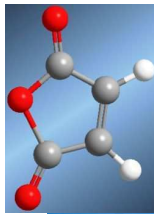




# *Planta de producción sintética de Anhídrido Maleico*

## **ANEXOS DE LA MEMORIA**



**Autor:** José Antonio Vellido Pérez  
**Facultad:** Ciencias (Universidad de Granada)  
**Titulación:** Ingeniería química  
**Fecha:** Septiembre de 2014

UNIVERSIDAD DE GRANADA  
FACULTAD DE CIENCIAS  
TÍTULO DE INGENIERO QUÍMICO  
PROYECTO FIN DE CARRERA

**PLANTA DE PRODUCCIÓN SINTÉTICA DE  
ANHÍDRIDO MALEICO**

ANEXOS DE LA MEMORIA

AUTOR: José Antonio Vellido Pérez

El alumno y proyectista D. José Antonio Vellido Pérez, bajo la autorización de los profesores D. Miguel García Román y D. Emilio Medina Romero, ha redactado el siguiente proyecto, “PLANTA DE PRODUCCIÓN SINTÉTICA DE ANHÍDRIDO MALEICO”, con motivo de la elaboración del Proyecto Fin de Carrera de la titulación de Ingeniería Química en la Facultad de Ciencias de la Universidad de Granada.

Septiembre de 2014

# ÍNDICE

<b>ÍNDICE .....</b>	<b>4</b>
<b>1. ANEXO DE CÁLCULOS .....</b>	<b>5</b>
1.1. BALANCES DE MATERIA Y ENERGÍA .....	5
1.2. DISEÑO DE EQUIPOS .....	23
1.3. BOMBAS Y TUBERÍAS .....	83
1.3.1. <i>Determinación del diámetro óptimo de la conducción</i> .....	83
1.3.2. <i>Cálculo de las pérdidas de carga</i> .....	84
1.3.3. <i>Cálculo de las bombas</i> .....	95
1.3.4. <i>Cálculo de las soplantes</i> .....	128
1.4. RED DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE .....	131
1.4.1. <i>Dimensionamiento de las redes de distribución</i> .....	131
1.4.1.1. Red de abastecimiento de agua fría.....	134
1.4.1.2. Red de abastecimiento de agua caliente sanitaria (ACS).....	139
1.5. ILUMINACIÓN .....	144
1.5.1. <i>Iluminación natural</i> .....	144
1.5.2. <i>Iluminación artificial</i> .....	146
1.5.3. <i>Iluminación exterior</i> .....	149
1.5.4. <i>Alumbrado de emergencia</i> .....	149
1.6. INSTALACIÓN ELÉCTRICA .....	152
1.6.1. <i>Dimensionamiento de la instalación eléctrica</i> .....	152
1.6.1.1. Cuadros de distribución .....	154
1.6.1.2. Derivaciones individuales .....	174
1.6.2. <i>Instalación de puesta a tierra</i> .....	217

# 1. Anexo de cálculos

## 1.1. Balances de materia y energía

A continuación se presentan los balances de materia y energía a las unidades más importantes del proceso de producción:

Entrada de  $nC_4$  al proceso

$nC_4$ entrada	
kg/h	T-201
Temp. (°C)	20
Pres. (atm)	5
Fracción de vapor	0
$nC_4$	1263
$N_2$	---
$O_2$	---
AM	---
CO	---
$CO_2$	---
$H_2O$	---
Ácido maleico	---
Ácido fumárico	---
Ftalato de dibutilo	---
Ácido acético	---
Ácido acrílico	---
m (kg/h)	1263
Q ( $m^3/h$ )	2,18

## Vaporización

Vaporización (T-204)				
kg/h	Entrada		Salida	
	T-201	Agua	I-202	Agua
Temp. (°C)	20	139	47	139
Pres. (atm)	4,5	3,5	3,5	3,5
Fracción de vapor	0	1	1	0
nC <sub>4</sub>	1263	---	1263	---
N <sub>2</sub>	---	---	---	---
O <sub>2</sub>	---	---	---	---
AM	---	---	---	---
CO	---	---	---	---
CO <sub>2</sub>	---	---	---	---
H <sub>2</sub> O	---	251	---	251
Ácido maleico	---	---	---	---
Ácido fumárico	---	---	---	---
Ftalato de dibutilo	---	---	---	---
Ácido acético	---	---	---	---
Ácido acrílico	---	---	---	---
m (kg/h)	1263	251	1263	251
Q (m <sup>3</sup> /h)	2,18	132	150	0,26

