcionadas en este apartado.

Cálculo del peso del cuerpo cilíndrico

El volumen del cuerpo se calcula mediante la ecuación 11.12.2.1.

$$V_{\text{cuerpo}} = \frac{\pi}{4} \left((D + 2t_{\text{cuerpo}})^2 - D^2 \right) \cdot H \quad \text{Ecuación 11.12.2.1}$$

A partir de este dato y de la densidad del material (ρ_{acero}), que para el AISI 316 es de 7850 kg/m^3 , se puede calcular el peso del cuerpo con la ecuación 11.12.2.2.

$$W_{\text{cuerpo}} = V_{\text{cuerpo}} \cdot \rho_{\text{acero}} \quad \text{Ecuación 11.12.2.2}$$

Cálculo del peso del cabezal y el fondo

Como el cabezal y el fondo en el absorbedor son del mismo tipo (toriesféricos), el cálculo de su peso también va a ser igual. Es por eso que aunque las ecuaciones proporcionadas en este sub-apartado solo hagan referencia al cabezal, son aplicables también al fondo.

Para calcular el volumen de acero del cabezal primero debe calcularse la superficie que ocupa mediante la ecuación 11.12.2.3.

$$S_{\text{cabezal}} = \frac{\pi}{2} D_p^2 + D_e (D_e - 2D_p) \quad \text{Ecuación 11.12.2.3}$$

Donde D_e y D_p se calculan con las ecuaciones 11.12.2.4 y 11.12.2.5, respectivamente.

$$D_e = D + 2t_{\text{cabezal}} \quad \text{Ecuación 11.12.2.4}$$

$$D_p = 0.2D_e \quad \text{Ecuación 11.12.2.5}$$

El volumen del cabezal se calcula con la ecuación 11.12.2.6.

$$V_{\text{cabezal}} = S_{\text{cabezal}} \cdot t_{\text{cabezal}} \quad \text{Ecuación 11.12.2.6}$$

Y el peso se calcula a partir de la densidad del material con la ecuación 11.12.2.7.

$$W_{\text{cabezal}} = V_{\text{cabezal}} \cdot \rho_{\text{acero}} \quad \text{Ecuación 11.12.2.7}$$

Cálculo del peso del equipo

El volumen del equipo vacío se ha calculado a partir de la ecuación 11.12.2.8.

$$V_{vacío} = V_{cuerpo} + V_{cabezal} + V_{fondo} + V_{relleno}$$

Ecuación 11.12.2.8

La ecuación 11.12.2.9 se ha utilizado para el cálculo del peso del equipo vacío.

$$W_{vacío} = W_{cuerpo} + W_{cabezal} + W_{fondo} + W_{relleno}$$

Ecuación 11.12.2.9

El volumen de agua que puede contener el equipo se ha calculado con la ecuación 11.12.2.10.

$$V_{agua} = \frac{\pi}{4} D^2 (H - h_{cabezal} - h_{fondo}) + V_{cabezal} + V_{fondo}$$

Ecuación 11.12.2.10

El peso del equipo lleno de agua se ha calculado a partir de la ecuación 11.12.2.11.

$$W_{agua} = W_{vacío} + V_{agua} \cdot \rho_{agua} \quad \text{Ecuación 11.12.2.11}$$

11.16. Diseño de los tanques pulmón (TP-401/412)

Los tanques pulmón sirven en nuestro proceso para abastecer de agua a los intercambiadores de calor de proceso, ya que éstos no utilizan una entrada de agua de servicio directa, si no que en la mayoría de casos es recirculada de otras unidades del proceso, por lo que se hace necesaria la presencia de tanques pulmón para evitar fluctuaciones de caudal y poder utilizar un sistema de control individualizado para cada intercambiador.

Para el diseño de los tanques pulmón es necesario conocer el caudal volumétrico que tendrán que tratar. Debido al elevado número de tanques diseñados, en este apartado no se facilitarán estos datos ni los resultados obtenidos, sino solamente el procedimiento de cálculo que se ha seguido, idéntico para todos ellos. Para más información sobre los valores numéricos utilizados, referirse a las correspondientes hojas de especificación del apartado de equipos.

El volumen del tanque se ha calculado según la ecuación 11.16.1, considerando que el líquido va a ocupar un 85% del volumen.

$$V = \frac{Q \cdot \tau}{N_{\text{tanques}} \cdot 0.85} \quad \text{Ecuación 11.16.1}$$

Donde Q es el caudal volumétrico en m³/h, τ es el tiempo de residencia (0.1 horas en todos los casos) i N_{tanques} es el número de tanques diseñados, que se ha decidido en función del volumen total requerido, utilizando más de un tanque en paralelo cuando este superava los 30 m³.

Utilizando una relación Altura/Diámetro de 1.5 se ha calculado la altura y el diámetro de los tanques con las ecuaciones 11.16.2 y 11.16.3, respectivamente.

$$D = \sqrt[3]{\frac{4V}{1.5\pi}} \quad \text{Ecuación 11.16.2}$$

$$H = 1.5D \quad \text{Ecuación 11.16.3}$$

11.15.1. Diseño mecánico de los tanques

En este apartado se explicará el calculo del espesor de pared tanto del cuerpo como de los cabezales de los tanques pulmón.

Una vez se ha realizado el procedimiento de diseño de los tanques explicado en el 11.15, ya se tienen los datos necesarios para realizar el diseño mecánico. Como ya se ha comentado en el apartado, en este apartado no se van a detallar los valores utilizados para cada tanque. Para la nomenclatura utilizada, referirse a otros apartados de diseño mecánico,

Para conocer el espesor de pared del cuerpo del sparador se ha aplicado la ecuación 11.15.1.1, que es válida para cuerpos cilíndricos.

$$t_{cuerpo} = \frac{PR}{SE + 0.4P} + C_1 \quad \text{Ecuación 11.15.1.1}$$

Para el cabezal, se debe aplicar la ecuación 11.15.1.2, que es válida para cabezales toriesféricos.

$$t_{cabezal} = \frac{PDM}{2SE - 0.2P} + C_1 + C_2 \quad \text{Ecuación 11.15.1.2}$$

Para el fondo inferior, al ser plano, se debe conocer la altura de líquido que éste deberá soportar y calcular el espesor en función del número adimensional de Sherwood, representado en la ecuación 11.15.1.3.

$$Sh = \frac{0.0005 \cdot D \cdot (h_{líquido} - 30.48) \cdot G}{t_{cuerpo}} \quad \text{Ecuación 11.15.1.3}$$

Donde la altura del líquido se ha calculada a partir de la ecuación 11.15.1.4.

$$h_{líquido} = \frac{4 \cdot 0.85 \cdot V}{\pi \cdot D^2} \quad \text{Ecuación 11.15.1.4}$$

La elección del espesor se ha hecho en base a la tabla 11.15.1.3.

Tabla 11.15.1.3. Espesores del fondo plano en función del número de Sherwood.

Espesor Mínimo (mm) del Primer Anillo del Cuerpo	Esfuerzo Calculado para Prueba Hidrostática en el Primer Anillo del Cuerpo (Kg/cm ²)			
	<1989	<2109	<2320	<2530
t < 19.05	6.35	6.35	7.14	8.73
09.05 < 25.4	6.35	7.14	9.52	11.11
25.4 < 31.75	6.35	8.73	11.91	14.28
31.75 < 38.10	7.93	11.11	14.28	17.46
38.10 < 44.45	8.73	12.7	15.87	19.05

Otro parámetro importante a conocer es la máxima presión de trabajo permitida. Ésta se calcula según la ecuación 11.15.1.5 para el cuerpo y la ecuación 11.15.1.6 para el cabezal de los tanques.

$$P_{m\acute{a}x,cuerpo} = \frac{SEt_{cuerpo}}{R - 0.4t} \quad \text{Ecuación 11.15.1.5}$$

$$P_{m\acute{a}x,cabezal} = \frac{2SEt_{cuerpo}}{DM - 0.4t} \quad \text{Ecuación 11.15.1.6}$$

El módulo de tensión del material es función del tipo de material y de la máxima temperatura de operación y se determina a partir de la tabla 11.15.1.4.

Planta de producción de Acrilonitrilo

11. Manual de cálculos

Tabla 11.15.1.4. Módulos de tensión para diferentes materiales en función de la temperatura de operación.

MAXIMUM ALLOWABLE STRESS VALUES IN TENSION FOR HIGH-ALLOY STEEL
(CAUTION: See UW-12 for vessels constructed under part UW)
Maximum Allowable Stress, ksi (Multiply by 1000 to Obtain psi),
for Metal Temp., °F, Not Exceeding

Specification		Maximum Allowable Stress, ksi (Multiply by 1000 to Obtain psi), for Metal Temp., °F, Not Exceeding												
Number	Grade	-20 to 100	200	300	400	500	600	650	700	750	800	850	900	950
SA-240	304	18,8	17,8	16,6	16,2	15,9	15,9	15,9	15,9	15,5	15,2	14,9	14,7	14,4
SA-240	304L	15,7	15,7	15,3	14,7	14,4	14	13,7	13,5	13,3	13	---	---	---
SA-240	316	18,8	18,8	18,4	18,1	18,0	17,0	16,7	16,3	16,1	15,9	15,7	15,5	15,4
SA-240	316L	15,7	15,7	15,7	15,5	14,4	13,5	13,2	12,9	12,6	12,4	12,1	---	---

La eficacia de unión depende del tipo de soldadura y el radiografiado que se ha llevado a cabo a la hora de fabricar el equipo y se ha determinado a partir de la tabla 11.15.1.5.