Para la realización de este balance hemos utilizado los siguientes datos:

$$C_p (\text{T-201}, 24.05 \text{ °C}) = 2.4289 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{°C})$$

$$\lambda (n\text{-butano}, 3.5 \text{ atm}) = 346.4 \text{ kJ/kg}$$

$$C_p (\text{I-202}, 42.3 \text{ °C}) = 1.7734 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{°C})$$

$$\lambda (\text{H}_2\text{O}, 3.5 \text{ atm}) = 2154 \text{ kJ/kg}$$

## Intercambio de calor 2

Intercambio de calor (I-202)				
kg/h	Entradas		Salidas	
	T-204	Agua	M-201	Agua
Temp. (°C)	47	139	110	139
Pres. (atm)	3,5	3,5	3,5	3,5
Fracción de vapor	1	1	1	0
nC <sub>4</sub>	1263	---	1263	---
N <sub>2</sub>	---	---	---	---
O <sub>2</sub>	---	---	---	---
AM	---	---	---	---
CO	---	---	---	---
CO <sub>2</sub>	---	---	---	---
H <sub>2</sub> O	---	72	---	72
Ácido maleico	---	---	---	---
Ácido fumárico	---	---	---	---
Ftalato de dibutilo	---	---	---	---
Ácido acético	---	---	---	---
Ácido acrílico	---	---	---	---
m (kg/h)	1263	72	1263	72
Q (m <sup>3</sup> /h)	150	38	186	0,08

Para la realización de este balance hemos utilizado los siguientes datos:

$$C_p (\text{T-204, } 47 \text{ }^\circ\text{C}) = 1.7953 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$$

$$C_p (\text{M-201, } 110 \text{ }^\circ\text{C}) = 2.0847 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$$

$$\lambda (\text{H}_2\text{O, } 3.5 \text{ atm}) = 2154 \text{ kJ/kg}$$

## Compresión

Compresión (COM-201)		
kg/h	Entrada	Salida
	Aire	M-201
Temp. (°C)	20	121
Pres. (atm)	1	2,2
Fracción de vapor	1	1
nC <sub>4</sub>	---	---
N <sub>2</sub>	27936	27936
O <sub>2</sub>	7495	7495
AM	---	---
CO	---	---
CO <sub>2</sub>	11	11
H <sub>2</sub> O	333	333
Ácido maleico	---	---
Ácido fumárico	---	---
Ftalato de dibutilo	---	---
Ácido acético	---	---
Ácido acrílico	---	---
m (kg/h)	35774	35774
Q (m <sup>3</sup> /h)	30060	18388

Para la realización de este balance hemos utilizado la siguiente composición del aire (en porcentajes en peso):

$$\% \text{ de N}_2 = 78,09$$

$$\% \text{ de O}_2 = 20,95$$

$$\% \text{ de H}_2\text{O} = 0,93$$

$$\% \text{ de CO}_2 = 0,03$$

$$M_m(\text{aire}) = \sum_i x_i \cdot M_{mi} = 28.75 \text{ g/mol}$$

Además hemos utilizado para el cálculo que la relación molar de *n*-butano/aire debe permanecer siempre por debajo del límite inferior de explosión (Lohbeck et al., 2012):

$$\frac{n(\text{nC}_4)}{n(\text{aire})} = 1.75 \%$$



## Mezcla

Mezcla (M-201)			
kg/h	Entradas		Salida
	I-202	COM-201	R-201
Temp. (°C)	107	121	120
Pres. (atm)	2	2	2
Fracción de vapor	1	1	1
nC <sub>4</sub>	1263	---	1263
N <sub>2</sub>	---	27936	27936
O <sub>2</sub>	---	7495	7495
AM	---	---	---
CO	---	---	---
CO <sub>2</sub>	---	11	11
H <sub>2</sub> O	---	333	333
Ácido maleico	---	---	---
Ácido fumárico	---	---	---
Ftalato de dibutilo	---	---	---
Ácido acético	---	---	---
Ácido acrílico	---	---	---
m (kg/h)	1263	35774	37037
Q (m <sup>3</sup> /h)	330	20226	20523