Tabla 11.15.1.5. Eficacia de unión en función de la soldadura y el radiografiado.

	Radiografiado total	Radiografiado parcial	Sin radiografiado
Soldadura simple	1	0.85	0.7
Soldadura doble	0.9	0.8	0.65

El sobreespesor de corrosión se calcula en base a la degradación que sufre la chapa metálica a lo largo del tiempo debido a la corrosión según la ecuación 11.15.1.7.

$$C_1 = 0.05 \frac{mm}{año} \cdot 15 \text{ años de vida útil} = 0.75 \text{ mm}$$

Ecuación 11.15.1.7

La tolerancia de fabricación (C₂) tiene en cuenta las posibles desviaciones entre el valor teórico que debe tener el espesor de pared y el que finalmente tiene a causa de posibles defectos en la fabricación. Se calcula como un 10% del espesor de pared teórico calculado.

El factor M depende del tipo de cabezal que se esté utilizando y se determina a partir de la tabla 11.15.1.6 con el valor obtenido en la ecuación 11.15.1.10, válido para un cabezal tipo Klopper.

$$L = D \quad \text{Ecuación 11.15.1.8}$$

$$r = 0.1D \quad \text{Ecuación 11.15.1.9}$$

$$\frac{L}{r} = \frac{D}{0.1D} = 10 \quad \text{Ecuación 11.15.1.10}$$

Tabla 11.15.1.6. Factor M para diferentes valores de L/r.

VALUES OF FACTOR "M"																	
L/r	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50	2.75	3.00	3.25	3.50	4.00	4.50	5.00	5.50	6.00	6.50
M	1.00	1.03	1.06	1.08	1.10	1.13	1.15	1.17	1.18	1.20	1.22	1.25	1.28	1.31	1.34	1.36	1.39
L/r	7.00	7.50	8.00	8.50	9.00	9.50	10.0	10.5	11.0	11.5	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	16.5	*
M	1.41	1.44	1.46	1.48	1.50	1.52	1.54	1.56	1.58	1.60	1.62	1.65	1.69	1.72	1.75	1.77	
* THE MAXIMUM ALLOWED RATIO : L = D + 2t (see note 2 on facing page)																	

11.15.2. Peso de los tanques

Para conocer el peso de los tanques cuando estos se encuentran vacíos, cuando están llenos de agua para pruebas hidráulicas y en operación, se debe tener en cuenta el peso del cuerpo cilíndrico del tanque, el cabezal y el fondo.

A continuación se va a detallar el procedimiento de cálculo de los pesos para las dos partes que forman el tanque, así como del equipo al completo. Para la nomenclatura, referirse a las tablas proporcionadas en este apartado.

Cálculo del peso del cuerpo cilíndrico

El volumen del cuerpo se calcula mediante la ecuación 11.15.2.1.

$$V_{cuerpo} = \frac{\pi}{4} \left((D + 2t_{cuerpo})^2 - D^2 \right) \cdot H \quad \text{Ecuación 11.15.2.1}$$

A partir de este dato y de la densidad del material (ρ_{acero}), que para el acero es de 7850 kg/m³, se puede calcular el peso del cuerpo con la ecuación 11.15.2.2.

$$W_{cuerpo} = V_{cuerpo} \cdot \rho_{acero} \quad \text{Ecuación 11.15.2.2}$$

Cálculo del peso del cabezal

Para calcular el volumen de acero del cabezal primero debe calcularse la superficie que ocupa mediante la ecuación 11.15.2.3.

$$S_{cabezal} = \frac{\pi}{2} D_p^2 + D_e (D_e - 2D_p) \quad \text{Ecuación 11.15.2.3}$$

Donde D_e y D_p se calculan con las ecuaciones 11.15.2.4 y 11.15.2.5, respectivamente.

$$D_e = D + 2t_{cabezal} \quad \text{Ecuación 11.15.2.4}$$

$$D_p = 0.2D_e \quad \text{Ecuación 11.15.2.5}$$

El volumen del cabezal se calcula con la ecuación 11.15.2.6.

$$V_{cabezal} = S_{cabezal} \cdot t_{cabezal} \quad \text{Ecuación 11.15.2.6}$$

11. Manual de cálculos

Y el peso se calcula a partir de la densidad del material con la ecuación 11.15.2.7.

$$W_{cabezal} = V_{cabezal} \cdot \rho_{acero} \quad \text{Ecuación 11.15.2.7}$$

Cálculo del peso del equipo

El volumen del equipo vacío se ha calculado a partir de la ecuación 11.15.2.8.

$$V_{vacío} = V_{cuerpo} + V_{cabezal}$$

Ecuación 11.15.2.8

La ecuación 11.15.2.9 se ha utilizado para el cálculo del peso del equipo vacío.

$$W_{vacío} = W_{cuerpo} + W_{cabezal}$$

Ecuación 11.15.2.9

El volumen de agua que puede contener el equipo se ha calculado con la ecuación 11.15.2.10.

$$V_{agua} = \frac{\pi}{4} D^2 (H - h_{cabezal} - h_{fondo}) + V_{cabezal}$$

Ecuación 11.15.2.10

El peso del equipo lleno de agua se ha calculado a partir de la ecuación 11.15.2.11.

$$W_{agua} = W_{vacío} + V_{agua} \cdot \rho_{agua} \quad \text{Ecuación 11.15.2.11}$$

11.17. Diseño de los tanques de condensados (TC-401/403)

Los tanques de condensados se encuentran en cada una de las columnas de destilación (TD-401/403) y tienen como función la de recoger el vapor condensado que sale de los condensadores (CD-401/403) para que el flujo que retorna a la columna (reflujo) y el que la abandona (producto destilado) no sufra variaciones de caudal importantes. Por lo tanto, se puede decir que actúan de tanques pulmón para las columnas.

Para el diseño de los tanques pulmón es necesario conocer el caudal volumétrico que tendrán que tratar. Estos datos se recogen en la tabla 11.17.1.

Tabla 11.17.1 Caudales volumétricos a tratar en los tanques de condensados.

	Caudal (m ³ /h)
TC-401	234.69
TC-402	69.2
TC-403	18.2

El volumen del tanque se ha calculado según la ecuación 11.17.1, considerando que el líquido va a ocupar un 85% del volumen.

$$V = \frac{Q \cdot \tau}{0.85} \quad \text{Ecuación 11.17.1}$$

Donde Q es el caudal volumétrico en m³/h, τ es el tiempo de residencia (5 minutos en todos los casos).

Utilizando una relación Altura/Diámetro de 1.5 se ha calculado la altura y el diámetro de los tanques con las ecuaciones 11.17.2 y 11.17.3, respectivamente.

$$D = \sqrt[3]{\frac{4V}{1.5\pi}} \quad \text{Ecuación 11.17.2}$$

$$H = 1.5D \quad \text{Ecuación 11.17.3}$$

11.17.1. Diseño mecánico de los tanques

En este apartado se explicará el cálculo del espesor de pared tanto del cuerpo como de los cabezales de los tanques de condensados.

Una vez se ha realizado el procedimiento de diseño de los tanques explicado en el 11.17, ya se tienen los datos necesarios para realizar el diseño mecánico.

Tabla 11.17.1.1. Características y condiciones de operación de los tanques.

TC-401		
Diámetro interno (m)	D	2.69
Radio interno (m)	R	1.35
Altura (m)	H	4.05
Presión de operación (bar)	P _{op}	1

Presión de diseño (bar)	P	1.15
Temperatura de operación (°F)	T _{máx}	180
TC-402		
Diámetro interno (m)	D	1.79
Radio interno (m)	R	0.896
Altura (m)	H	2.69
Presión de operación (bar)	P _{op}	1
Presión de diseño (bar)	P	1.15
Temperatura de operación (°F)	T _{máx}	95
TC-403		
Diámetro interno (m)	D	1.15
Radio interno (m)	R	0.574
Altura (m)	H	1.72
Presión de operación (bar)	P _{op}	0.3
Presión de diseño (bar)	P	0.345
Temperatura de operación (°F)	T _{máx}	135

La tabla 11.17.1.2 recoge los demás parámetros necesarios para el cálculo del espesor de pared, así como la nomenclatura que se seguirá en las ecuaciones utilizadas a continuación.

Tabla 11.17.1.2. Parámetros para el cálculo del espesor de pared de los tanques.

TC-401		
Módulo de tensión del material (bar)	S	1297
Eficacia de la unión	E	0.85
Sobreespesor de corrosión (mm)	C ₁	0.75
Tolerancia de fabricación (mm)	C ₂	0.4
Factor M	M	1.54
TC-402		
Módulo de tensión del material (bar)	S	1297
Eficacia de la unión	E	0.85
Sobreespesor de corrosión (mm)	C ₁	0.75
Tolerancia de fabricación (mm)	C ₂	0.3
Factor M	M	1.54
TC-403		
Módulo de tensión del material (bar)	S	1297
Eficacia de la unión	E	0.85
Sobreespesor de corrosión (mm)	C ₁	0.75
Tolerancia de fabricación (mm)	C ₂	0.5
Factor M	M	1.54

El cálculo del espesor de pared de los tanques TC-401 y TC-402 se va a realizar a presión interna, ya que la máxima presión que tendrán que soportar es la que hay en el interior del recipiente. Sin embargo, el tanque TC-403 se encuentra al vacío, ya que forma parte de la columna de destilación TD-403 que trabaja en estas condiciones. De modo que el diseño mecánico de esta último tanque se hará a presión externa, ya que la presión que tendrá que soportar el tanque será la que haya en el exterior, es decir, la atmosférica.