## Reacción

Reacción (R-201)		
kg/h	Entrada	Salida
	M-201	I-203
Temp. (°C)	120	410
Pres. (atm)	2	1,65
Fracción de vapor	1	1
nC <sub>4</sub>	1263	189
N <sub>2</sub>	27936	27936
O <sub>2</sub>	7495	5084
AM	---	1270
CO	---	290
CO <sub>2</sub>	11	491
H <sub>2</sub> O	333	1752
Ácido maleico	---	---
Ácido fumárico	---	---
Ftalato de dibutilo	---	---
Ácido acético	---	11
Ácido acrílico	---	13
m (kg/h)	37037	37037
Q (m <sup>3</sup> /h)	20680	43896

Para la realización de este balance hemos utilizado los siguientes datos de reacción (Blum et al., 1982):

$$\text{Conversión (nC}_4\text{)} = 0.85$$

$$\text{Conversión parcial por reacción (n-butano)} = 0.70$$

$$\text{Conversión parcial por reacción (CO}_2\text{)} = 0.28$$

$$\text{Conversión parcial por reacción (ácido acrílico)} = 0.01$$

$$\text{Conversión parcial por reacción (ácido acético)} = 0.01$$

Multiplicando la conversión del reactivo limitante por cada una de las conversiones parciales podemos obtener los rendimientos de cada reacción:

$$\text{Rendimiento (n-butano)} = 59.5 \%$$

$$\text{Rendimiento (CO}_2\text{)} = 23.8 \%$$

$$\text{Rendimiento (ácido acrílico)} = 0.85 \%$$

$$\text{Rendimiento (ácido acético)} = 0.85 \%$$

Además, hemos utilizado 410 °C como la temperatura de la reacción (Cooley et al., 1988).

## Intercambio de calor 3

Intercambio de calor (I-203)				
kg/h	Entradas		Salidas	
	R-201	Agua	I-204	Agua
Temp. (°C)	410	213	260	213
Pres. (atm)	1,65	20	1,6	20
Fracción de vapor	1	0	1	1
nC <sub>4</sub>	189	---	189	---
N <sub>2</sub>	27936	---	27936	---
O <sub>2</sub>	5084	---	5084	---
AM	1270	---	1270	---
CO	290	---	290	---
CO <sub>2</sub>	491	---	491	---
H <sub>2</sub> O	1752	3365	1752	3365
Ácido maleico	---	---	---	---
Ácido fumárico	---	---	---	---
Ftalato de dibutilo	---	---	---	---
Ácido acético	11	---	11	---
Ácido acrílico	13	---	13	---
m (kg/h)	37037	3365	37037	3365
Q (m <sup>3</sup> /h)	43896	3,62	35325	341

Para la realización de este balance hemos utilizado los siguientes datos:

$$C_p (\text{R-201, } 410 \text{ }^\circ\text{C}) = 1.1650 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$$

$$C_p (\text{I-204, } 260 \text{ }^\circ\text{C}) = 1.1207 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$$

$$\lambda (\text{H}_2\text{O, } 20 \text{ atm}) = 1887 \text{ kJ/kg}$$

## Intercambio de calor 4

Intercambio de calor (I-204)				
kg/h	Entradas		Salidas	
	I-203	Agua	AB-201	Agua
Temp. (°C)	260	121	135	121
Pres. (atm)	1,6	2	1,56	2
Fracción de vapor	1	0	1	1
nC <sub>4</sub>	189	---	189	---
N <sub>2</sub>	27936	---	27936	---
O <sub>2</sub>	5084	---	5084	---
AM	1270	---	1270	---
CO	290	---	290	---
CO <sub>2</sub>	491	---	491	---
H <sub>2</sub> O	1752	2316	1752	2316
Ácido maleico	---	---	---	---
Ácido fumárico	---	---	---	---
Ftalato de dibutilo	---	---	---	---
Ácido acético	11	---	11	---
Ácido acrílico	13	---	13	---
m (kg/h)	37037	2316	37037	2316
Q (m <sup>3</sup> /h)	35325	2,40	27724	2046