11. Manual de cálculos

A continuación se presenta la metodología de cálculo para el diseño mecánico a presión interna y externa.

Procedimiento para el diseño mecánico a presión interna (TC-401 y TC-402)

Para conocer el espesor de pared del cuerpo de los tanques se ha aplicado la ecuación 11.17.1.1, que es válida para cuerpos cilíndricos.

$$t_{cuerpo} = \frac{PR}{SE + 0.4P} + C_1 \quad \text{Ecuación 11.17.1.1}$$

Para el cabezal, se debe aplicar la ecuación 11.17.1.2, que es válida para cabezales toriesféricos. Cabe destacar que, como el fondo es del mismo tipo que el cabezal, todas las ecuaciones referentes al segundo són igualmente aplicables al primero.

$$t_{cabezal} = \frac{PDM}{2SE - 0.2P} + C_1 + C_2 \quad \text{Ecuación 11.17.1.2}$$

Otro parámetro importante a conocer es la máxima presión de trabajo permitida. Esta se calcula según la ecuación 11.17.1.3 para el cuerpo y la ecuación 11.17.1.4 para el cabezal de los tanques.

$$P_{m\acute{a}x,cuerpo} = \frac{SEt_{cuerpo}}{R - 0.4t} \quad \text{Ecuación 11.17.1.3}$$

$$P_{m\acute{a}x,cabezal} = \frac{2SEt_{cuerpo}}{DM - 0.4t} \quad \text{Ecuación 11.17.1.4}$$

El módulo de tensión del material es función del tipo de materia y de la máxima temperatura de operación y se determina a partir de la tabla 11.17.1.3.

Tabla 11.17.1.3. Módulos de tensión para diferentes materiales en función de la temperatura de operación.

Specification		MAXIMUM ALLOWABLE STRESS VALUES IN TENSION FOR HIGH-ALLOY STEEL (CAUTION: See UW-12 for vessels constructed under part UW) Maximum Allowable Stress, ksi (Multiply by 1000 to Obtain psi), for Metal Temp., °F, Not Exceeding												
Number	Grade	-20 to 100	200	300	400	500	600	650	700	750	800	850	900	950
SA-240	304	18,8	17,8	16,6	16,2	15,9	15,9	15,9	15,9	15,5	15,2	14,9	14,7	14,4
SA-240	304L	15,7	15,7	15,3	14,7	14,4	14	13,7	13,5	13,3	13	---	---	---
SA-240	316	18,8	18,8	18,4	18,1	18,0	17,0	16,7	16,3	16,1	15,9	15,7	15,5	15,4
SA-240	316L	15,7	15,7	15,7	15,5	14,4	13,5	13,2	12,9	12,6	12,4	12,1	---	---

En nuestro caso, se ha elegido un acero SA-240 de grado 304 para el tanque TC-402 y de grado 316 para los tanques TC-401 y TC-403.

La eficacia de unión depende del tipo de soldadura y el radiografiado que se ha llevado a cabo a la hora de fabricar el equipo y se ha determinado a partir de la tabla 11.17.1.4.

Tabla 11.17.1.4. Eficacia de unión en función de la soldadura y el radiografiado.

	Radiografiado total	Radiografiado parcial	Sin radiografiado
Soldadura simple	1	0.85	0.7
Soldadura doble	0.9	0.8	0.65

El sobreespesor de corrosión se calcula en base a la degradación que sufre la chapa metálica a lo largo del tiempo debido a la corrosión según la ecuación 11.17.1.5.

$$C_1 = 0.05 \frac{mm}{año} \cdot 15 \text{ años de vida útil} = 0.75 \text{ mm}$$

Ecuación 11.17.1.5

La tolerancia de fabricación (C_2) tiene en cuenta las posibles desviaciones entre el valor teórico que debe tener el espesor de pared y el que finalmente tiene a causa de posibles defectos en la fabricación. Se calcula como un 10% del espesor de pared teórico calculado.

El factor M depende del tipo de cabezal que se esté utilizando y se determina a partir de la tabla 11.17.1.5 con el valor obtenido en la ecuación 11.17.1.8, válido para un cabezal tipo Klopper.

$$L = D \quad \text{Ecuación 11.17.1.6}$$

$$r = 0.1D \quad \text{Ecuación 11.17.1.7}$$

$$\frac{L}{r} = \frac{D}{0.1D} = 10 \quad \text{Ecuación 11.17.1.8}$$

Tabla 11.17.1.5. Factor M para diferentes valores de L/r.

VALUES OF FACTOR "M"																	
L/r	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50	2.75	3.00	3.25	3.50	4.00	4.50	5.00	5.50	6.00	6.50
M	1.00	1.03	1.06	1.08	1.10	1.13	1.15	1.17	1.18	1.20	1.22	1.25	1.28	1.31	1.34	1.36	1.39
L/r	7.00	7.50	8.00	8.50	9.00	9.50	10.0	10.5	11.0	11.5	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	16.3	*
M	1.41	1.44	1.46	1.48	1.50	1.52	1.54	1.56	1.58	1.60	1.62	1.65	1.69	1.72	1.75	1.77	
* THE MAXIMUM ALLOWED RATIO : L = D + 2t (see note 2 on facing page)																	

De esta forma se han obtenido los resultados resumidos en la tabla 11.17.1.6 para los dos tanques.

Tabla 11.17.1.6. Grosos de pared y presiones máximas para las torres de destilación.

TC-401		
Grosor de pared del cuerpo (mm)	t_{cuerpo}	3
Grosor de pared del cabezal (mm)	t_{cabezal}	4
Presión máxima en el cuerpo (bar)	$P_{\text{máx.cuerpo}}$	2.46

Presión máxima en el cabezal (bar)	$P_{m\acute{a}x,cabezal}$	2.13
Presión máxima en el fondo (bar)	$P_{m\acute{a}x,fondo}$	2.13
TC-402		
Grosor de pared del cuerpo (mm)	t_{cuerpo}	2
Grosor de pared del cabezal (mm)	$t_{cabezal}$	3
Presión máxima en el cuerpo (bar)	$P_{m\acute{a}x,cuerpo}$	2.46
Presión máxima en el cabezal (bar)	$P_{m\acute{a}x,cabezal}$	2.39
Presión máxima en el fondo (bar)	$P_{m\acute{a}x,fondo}$	2.39

Procedimiento para el diseño mecánico a presión externa (TC-403)

El cálculo del espesor de pared, tanto para el cilindro como para el cabezal y las tapas del tanque, se va a realizar mediante un procedimiento iterativo, suponiendo un espesor y comprobando su validez mediante unos criterios determinados.

Para el cuerpo del tanque, dicho procedimiento es el siguiente:

1. Suponer un valor de t_{cuerpo} . Calcular L/D_o i D_o/t (ver figura 11.17.1.3 para nomenclatura).
2. Determinar el factor A mediante la figura 11.17.1.4.
3. Determinar el factor B mediante la figura 11.17.1.5.
4. Calcular la presión máxima permitida mediante la ecuación 11.17.1.9. Si el valor de A cae en la zona izquierda de la figura 11.17.1.5, se calculará mediante la ecuación 11.17.1.10.

$$P_{a_{cuerpo}} = \frac{4B}{3 \left(\frac{D_o}{t_{cuerpo}} \right)} \text{ Ecuación 11.17.1.9}$$

$$P_{a_{cuerpo}} = \frac{2AE}{3 \left(\frac{D_o}{t_{cuerpo}} \right)} \text{ Ecuación 11.17.1.10}$$

5. Si la presión calculada es menor que la presión externa de diseño, que en nuestro caso será la atmosférica (1.01 bar), se debe volver al punto 1 suponiendo un t_{cuerpo} mayor.

Para el cabezal y las tapas, que serán toriesféricos, el procedimiento es el descrito a continuación:

7. Calcular $t_{cabezal,1}$ mediante el procedimiento descrito para presión interna utilizando una presión de diseño de 1.67 veces la presión externa y $E=1$.
8. Suponer un valor de $t_{cabezal,2}$ y calcular el factor A mediante la ecuación 11.17.1.11.

$$A = \frac{0.125}{\frac{R_{cabezal}}{t_{cabezal,2}}} \text{ Ecuación 11.2.4.11}$$

9. Determinar el factor B mediante la figura 11.17.1.5.
10. Calcular la máxima presión permitida mediante la ecuación 11.17.1.12. Si el valor de A está en la zona izquierda de la figura 11.17.1.5, se deberá calcular con la ecuación 11.17.1.13. El módulo de elasticidad E se puede determinar con la tabla 11.17.1.7.

$$Pa_{cabezal} = \frac{B}{\frac{R_{cabezal}}{t_{cabezal,2}}} \quad \text{Ecuación 11.2.4.12}$$

$$Pa_{cabezal} = \frac{0.0625E}{\left(\frac{R_{cabezal}}{t_{cabezal,s}}\right)^2} \quad \text{Ecuación 11.2.4.13}$$

11. Si la presión calculada es menor, se debe volver al punto 2, suponiendo un valor de $t_{cabezal,2}$ mayor. Si no, pasar al punto 6.
12. Comparar los valores de $t_{cabezal,1}$ y $t_{cabezal,2}$ y elegir el más elevado como resultado final.

Las figuras 11.17.1.4-11.17.1.6 y la tabla 11.17.1.7 mencionadas anteriormente se presentan seguidas a continuación.

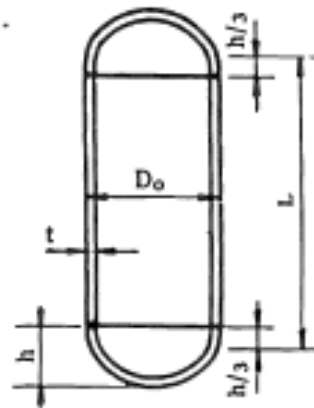


Figura 11.2.3. Características del cuerpo para el diseño mecánico a presión externa.

Planta de producción de Acrilonitrilo

11. Manual de cálculos

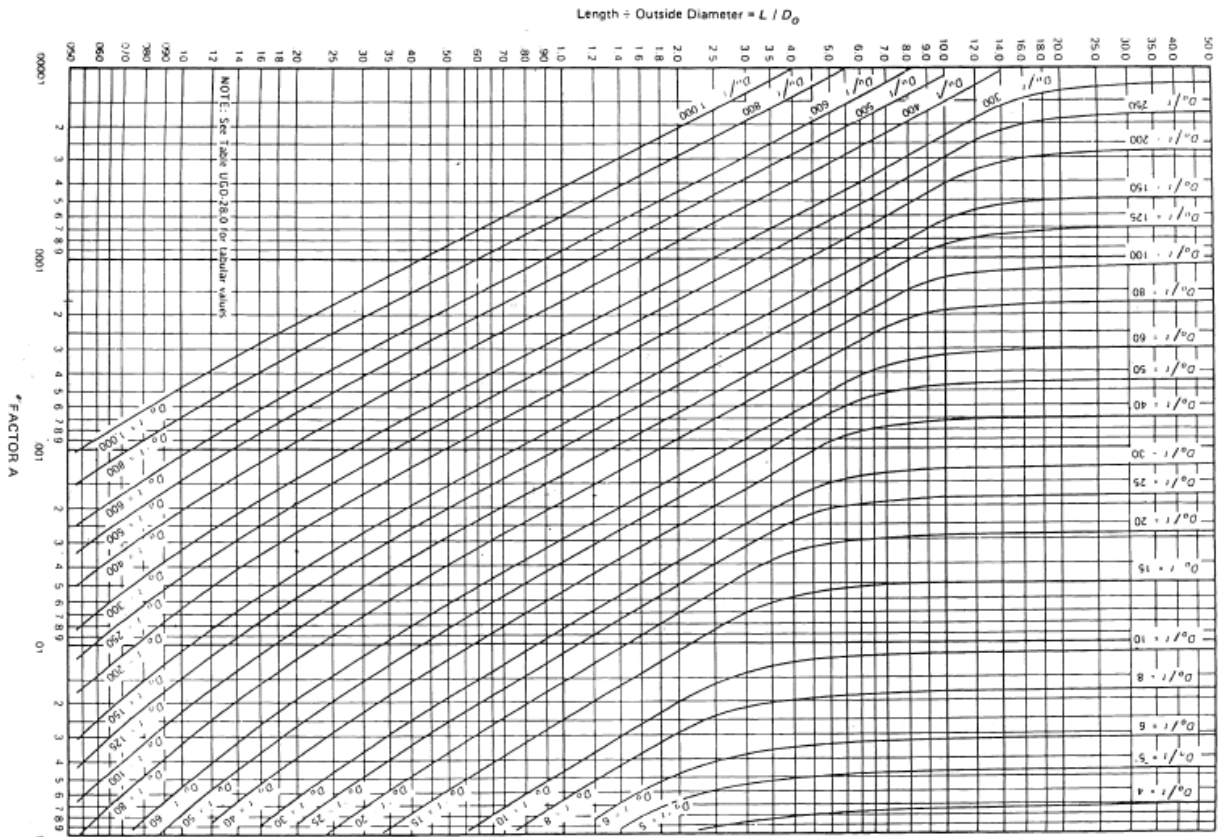


Figura 11.17.1. Diagrama para la determinación del factor A en el diseño mecánico a presión externa.

APPENDIX 5 — MANDATORY

Figs. 5-UHA-28.3-5-UHA-28.3

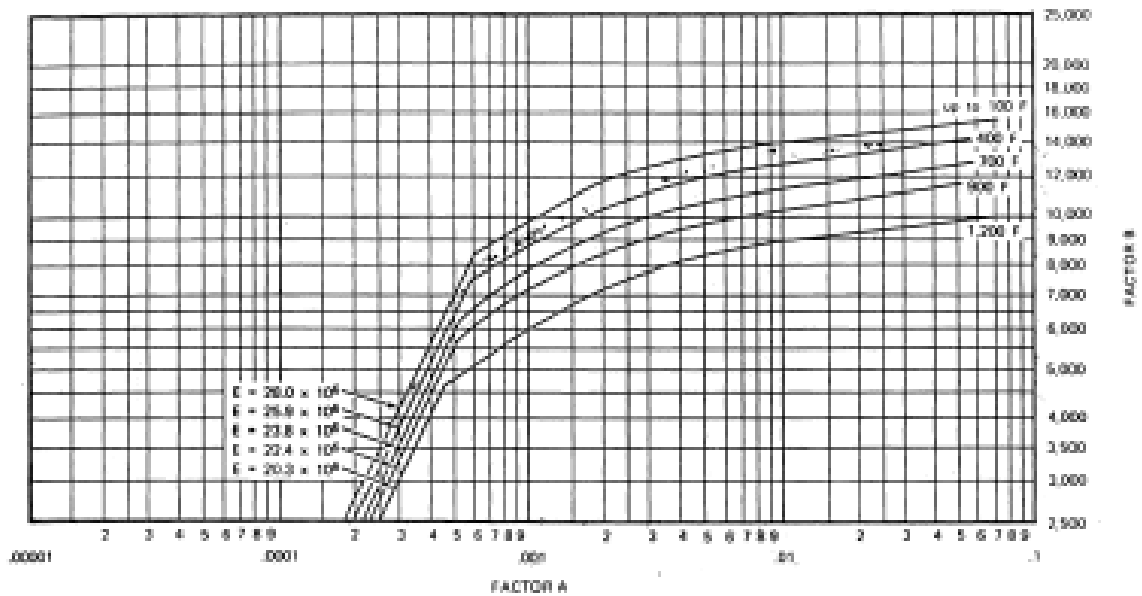


Figura 11.2.5. Diagrama para la determinación del factor B en el diseño mecánico a presión externa.

Planta de producción de Acrilonitrilo

11. Manual de cálculos

Tabla 11.17.1.7. Módulo de elasticidad para el diseño mecánico del cuerpo a presión externa.

MODULI OF ELASTICITY OF CARBON STEEL MILLION PSI AT TEMPERATURE, F									
70	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
29.0	28.7	28.2	27.6	26.8	25.9	24.5	23.0	21.0	18.1

Los parámetros obtenidos para el cálculo del grosor de pared para el cuerpo y el cabezal y el fondo del tanque TC-403 se encuentran en las tablas 11.17.1.8 y 11.17.1.9, respectivamente.

Tabla 11.17.1.8. Parámetros para el diseño mecánico del cuerpo a presión externa.

TD-403		
Altura del cuerpo (m)	L	1.72
Diámetro externo (m)	D_o	1.16
Relación altura-diámetro externo	L/D_o	1.49
Relación diámetro externo-grosor	D_o/t_{cuerpo}	231.63
Factor A	A	$2.5 \cdot 10^{-4}$
Factor B	B	3450
Módulo de elasticidad (bar)	E	$2 \cdot 10^6$

Tabla 11.17.1.9. Parámetros para el diseño mecánico del cabezal a presión externa.

TD-403		
Factor A	A	$4.32 \cdot 10^{-4}$
Factor B	B	5500
Módulo de elasticidad (psi)	E	$2.9 \cdot 10^7$
Grosor de pared 1 (mm)	$t_{\text{cabezal},1}$	1.60
Grosor de pared 2 (mm)	$t_{\text{cabezal},2}$	4

Los resultados de diseño obtenidos para el cuerpo y el cabezal y el fondo de la columna TD-403 son los mostrados en las tabla 11.17.1.10 y 11.17.1.11, respectivamente.

Tabla 11.17.1.10. Resultados del diseño mecánico del cuerpo a presión externa.

TD-403		
Grosor de pared (mm)	t_{cuerpo}	6
Presión máxima de trabajo (bar)	$P_{a_{\text{cuerpo}}}$	1.37

Tabla 11.17.1.11. Resultados del diseño mecánico del cabezal y el fondo a presión externa.