Para la realización de este balance hemos utilizado los siguientes datos:

$$C_p (\text{I-203, } 260 \text{ }^\circ\text{C}) = 1.1207 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$$

$$C_p (\text{AB-201, } 135 \text{ }^\circ\text{C}) = 1.0891 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$$

$$\lambda (\text{H}_2\text{O, } 2 \text{ atm}) = 2209 \text{ kJ}/\text{kg}$$

## Intercambio de calor 10

Intercambio de calor (I-210)				
kg/h	Entradas		Salidas	
	Sales R-201	Agua	Sales I-211	Agua
Temp. (°C)	330	20	276.5	213
Pres. (atm)	31.5	20	30.5	20
Fracción de vapor	0	0	0	0
nC <sub>4</sub>	KNO <sub>3</sub> : 53000 kg/h NaNO <sub>2</sub> : 40000 kg/h NaNO <sub>3</sub> : 7000 kg/h	---	KNO <sub>3</sub> : 53000 kg/h NaNO <sub>2</sub> : 40000 kg/h NaNO <sub>3</sub> : 7000 kg/h	---
N <sub>2</sub>		---		---
O <sub>2</sub>		---		---
AM		---		---
CO		---		---
CO <sub>2</sub>		---		---
H <sub>2</sub> O		10000		10000
Ácido maleico		---		---
Ácido fumárico		---		---
Ftalato de dibutilo		---		---
Ácido acético		---		---
Ácido acrílico		---		---
m (kg/h)		100000		10000
Q (m <sup>3</sup> /h)	37	10	36	11

Para la realización de este balance hemos utilizado los siguientes datos:

$$C_p (\text{sales}, 275 \text{ °C}) = 1.56 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{°C})$$

$$C_p (\text{H}_2\text{O}, 116.5 \text{ °C}) = 4.2432 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{°C})$$

## Intercambio de calor 11

Intercambio de calor (I-211)				
kg/h	Entradas		Salidas	
	Sales I-210	Agua	Sales R-201	Agua
Temp. (°C)	276.5	20	231	144
Pres. (atm)	30.5	4	33	4
Fracción de vapor	0	0	0	0
nC <sub>4</sub>		---		---
N <sub>2</sub>		---		---
O <sub>2</sub>		---		---
AM	KNO <sub>3</sub> : 53000 kg/h	---	KNO <sub>3</sub> : 53000 kg/h	---
CO		---		---
CO <sub>2</sub>	NaNO <sub>2</sub> : 40000 kg/h	---	NaNO <sub>2</sub> : 40000 kg/h	---
H <sub>2</sub> O		13936		13936
Ácido maleico	NaNO <sub>3</sub> : 7000 kg/h	---	NaNO <sub>3</sub> : 7000 kg/h	---
Ácido fumárico		---		---
Ftalato de dibutilo		---		---
Ácido acético		---		---
Ácido acrílico		---		---
m (kg/h)	100000	13936	100000	13936
Q (m <sup>3</sup> /h)	36	14	36	15

Para la realización de este balance hemos utilizado los siguientes datos:

$$C_p (\text{sales, } 275 \text{ }^\circ\text{C}) = 1.56 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$$

$$C_p (\text{H}_2\text{O, } 82 \text{ }^\circ\text{C}) = 4.1979 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$$

## Absorción

Absorción (AB-201)				
kg/h	Entradas		Salidas	
	I-204	Disolvente	D-201	A incineración
Temp. (°C)	135	35	105	56
Pres. (atm)	1,54	1,54	1,5	1,5
Fracción de vapor	1	0	0	1
nC <sub>4</sub>	189	---	---	189
N <sub>2</sub>	27936	---	---	27936
O <sub>2</sub>	5084	---	---	5084
AM	1270	---	1262	8
CO	290	---	---	290
CO <sub>2</sub>	491	---	---	491
H <sub>2</sub> O	1752	---	11	1741
Ácido maleico	---	---	---	---
Ácido fumárico	---	---	---	---
Ftalato de dibutilo	---	16275	16275	---
Ácido acético	11	---	1	10
Ácido acrílico	13	---	7	6
m (kg/h)	37037	16275	17556	35757
Q (m <sup>3</sup> /h)	28084	16	17	22993