TD-403		
Grosor de pared (mm)	t_{cabezal}	5
Presión máxima de trabajo (bar)	$P_{a_{\text{cabezal}}}$	1.31

11.17.2. Peso de los tanques

Para conocer el peso de los tanques cuando estos se encuentran vacíos, cuando están llenos de agua para pruebas hidráulicas y en operación, se debe tener en cuenta el peso del cuerpo cilíndrico del tanque, el cabezal y el fondo.

A continuación se va a detallar el procedimiento de cálculo de los pesos para las dos partes que forman el tanque, así como del equipo al completo. Para la nomenclatura, referirse a las tablas proporcionadas en este apartado.

Cálculo del peso del cuerpo cilíndrico

El volumen del cuerpo se calcula mediante la ecuación 11.17.2.1.

$$V_{cuerpo} = \frac{\pi}{4} \left((D + 2t_{cuerpo})^2 - D^2 \right) \cdot H \quad \text{Ecuación 11.17.2.1}$$

A partir de este dato y de la densidad del material (ρ_{acero}), que para el acero es de 7850 kg/m³, se puede calcular el peso del cuerpo con la ecuación 11.17.2.2.

$$W_{cuerpo} = V_{cuerpo} \cdot \rho_{acero} \quad \text{Ecuación 11.17.2.2}$$

Cálculo del peso del cabezal

Para calcular el volumen de acero del cabezal primero debe calcularse la superficie que ocupa mediante la ecuación 11.17.2.3.

$$S_{cabezal} = \frac{\pi}{2} D_p^2 + D_e (D_e - 2D_p) \quad \text{Ecuación 11.17.2.3}$$

Donde D_e y D_p se calculan con las ecuaciones 11.17.2.4 y 11.17.2.5, respectivamente.

$$D_e = D + 2t_{cabezal} \quad \text{Ecuación 11.17.2.4}$$

$$D_p = 0.2D_e \quad \text{Ecuación 11.17.2.5}$$

El volumen del cabezal se calcula con la ecuación 11.17.2.6.

$$V_{cabezal} = S_{cabezal} \cdot t_{cabezal} \quad \text{Ecuación 11.17.2.6}$$

Y el peso se calcula a partir de la densidad del material con la ecuación 11.17.2.7.

$$W_{cabezal} = V_{cabezal} \cdot \rho_{acero} \quad \text{Ecuación 11.17.2.7}$$

Cálculo del peso del equipo

El volumen del equipo vacío se ha calculado a partir de la ecuación 11.17.2.8.

$$V_{vacío} = V_{cuerpo} + V_{cabezal}$$

$$\text{Ecuación 11.17.2.8}$$

La ecuación 11.17.2.9 se ha utilizado para el cálculo del peso del equipo vacío.

$$W_{vacío} = W_{cuerpo} + W_{cabezal}$$

Ecuación 11.17.2.9

El volumen de agua que puede contener el equipo se ha calculado con la ecuación 11.17.2.10.

$$V_{agua} = \frac{\pi}{4} D^2 (H - h_{cabezal} - h_{fondo}) + V_{cabezal}$$

Ecuación 11.17.2.10

El peso del equipo lleno de agua se ha calculado a partir de la ecuación 11.17.2.11.

$$W_{agua} = W_{vacío} + V_{agua} \cdot \rho_{agua} \quad \text{Ecuación 11.17.2.11}$$

11.18. Diseño de los tanques de mezcla (M-401/404) y los agitadores (AG-401/404)

En el proceso se cuenta con cuatro tanques de mezcla, todos ellos en el área 400, encargados de unir dos corrientes líquidas. El hecho de utilizar tanques agitados es para asegurar que el corriente de salida será perfectamente homogéneo y que se encontrará en las condiciones deseadas.

En este apartado se detallará el procedimiento tanto del tanque de mezcla como el agitador que utilizará, así como la potencia requerida.

Diseño de los tanques (M-401/404)

Para el diseño de los tanques pulmón es necesario conocer el caudal volumétrico que tendrán que tratar. Estos datos se recogen en la tabla 11.18.1.

Tabla 11.18.1 Caudales volumétricos a tratar en los tanques de mezcla.

	Caudal (m ³ /h)
M-401	7.31
M-402	177.6
M-403	14.13
M-404	3.655

El volumen del tanque se ha calculado según la ecuación 11.18.1, considerando que el líquido va a ocupar un 85% del volumen.

$$V = \frac{Q \cdot \tau}{N_{\text{tanques}} \cdot 0.85} \quad \text{Ecuación 11.18.1}$$

Donde Q es el caudal volumétrico en m³/h, τ es el tiempo de residencia (5 minutos en todos los casos) i N_{tanques} es el número de tanques diseñados, que se ha decidido en función del volumen total requerido, utilizando más de un tanque en paralelo cuando este superava los 20 m³.

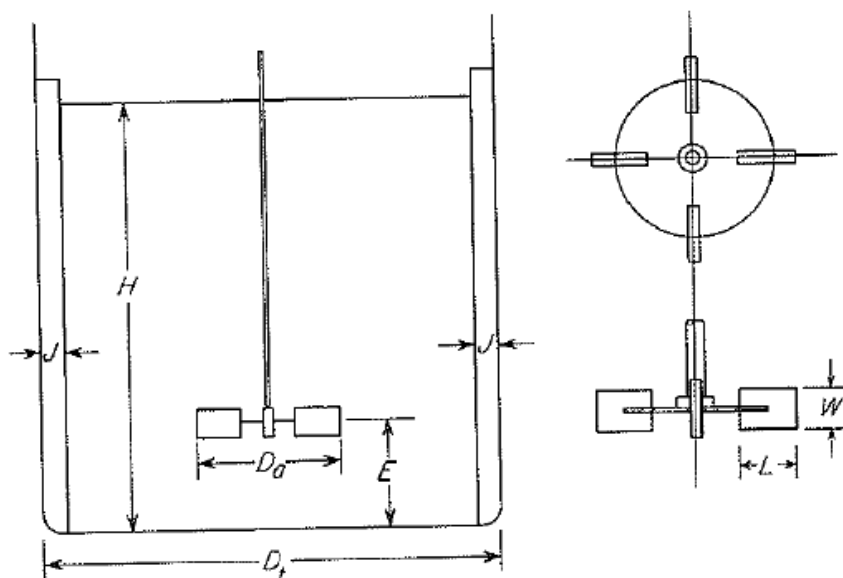
Utilizando una relación Altura/Diámetro de 1.5 se ha calculado la altura y el diámetro de los tanques con las ecuaciones 11.18.2 y 11.18.3, respectivamente.

$$D = \sqrt[3]{\frac{4V}{1.5\pi}} \quad \text{Ecuación 11.18.2}$$

$$H = 1.5D \quad \text{Ecuación 11.18.3}$$

Diseño de los agitadores (AG-401/404)

El diseño de los agitadores se ha hecho en base a las proporciones que propone McCabe en base al diámetro del tanque y que están esquematizadas en la figura 11.18.1.



$$\frac{D_a}{D_t} = \frac{1}{3} \quad \frac{H}{D_t} = 1 \quad \frac{J}{D_t} = \frac{1}{12}$$

$$\frac{E}{D_t} = \frac{1}{3} \quad \frac{W}{D_a} = \frac{1}{5} \quad \frac{L}{D_a} = \frac{1}{4}$$

Figura 11.18.1. Dimensiones de los agitadores de los tanques de mezcla.

La tabla 11.18.2. muestra la nomenclatura que se va a seguir en este apartado para el cálculo de la potencia consumida por el agitador.

Figura 11.18.2. Parámetros i nomenclatura para el cálculo de la potencia del agitador.

Parámetro	Nomenclatura
Viscosidad de la mezcla (Pa·s)	μ
Densidad de la mezcla (kg/m ³)	ρ
Velocidad de giro (rad/s)	n
Número de Reynolds	Re
Tiempo de mezcla (s)	t_M
Potencia (kW)	P
Volumen (m ³)	V

Para conocer la potencia consumida por el agitador es preciso saber si la mezcla se encontrará en un régimen turbulento o laminar, por lo que el primer paso es calcular el número de Reynolds según la ecuación 11.18.4.

$$Re = \frac{n \cdot D_a \cdot \rho}{\mu} \quad \text{Ecuación 11.18.4}$$

11. Manual de cálculos

Como en todos los casos se observa que el régimen es turbulento, se puede aplicar la ecuación 11.18.5 para calcular el tiempo de mezcla.

$$t_M = \frac{5\pi}{4} \cdot \frac{D_T \cdot H}{0.92n \cdot D_a^2} \quad \text{Ecuación 11.18.5}$$

Así, la potencia consumida se puede calcular a part de la ecuación 11.18.6.

$$P = K_T \cdot n^3 \cdot D_a^5 \cdot \rho \quad \text{Ecuación 11.18.6}$$

El parámetro K_T se determina a partir del tipo de rodete con la tabla 11.18.3. En nuestro caso se han elegido dos palas planas en todos los casos.

Tabla 11.18.3. Parámetro K_T en función del tipo de rodete.