Para la realización de este balance hemos utilizado los siguientes datos de porcentajes en peso de recuperación de los distintos productos de reacción (White, 1978):

$$\frac{m_{sal,D-201}(AM)}{m_{ent,R-201}(AM)} = 99.4 \%$$

$$\frac{m_{sal,D-201}(H_2O)}{m_{ent,R-201}(H_2O)} = 0.6 \%$$

$$\frac{m_{sal,D-201}(\text{Ácido acético})}{m_{ent,R-201}(\text{Ácido acético})} = 10 \%$$

$$\frac{m_{sal,D-201}(\text{Ácido acrílico})}{m_{ent,R-201}(\text{Ácido acrílico})} = 53 \%$$

Además, los cálculos los hemos realizado sabiendo que en la corriente de interés, el 7.19 % es AM.

## Destilación a vacío

Destilación a vacío (D-201)				
kg/h	Entradas		Salidas	
	AB-201	D-203	D-202	I-205
Temp. (°C)	105	240	70	245
Pres. (atm)	1,45	1,3	0,065	0,115
Fración de vapor	0	0	0	0
nC <sub>4</sub>	---	---	---	---
N <sub>2</sub>	---	---	---	---
O <sub>2</sub>	---	---	---	---
AM	1262	1	1251	---
CO	---	---	---	---
CO <sub>2</sub>	---	---	---	---
H <sub>2</sub> O	11	---	8	---
Ácido maleico	---	---	---	---
Ácido fumárico	---	---	---	14
Ftalato de dibutilo	16275	67	67	16275
Ácido acético	1	---	1	---
Ácido acrílico	7	---	7	---
m (kg/h)	17556	68	1334	16289
Q (m <sup>3</sup> /h)	17	0,08	1,04	16

Para la realización de este balance hemos utilizado que en la corriente de salida de la columna a la sección de purificación, el contenido del disolvente, ftalato de dibutilo, es del 5 % (White, 1978).

También hemos supuesto que se consigue separar en la corriente de interés todo el AM, mientras que en la corriente formada mayoritariamente por el disolvente contiene una pequeña cantidad de ácido fumárico formado en la operación.



## Intercambio de calor 5

Intercambio de calor (I-205)				
kg/h	Entradas		Salidas	
	D-201	Agua	F-201	Agua
Temp. (°C)	230	20	30	112
Pres. (atm)	3	1,5	3	1,5
Fracción de vapor	0	0	0	1
nC <sub>4</sub>	---	---	---	---
N <sub>2</sub>	---	---	---	---
O <sub>2</sub>	---	---	---	---
AM	---	---	---	---
CO	---	---	---	---
CO <sub>2</sub>	---	---	---	---
H <sub>2</sub> O	---	2656	---	2656
Ácido maleico	---	---	---	---
Ácido fumárico	14	---	14	---
Ftalato de dibutilo	16275	---	16275	---
Ácido acético	---	---	---	---
Ácido acrílico	---	---	---	---
m (kg/h)	16289	2656	16289	2656
Q (m <sup>3</sup> /h)	19	2,67	16	3070

Para la realización de este balance hemos utilizado los siguientes datos:

$$C_p (\text{D-201}, 230 \text{ °C}) = 2.5538 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{°C})$$

$$C_p (\text{F-201}, 30 \text{ °C}) = 1.7171 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{°C})$$

$$C_p (\text{H}_2\text{O}, 66 \text{ °C}) = 4.1851 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{°C})$$

$$\lambda (\text{H}_2\text{O}, 1.5 \text{ atm}) = 2234 \text{ kJ}/\text{kg}$$

## Filtración

Filtración (F-201)			
kg/h	Entrada	Salidas	
	I-205	Ác. Fum.	AB-201
Temp. (°C)	30	35	35
Pres. (atm)	3	1,54	1,54
Fracción de vapor	0	0	0
nC <sub>4</sub>	---	---	---
N <sub>2</sub>	---	---	---
O <sub>2</sub>	---	---	---
AM	---	---	---
CO	---	---	---
CO <sub>2</sub>	---	---	---
H <sub>2</sub> O	---	---	---
Ácido maleico	---	---	---
Ácido fumárico	14	14	---
Ftalato de dibutilo	16275	---	16275
Ácido acético	---	---	---
Ácido acrílico	---	---	---
m (kg/h)	16289	14	16275
Q (m <sup>3</sup> /h)	16	0,01	16