Tipo de rodete‡	K_L	K_T
Hélice, paso cuadrado, tres palas	41,0	0,32
Paso de 2, tres palas	43,5	1,00
Turbina, seis palas planas	71,0	6,30
Seis palas curvas	70,0	4,80
Turbina de ventilador, seis palas	70,0	1,65
Palas planas, dos palas§	36,5	1,70
Turbina cerrada, seis palas curvas	97,2	1,08
Con estator, sin deflectores	172,5	1,12

Por último, se debe comprobar que nos encontramos dentro de los rangos de operación típicos mirando la tabla 11.18.4 a partir del valor de P/V calculado.

Tabla 11.18.4. Valores típicos de P/V para agitadores.

Agitation	Applications	Power, kW/m ³
Mild	Blending, mixing	0.04–0.10
	Homogeneous reactions	0.01–0.03
Medium	Heat transfer	0.03–1.0
	Liquid-liquid mixing	1.0–1.5
Severe	Slurry suspension	1.5–2.0
	Gas absorption,	1.5–2.0
	Emulsions	1.5–2.0
Violent	Fine slurry suspension	>2.0

La tabla 11.18.5 muestra resumidos los resultados obtenidos para los cuatro agitadores.

Tabla 11.18.5. Resultados derivados del cálculo de la potencia de los agitadores.

AG-401		
Número de Reynolds	Re	$1.72 \cdot 10^7$
Tiempo de mezcla (s)	t_M	2.45

Potencia (kW)	P	0.0325
Relación potencia-volumen (kW/m ³)	P/V	0.0453
AG-402		
Número de Reynolds	Re	2.45 · 10 ⁷
Tiempo de mezcla (s)	t _M	2.45
Potencia (kW)	P	2.96
Relación potencia-volumen (kW/m ³)	P/V	0.340
AG-403		
Número de Reynolds	Re	5.51 · 10 ⁶
Tiempo de mezcla (s)	t _M	2.45
Potencia (kW)	P	0.143
Relación potencia-volumen (kW/m ³)	P/V	0.103
AG-404		
Número de Reynolds	Re	1.15 · 10 ⁶
Tiempo de mezcla (s)	t _M	2.45
Potencia (kW)	P	0.0216
Relación potencia-volumen (kW/m ³)	P/V	0.0603

11.18.1. Diseño mecánico de los tanques

En este apartado se explicará el cálculo del espesor de pared tanto del cuerpo como de los cabezales de los tanques de mezcla.

Una vez se ha realizado el procedimiento de diseño de los tanques explicado en el 11.18, ya se tienen los datos necesarios para realizar el diseño mecánico.

Tabla 11.18.1.1. Características y condiciones de operación de los tanques de mezcla.

M-401		
Diámetro interno (m)	D	0.847
Radio interno (m)	R	0.424
Altura (m)	H	1.27
Presión de operación (bar)	P _{op}	1.01
Presión de diseño (bar)	P	1.162
Temperatura de operación (°F)	T _{máx}	190
M-402		
Diámetro interno (m)	D	1.95
Radio interno (m)	R	0.974
Altura (m)	H	2.92
Presión de operación (bar)	P _{op}	0.8
Presión de diseño (bar)	P	0.92
Temperatura de operación (°F)	T _{máx}	150
M-403		
Diámetro interno (m)	D	1.06
Radio interno (m)	R	0.528
Altura (m)	H	1.58
Presión de operación (bar)	P _{op}	2.8
Presión de diseño (bar)	P	3.22
Temperatura de operación (°F)	T _{máx}	80
M-404		
Diámetro interno (m)	D	0.673
Radio interno (m)	R	0.336
Altura (m)	H	1.01
Presión de operación (bar)	P _{op}	2.4

Presión de diseño (bar)	P	2.76
Temperatura de operación (°F)	T _{máx}	25

La tabla 11.18.1.2 recoge los demás parámetros necesarios para el cálculo del espesor de pared, así como la nomenclatura que se seguirá en las ecuaciones utilizadas a continuación.

Tabla 11.18.1.2. Parámetros para el cálculo del espesor de pared de los tanques.

M-401		
Módulo de tensión del material (bar)	S	1297
Eficacia de la unión	E	0.85
Sobreespesor de corrosión (mm)	C ₁	0.75
Tolerancia de fabricación (mm)	C ₂	0.2
Factor M	M	1.54
M-402		
Módulo de tensión del material (bar)	S	1297
Eficacia de la unión	E	0.85
Sobreespesor de corrosión (mm)	C ₁	0.75
Tolerancia de fabricación (mm)	C ₂	0.5
Factor M	M	1.54
M-403		
Módulo de tensión del material (bar)	S	1297
Eficacia de la unión	E	0.85
Sobreespesor de corrosión (mm)	C ₁	0.75
Tolerancia de fabricación (mm)	C ₂	0.5
Factor M	M	1.54
M-404		
Módulo de tensión del material (bar)	S	1297
Eficacia de la unión	E	0.85
Sobreespesor de corrosión (mm)	C ₁	0.75
Tolerancia de fabricación (mm)	C ₂	0.3
Factor M	M	1.54

El cálculo del espesor de pared de los tanques M-401, M-403 y M-404 se va a realizar a presión interna, ya que la máxima presión que tendrán que soportar es la que hay en el interior del recipiente. Sin embargo, el tanque M-402 se encuentra al vacío. De modo que el diseño mecánico de este último tanque se hará a presión externa, ya que la presión que tendrá que soportar el tanque será la que haya en el exterior, es decir, la atmosférica.

A continuación se presenta la metodología de cálculo para el diseño mecánico a presión interna y externa.

Procedimiento para el diseño mecánico a presión interna (M-401/403)

Para conocer el espesor de pared del cuerpo de los tanques se ha aplicado la ecuación 11.18.1.1, que es válida para cuerpos cilíndricos.

Planta de producción de Acrilonitrilo

11. Manual de cálculos

$$t_{cuerpo} = \frac{PR}{SE + 0.4P} + C_1 \quad \text{Ecuación 11.18.1.1}$$

Para el cabezal, se debe aplicar la ecuación 11.18.1.2, que es válida para cabezales toriesféricos.

$$t_{cabezal} = \frac{PDM}{2SE - 0.2P} + C_1 + C_2 \quad \text{Ecuación 11.18.1.2}$$

Otro parámetro importante a conocer es la máxima presión de trabajo permitida. Esta se calcula según la ecuación 11.18.1.3 para el cuerpo y la ecuación 11.18.1.4 para el cabezal de los tanques.

$$P_{m\acute{a}x,cuerpo} = \frac{SEt_{cuerpo}}{R - 0.4t} \quad \text{Ecuación 11.18.1.3}$$

$$P_{m\acute{a}x,cabezal} = \frac{2SEt_{cuerpo}}{DM - 0.4t} \quad \text{Ecuación 11.18.1.4}$$

El módulo de tensión del material es función del tipo de materia y de la máxima temperatura de operación y se determina a partir de la tabla 11.18.1.3.

Tabla 11.18.1.3. Módulos de tensión para diferentes materiales en función de la temperatura de operación.

Specification		MAXIMUM ALLOWABLE STRESS VALUES IN TENSION FOR HIGH-ALLOY STEEL (CAUTION: See UW-12 for vessels constructed under part UW) Maximum Allowable Stress, ksi (Multiply by 1000 to Obtain psi), for Metal Temp., °F, Not Exceeding												
Number	Grade	-20 to 100	200	300	400	500	600	650	700	750	800	850	900	950
SA-240	304	18,8	17,8	16,6	16,2	15,9	15,9	15,9	15,9	15,5	15,2	14,9	14,7	14,4
SA-240	304L	15,7	15,7	15,3	14,7	14,4	14	13,7	13,5	13,3	13	---	---	---
SA-240	316	18,8	18,8	18,4	18,1	18,0	17,0	16,7	16,3	16,1	15,9	15,7	15,5	15,4
SA-240	316L	15,7	15,7	15,7	15,5	14,4	13,5	13,2	12,9	12,6	12,4	12,1	---	---

En nuestro caso, se ha elegido un acero SA-240 de grado 316 para los tanques M-401 y M-402 y de grado 301 para los tanques M-403 y M-404.

La eficacia de unión depende del tipo de soldadura y el radiografiado que se ha llevado a cabo a la hora de fabricar el equipo y se ha determinado a partir de la tabla 11.18.1.4.

Tabla 11.18.1.4. Eficacia de unión en función de la soldadura y el radiografiado.

	Radiografiado total	Radiografiado parcial	Sin radiografiado
Soldadura simple	1	0.85	0.7
Soldadura doble	0.9	0.8	0.65

El sobreespesor de corrosión se calcula en base a la degradación que sufre la chapa metálica a lo largo del tiempo debido a la corrosión según la ecuación 11.18.1.5.

11. Manual de cálculos

$$C_1 = 0.05 \frac{mm}{año} \cdot 15 \text{ años de vida útil} = 0.75 mm$$

Ecuación 11.18.1.5

La tolerancia de fabricación (C_2) tiene en cuenta las posibles desviaciones entre el valor teórico que debe tener el espesor de pared y el que finalmente tiene a causa de posibles defectos en la fabricación. Se calcula como un 10% del espesor de pared teórico calculado.

El factor M depende del tipo de cabezal que se esté utilizando y se determina a partir de la tabla 11.18.1.5 con el valor obtenido en la ecuación 11.18.1.8, válido para un cabezal tipo Klopper.

$$L = D \quad \text{Ecuación 11.18.1.6}$$

$$r = 0.1D \quad \text{Ecuación 11.18.1.7}$$

$$\frac{L}{r} = \frac{D}{0.1D} = 10 \quad \text{Ecuación 11.18.1.8}$$

Tabla 11.18.1.5. Factor M para diferentes valores de L/r.