Para la realización de este balance hemos supuesto que en el filtro se consigue la eliminación total del ácido fumárico del disolvente. A estas temperaturas el ácido fumárico se encuentra en estado sólido en forma de cristales, por lo que quedará retenido en el filtro, siendo la corriente de permeado el disolvente totalmente puro.

## Destilación 2

Destilación 2 (D-202)			
kg/h	Entrada	Salidas	
	D-201	Ligeros	D-203
Temp. (°C)	50	111	143
Pres. (atm)	1,45	1,41	1,41
Fracción de vapor	0	0	0
nC <sub>4</sub>	---	---	---
N <sub>2</sub>	---	---	---
O <sub>2</sub>	---	---	---
AM	1251	---	1251
CO	---	---	---
CO <sub>2</sub>	---	---	---
H <sub>2</sub> O	8	7	1
Ácido maleico	---	---	---
Ácido fumárico	---	---	---
Ftalato de dibutilo	67	---	67
Ácido acético	1	1	---
Ácido acrílico	7	5	2
m (kg/h)	1334	13	1321
Q (m <sup>3</sup> /h)	1,02	0,01	1,11

Para la realización de este balance hemos supuesto que el contenido en agua, ácido acético y ácido acrílico en la corriente de interés, es inferior al 0.1 % en peso, separándose el resto de estos compuestos en la corriente de ligeros.

## Destilación 3

Destilación 3 (D-203)			
kg/h	Entrada	Salidas	
	D-202	AM puro	D-201
Temp. (°C)	143	214	240
Pres. (atm)	1,4	1,36	1,36
Fracción de vapor	0	0	0
nC <sub>4</sub>	---	---	---
N <sub>2</sub>	---	---	---
O <sub>2</sub>	---	---	---
AM	1251	1250	1
CO	---	---	---
CO <sub>2</sub>	---	---	---
H <sub>2</sub> O	1	1	---
Ácido maleico	---	---	---
Ácido fumárico	---	---	---
Ftalato de dibutilo	67	---	67
Ácido acético	---	---	---
Ácido acrílico	2	2	---
m (kg/h)	1321	1253	68
Q (m <sup>3</sup> /h)	1,11	1,14	0,08

Para la realización de este balance hemos utilizado el dato de la pureza típica del AM que se suele conseguir por este procedimiento, del 99.8 % (Felthouse et al., 2001).

Además, la cantidad de AM producido debe ser de 1250 kg/h. De esta forma, multiplicando la cantidad horaria de AM producido por 24 horas que tiene cada día, obtenemos que la cantidad de AM producido diariamente será de 30000 kg/día. Con esta capacidad de producción diaria, en 334 días habremos alcanzado nuestro objetivo de producción anual de 10000 t/año quedando, por tanto, un mes al año en el que la producción de la planta estaría parada. Sería en este mes en el que se llevarían a cabo las tareas de revisión y mantenimiento de los equipos, limpieza de los mismos. etc. También, de esta forma tenemos en cuenta la posibilidad de tener que realizar paradas forzosas para la solución de incidencias o roturas en la planta, sin que por ello se deje de alcanzar la capacidad de producción anual que hemos fijado.

Una vez realizados anteriormente los balances de materia y energía a cada una de las unidades del proceso, mostramos ahora el balance de materia global. Este balance nos muestra de forma resumida algunos datos importantes para el dimensionamiento de los equipos y para el posterior estudio económico.