VALUES OF FACTOR "M"																	
L/r	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50	2.75	3.00	3.25	3.50	4.00	4.50	5.00	5.50	6.00	6.50
M	1.00	1.03	1.06	1.08	1.10	1.13	1.15	1.17	1.18	1.20	1.22	1.25	1.28	1.31	1.34	1.36	1.39
L/r	7.00	7.50	8.00	8.50	9.00	9.50	10.0	10.5	11.0	11.5	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	16.3	*
M	1.41	1.44	1.46	1.48	1.50	1.52	1.54	1.56	1.58	1.60	1.62	1.65	1.69	1.72	1.75	1.77	
* THE MAXIMUM ALLOWED RATIO : L = D + 2t (see note 2 on facing page)																	

Para el fondo inferior, al ser plano, se debe conocer la altura de líquido que éste deberá soportar y calcular el espesor en función del número adimensional de Sherwood, representado en la ecuación 11.18.1.9.

$$Sh = \frac{0.0005 \cdot D \cdot (h_{líquido} - 30.48) \cdot G}{t_{cuerpo}} \quad \text{Ecuación 11.18.1.9}$$

Donde la altura del líquido se ha calculada a partir de la ecuación 11.18.1.10.

$$h_{líquido} = \frac{4 \cdot 0.85 \cdot V}{\pi \cdot D^2} \quad \text{Ecuación 11.18.1.10}$$

La elección del espesor se ha hecho en base a la tabla 11.18.1.6.

Tabla 11.18.1.6. Espesores del fondo plano en función del número de Sherwood.

Espesor Mínimo (mm) del Primer Anillo del Cuerpo	Esfuerzo Calculado para Prueba Hidrostática en el Primer Anillo del Cuerpo (Kg/cm ²)			
	<1989	<2109	<2320	<2530
t < 19.05	6.35	6.35	7.14	8.73
09.05 < 25.4	6.35	7.14	9.52	11.11
25.4 < 31.75	6.35	8.73	11.91	14.28
31.75 < 38.10	7.93	11.11	14.28	17.46
38.10 < 44.45	8.73	12.7	15.87	19.05

De esta forma se han obtenido los resultados resumidos en la tabla 11.18.1.7 para los tres tanques.

Tabla 11.18.1.7. Grosos de pared y presiones máximas para los tanques de mezcla a presión interna.

M-401		
Grosor de pared del cuerpo (mm)	t_{cuerpo}	2
Grosor de pared del cabezal (mm)	t_{cabezal}	2
Grosor de pared del fondo (mm)	t_{fondo}	7
Presión máxima en el cuerpo (bar)	$P_{\text{máx,cuerpo}}$	5.21
Presión máxima en el cabezal (bar)	$P_{\text{máx,cabezal}}$	3.38
M-403		
Grosor de pared del cuerpo (mm)	t_{cuerpo}	3
Grosor de pared del cabezal (mm)	t_{cabezal}	4
Grosor de pared del fondo (mm)	t_{fondo}	7
Presión máxima en el cuerpo (bar)	$P_{\text{máx,cuerpo}}$	6.28
Presión máxima en el cabezal (bar)	$P_{\text{máx,cabezal}}$	5.42
M-404		
Grosor de pared del cuerpo (mm)	t_{cuerpo}	2
Grosor de pared del cabezal (mm)	t_{cabezal}	3
Grosor de pared del fondo (mm)	t_{fondo}	7
Presión máxima en el cuerpo (bar)	$P_{\text{máx,cuerpo}}$	6.57
Presión máxima en el cabezal (bar)	$P_{\text{máx,cabezal}}$	6.38

Procedimiento para el diseño mecánico a presión externa (M-402)

El cálculo del espesor de pared, tanto para el cilindro como para el cabezal y las tapas del tanque, se va a realizar mediante un procedimiento iterativo, suponiendo un espesor y comprobando su validez mediante unos criterios determinados.

Para el cuerpo del tanque, dicho procedimiento es el siguiente:

6. Suponer un valor de t_{cuerpo} . Calcular L/D_o i D_o/t (ver figura 11.18.1.3 para nomenclatura).
7. Determinar el factor A mediante la figura 11.18.1.4.
8. Determinar el factor B mediante la figura 11.18.1.5.

9. Calcular la presión máxima permitida mediante la ecuación 11.18.1.11. Si el valor de A cae en la zona izquierda de la figura 11.18.1.5, se calculará mediante la ecuación 11.18.1.12.

$$Pa_{cuerpo} = \frac{4B}{3 \left(\frac{D_o}{t_{cuerpo}} \right)} \text{ Ecuación 11.18.1.11}$$

$$Pa_{cuerpo} = \frac{2AE}{3 \left(\frac{D_o}{t_{cuerpo}} \right)} \text{ Ecuación 11.18.1.12}$$

10. Si la presión calculada es menor que la presión externa de diseño, que en nuestro caso será la atmosférica (1.01 bar), se debe volver al punto 1 suponiendo un t_{cuerpo} mayor.

Para el cabezal y las tapas, que serán toriesféricos, el procedimiento es el descrito a continuación:

13. Calcular $t_{cabezal,1}$ mediante el procedimiento descrito para presión interna utilizando una presión de diseño de 1.67 veces la presión externa y $E=1$.
14. Suponer un valor de $t_{cabezal,2}$ y calcular el factor A mediante la ecuación 11.18.1.13.

$$A = \frac{0.125}{\frac{R_{cabezal}}{t_{cabezal,2}}} \text{ Ecuación 11.18.1.13}$$

15. Determinar el factor B mediante la figura 11.18.1.5.
16. Calcular la máxima presión permitida mediante la ecuación 11.18.1.14. Si el valor de A está en la zona izquierda de la figura 11.18.1.5, se deberá calcular con la ecuación 11.18.1.15. El módulo de elasticidad E se puede determinar con la tabla 11.18.1.8.

$$Pa_{cabezal} = \frac{B}{\frac{R_{cabezal}}{t_{cabezal,2}}} \text{ Ecuación 11.18.1.14}$$

$$Pa_{cabezal} = \frac{0.0625E}{\left(\frac{R_{cabezal}}{t_{cabezal,s}} \right)^2} \text{ Ecuación 11.18.1.15}$$

17. Si la presión calculada es menor, se debe volver al punto 2, suponiendo un valor de $t_{cabezal,2}$ mayor. Si no, pasar al punto 6.
18. Comparar los valores de $t_{cabezal,1}$ y $t_{cabezal,2}$ y elegir el más elevado como resultado final.

Las figuras 11.18.1.4-11.18.1.6 y la tabla 11.18.1.8 mencionadas anteriormente se presentan seguidas a continuación.

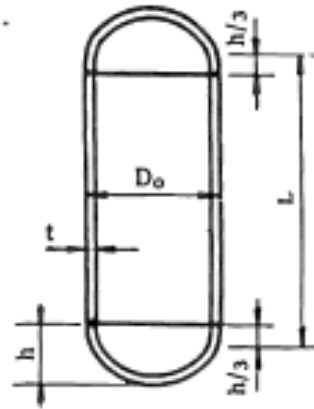


Figura 11.2.3. Características del cuerpo para el diseño mecánico a presión externa.

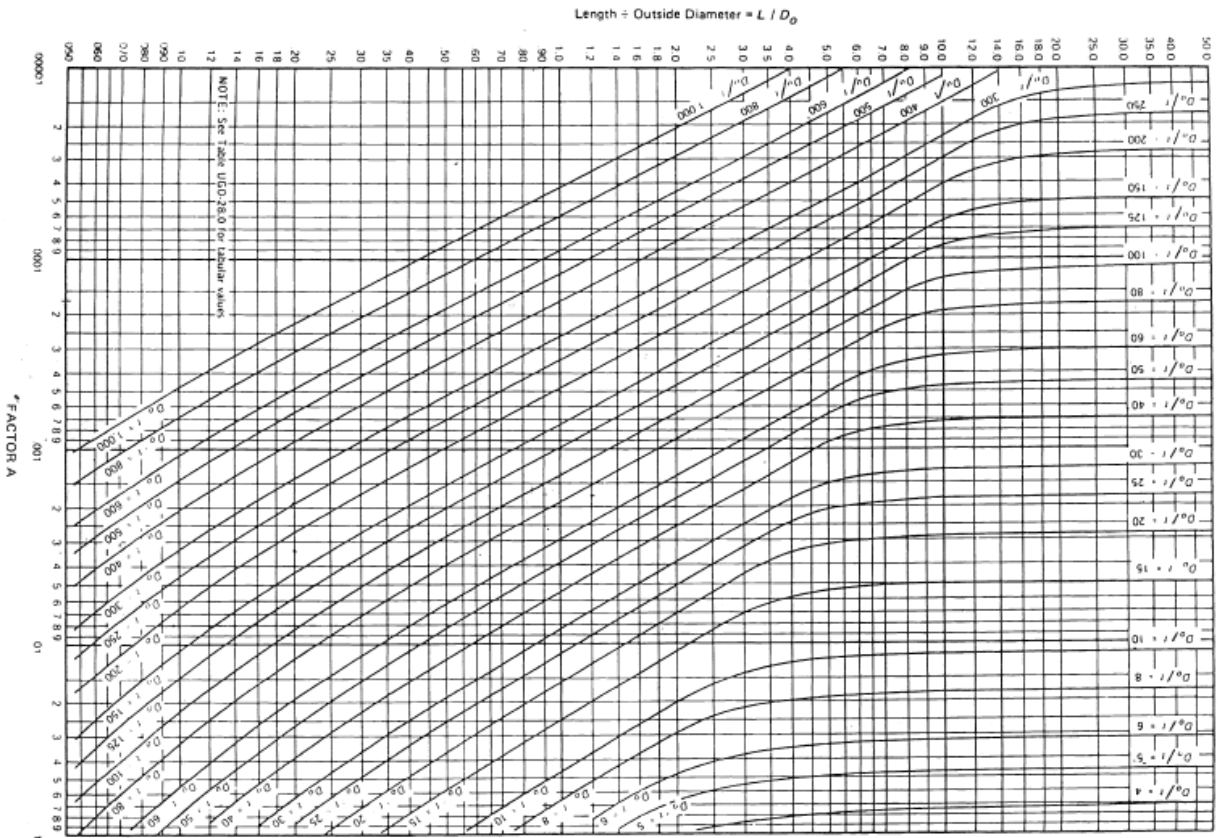


Figura 11.18.1. Diagrama para la determinación del factor A en el diseño mecánico a presión externa.

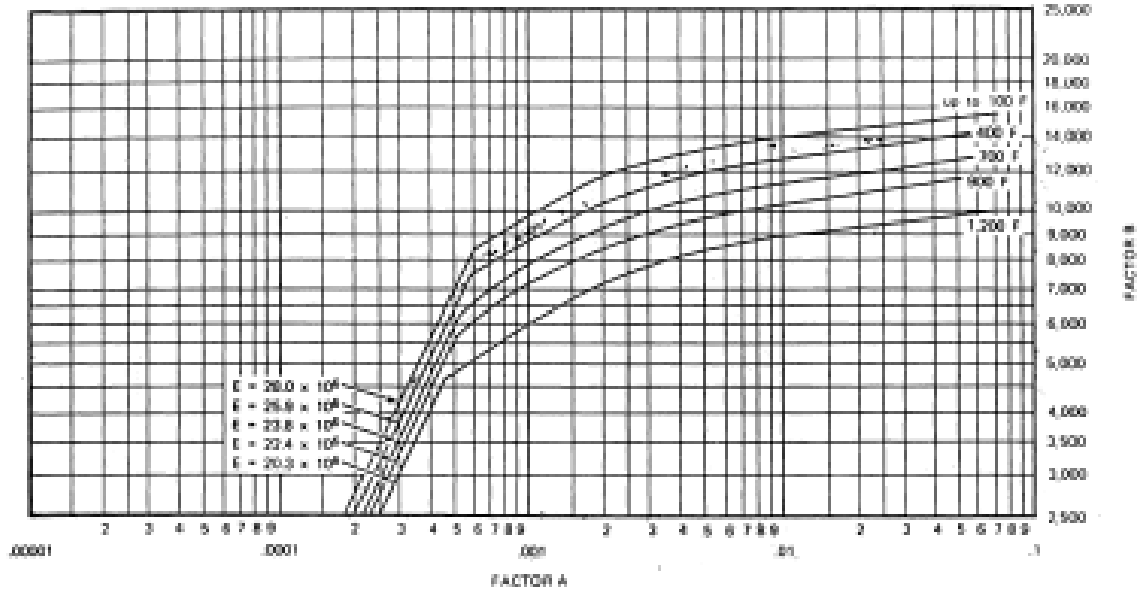


Figura 11.2.5. Diagrama para la determinación del factor B en el diseño mecánico a presión externa.

Tabla 11.18.1.8. Módulo de elasticidad para el diseño mecánico del cuerpo a presión externa.

MODULI OF ELASTICITY OF CARBON STEEL MILLION PSI. AT TEMPERATURE, F									
70	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
29.0	28.7	28.2	27.6	26.8	25.9	24.5	23.0	21.0	18.1

Los parámetros obtenidos para el cálculo del grosor de pared para el cuerpo y el cabezal y el fondo del tanque M-402 se encuentran en las tablas 11.18.1.9 y 11.18.1.10, respectivamente.

Tabla 11.18.1.9. Parámetros para el diseño mecánico del cuerpo a presión externa.

M-402		
Altura del cuerpo (m)	L	2.92
Diámetro externo (m)	D_o	1.96
Relación altura-diámetro externo	L/D_o	1.49
Relación diámetro externo-grosor	D_o/t_{cuerpo}	245.5
Factor A	A	$2.4 \cdot 10^{-4}$
Factor B	B	3400
Módulo de elasticidad (bar)	E	$2 \cdot 10^6$

Tabla 11.18.1.10. Parámetros para el diseño mecánico del cabezal a presión externa.

M-402		
Factor A	A	$3.19 \cdot 10^{-4}$
Factor B	B	4500
Módulo de elasticidad (psi)	E	$2.89 \cdot 10^7$
Grosor de pared 1 (mm)	$t_{\text{cabezal},1}$	2.13
Grosor de pared 2 (mm)	$t_{\text{cabezal},2}$	4

Los resultados de diseño obtenidos para el cuerpo y el cabezal y el fondo de la columna TD-403 son los mostrados en las tabla 11.18.1.11 y 11.18.1.12, respectivamente.

Tabla 11.18.1.11. Resultados del diseño mecánico del cuerpo a presión externa.

M-402		
Grosor de pared (mm)	t_{cuerpo}	8
Presión máxima de trabajo (bar)	$P_{a_{\text{cuerpo}}}$	1.27

Tabla 11.18.1.12. Resultados del diseño mecánico del cabezal y el fondo a presión externa.

M-402		
Grosor de pared (mm)	t_{cabezal}	5
Presión máxima de trabajo (bar)	$P_{a_{\text{cabezal}}}$	1.13

11.18.2. Peso de los tanques

Para conocer el peso de los tanques cuando estos se encuentra vacíos, cuando están llenos de agua para pruebas hidráulicas y en operación, se debe tener en cuenta el peso del cuerpo cilíndrico del tanque, el cabezal y el fondo.

A continuación se va a detallar el procedimiento de cálculo de los pesos para las dos partes que forman el tanque, así como del equipo al completo. Para la nomenclatura, referirse a las tablas proporcionadas en este apartado.

Cálculo del peso del cuerpo cilíndrico

El volumen del cuerpo se calcula mediante la ecuación 11.18.2.1.

$$V_{\text{cuerpo}} = \frac{\pi}{4} \left((D + 2t_{\text{cuerpo}})^2 - D^2 \right) \cdot H \quad \text{Ecuación 11.18.2.1}$$

A partir de este dato y de la densidad del material (ρ_{acero}), que para el acero es de 7850 kg/m³, se puede calcular el peso del cuerpo con la ecuación 11.18.2.2.

$$W_{\text{cuerpo}} = V_{\text{cuerpo}} \cdot \rho_{\text{acero}} \quad \text{Ecuación 11.18.2.2}$$

Cálculo del peso del cabezal

Para calcular el volumen de acero del cabezal primero debe calcularse la superficie que ocupa mediante la ecuación 11.18.2.3.

$$S_{cabezal} = \frac{\pi}{2} D_p^2 + D_e(D_e - 2D_p) \quad \text{Ecuación 11.18.2.3}$$

Donde D_e y D_p se calculan con las ecuaciones 11.18.2.4 y 11.18.2.5, respectivamente.

$$D_e = D + 2t_{cabezal} \quad \text{Ecuación 11.18.2.4}$$

$$D_p = 0.2D_e \quad \text{Ecuación 11.18.2.5}$$

El volumen del cabezal se calcula con la ecuación 11.18.2.6.

$$V_{cabezal} = S_{cabezal} \cdot t_{cabezal} \quad \text{Ecuación 11.18.2.6}$$

Y el peso se calcula a partir de la densidad del material con la ecuación 11.18.2.7.

$$W_{cabezal} = V_{cabezal} \cdot \rho_{acero} \quad \text{Ecuación 11.18.2.7}$$

Cálculo del peso del equipo

El volumen del equipo vacío se ha calculado a partir de la ecuación 11.18.2.8.

$$V_{vacío} = V_{cuerpo} + V_{cabezal}$$

$$\text{Ecuación 11.18.2.8}$$

La ecuación 11.18.2.9 se ha utilizado para el cálculo del peso del equipo vacío.

$$W_{vacío} = W_{cuerpo} + W_{cabezal}$$

$$\text{Ecuación 11.18.2.9}$$

El volumen de agua que puede contener el equipo se ha calculado con la ecuación 11.18.2.10.

$$V_{agua} = \frac{\pi}{4} D^2 (H - h_{cabezal}) + V_{cabezal}$$

$$\text{Ecuación 11.18.2.10}$$

El peso del equipo lleno de agua se ha calculado a partir de la ecuación 11.18.2.11.

$$W_{agua} = W_{vacío} + V_{agua} \cdot \rho_{agua} \quad \text{Ecuación 11.18.2.11}$$