## ENTRADAS AL PROCESO

kg/h	Entradas		
	T-201	Aire	T-203
nC <sub>4</sub>	1263	---	---
N <sub>2</sub>	---	27936	---
O <sub>2</sub>	---	7495	---
AM	---	---	---
CO	---	---	---
CO <sub>2</sub>	---	11	---
H <sub>2</sub> O	---	333	---
Ácido maleico	---	---	---
Ácido fumárico	---	---	---
Ftalato de dibutilo	---	---	10
Ácido acético	---	---	---
Ácido acrílico	---	---	---
m (kg/h)	1263	35774	10
Q (m <sup>3</sup> /h)	2,18	30060	0,01

## SALIDAS DEL PROCESO

kg/h	Salidas				
	Gases de reacción	Ácido fumárico	T-205	T-206	T-207
nC <sub>4</sub>	189	---	---	---	---
N <sub>2</sub>	27936	---	---	---	---
O <sub>2</sub>	5084	---	---	---	---
AM	8	---	1250	---	---
CO	290	---	---	---	---
CO <sub>2</sub>	491	---	---	---	---
H <sub>2</sub> O	1741	---	1	7	---
Ácido maleico	---	---	---	---	---
Ácido fumárico	---	14	---	---	---
Ftalato de dibutilo	---	---	---	---	10
Ácido acético	10	---	---	1	---
Ácido acrílico	6	---	2	5	---
m (kg/h)	35757	14	1253	13	10
Q (m <sup>3</sup> /h)	22993	0,01	1,14	0,01	0,01

## 1.2. Diseño de equipos

- ABSORBEDOR

<b>Equipo:</b>	Absorbedor
<b>Referencia:</b>	AB-201
<b>Tipo:</b>	Columna de relleno
<b>Fase vapor:</b>	Mezcla de productos de la reacción
<b>Fase líquida:</b>	Ftalato de dibutilo
<b>Posición del equipo:</b>	Vertical

Es en este equipo donde se ponen en contacto el ftalato de dibutilo y la mezcla de productos, en estado gaseoso, que salió del reactor. El AM de la corriente gaseosa es absorbido por el disolvente, recuperando de esta forma prácticamente la totalidad del AM de la corriente.

A continuación calculamos, de forma aproximada, el diámetro y la altura de esta columna de absorción. Para ello disponemos de los siguientes datos de diseño:

Caudal del gas,  $G_o = 37037 \text{ kg/h} = 10.288 \text{ kg/s}$

Caudal del líquido,  $L_o = 16275 \text{ kg/h} = 4.521 \text{ kg/s}$

Si seleccionamos como relleno sillas cerámicas INTALLOX de tamaño 38 mm (1.5 pulgadas), tenemos un factor de relleno,  $F_p = 170 \text{ m}^{-1}$  (Sinnott, 2012).

Densidad del gas,  $\rho_g = 1.411 \text{ kg/m}^3$

Viscosidad del gas,  $\mu_g = 2.190 \cdot 10^{-5} \text{ N}\cdot\text{s/m}^2$

Densidad del líquido,  $\rho_L = 883.305 \text{ kg/m}^3$

Viscosidad del líquido,  $\mu_L = 1.859 \cdot 10^{-3} \text{ N}\cdot\text{s/m}^2$

Viscosidad del agua a 20 °C,  $\mu_{\text{agua},20^\circ\text{C}} = 1.033 \cdot 10^{-3} \text{ N}\cdot\text{s/m}^2$

Con todos estos datos, ya podemos proceder con el cálculo de los parámetros principales y dimensionamiento básico del equipo:

- Velocidad de inundación del gas:

La obtenemos a partir de la ecuación de Sawistowski,

$$\ln\left(\frac{G_{in}^2 \cdot F_p}{g \cdot \rho_L \cdot \rho_g} \cdot \left(\frac{\mu_L}{\mu_{\text{agua},20^\circ\text{C}}}\right)^{0.2}\right) = -4 \cdot \left(\frac{L_o}{G_o}\right)^{0.25} \cdot \left(\frac{\rho_g}{\rho_L}\right)^{0.125}$$

Mediante la resolución de esta ecuación por métodos numéricos, podemos obtener la velocidad de inundación del gas:

$$\ln\left(\frac{G_{in}^2 \cdot 170}{9.81 \cdot 883.305 \cdot 1.411} \cdot \left(\frac{1.859 \cdot 10^{-3}}{1.033 \cdot 10^{-3}}\right)^{0.2}\right) = -4 \cdot \left(\frac{16275}{37037}\right)^{0.25} \cdot \left(\frac{1.411}{883.305}\right)^{0.125};$$

$$G_{in} = 3.861 \frac{kg}{m^2 \cdot s}$$

- Diámetro de la columna:

Considerando que el caudal másico del gas debe ser un 60 % de la velocidad de inundación del gas, podemos calcular el diámetro de la columna despejando de la ecuación:

$$G_o = 0.60 \cdot G_{in} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D_c^2; D_c = \sqrt{\frac{4 \cdot G_o}{0.60 \cdot \pi \cdot G_{in}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 10.288}{0.60 \cdot \pi \cdot 3.861}} = 2.378 \text{ m}$$

Redondeamos a  $D = 2.40 \text{ m}$

- Altura de una unidad de transferencia:

Según la tabla de valores típicos dados para la HTU para rellenos aleatorios (Sinnott, 2012), poniéndonos siempre en el caso más desfavorable, vamos a considerar que la  $HTU = 0.75 \text{ m}$ .

- Número de etapas:

Si introducimos en el ChemCAD las variables y corrientes de proceso correspondientes y llevamos a cabo la simulación, obtenemos que necesitamos una columna de 14 etapas teóricas.

- Altura de la columna:

$$z = NET \cdot HTU = 14 \cdot 0.75 = 10.50 \text{ m}$$



- COLUMNAS DE DESTILACIÓN

<b>Equipo:</b>	Columna de destilación a vacío
<b>Referencia:</b>	D-201
<b>Tipo:</b>	Columna de platos
<b>Posición del equipo:</b>	Vertical

En esta columna se produce la desorción o separación del AM del disolvente, ftalato de dibutilo, mediante una destilación a vacío.

A continuación calculamos, de forma aproximada, el diámetro y la altura de esta columna de destilación. Para ello disponemos de los siguientes datos de diseño:

Espaciado entre platos,  $l_t = 0.5 \text{ m}$

Densidad del vapor,  $\rho_v = 0.576 \text{ kg/m}^3$

Densidad del líquido,  $\rho_L = 843.689 \text{ kg/m}^3$

Máximo caudal para el vapor,  $m_v = 85.283 \text{ kg/s}$

Con todos estos datos, ya podemos proceder con el cálculo de los parámetros principales y dimensionamiento básico del equipo:

- Velocidad máxima permitida para el vapor:

$$u_v = (-0.171 \cdot l_t^2 + 0.27 \cdot l_t - 0.047) \cdot \left( \frac{\rho_L - \rho_v}{\rho_v} \right);$$

$$u_v = (-0.171 \cdot 0.5^2 + 0.27 \cdot 0.5 - 0.047) \cdot \left( \frac{843.689 - 0.576}{0.576} \right) = 66.234 \text{ m/s}$$

- Diámetro de la columna:

$$D_c = \sqrt{\frac{4 \cdot m_v}{\pi \cdot \rho_v \cdot u_v}}; D_c = \sqrt{\frac{4 \cdot 85.283}{\pi \cdot 0.576 \cdot 66.234}} = 1.687 \text{ m}$$

Redondeamos a  $D_c = 1.70 \text{ m}$

- Número de platos teóricos:

Si introducimos en el ChemCAD las variables y corrientes de proceso correspondientes y llevamos a cabo la simulación, obtenemos que necesitamos una columna de 6 platos teóricos.

- Altura de la columna:

$$z = NPT \cdot l_t = 6 \cdot 0.5 = 3 \text{ m}$$

<b>Equipo:</b>	Columna de destilación 2
<b>Referencia:</b>	D-202
<b>Tipo:</b>	Columna de platos
<b>Posición del equipo:</b>	Vertical

En este equipo se lleva a cabo la separación y eliminación de los compuestos más ligeros que el AM de la corriente que sale de la columna de destilación 1.

A continuación calculamos, de forma aproximada, el diámetro y la altura de esta columna de destilación. Para ello disponemos de los siguientes datos de diseño:

Espaciado entre platos,  $l_t = 0.3 \text{ m}$

Densidad del vapor,  $\rho_v = 3.447 \text{ kg/m}^3$

Densidad del líquido,  $\rho_L = 1089.841 \text{ kg/m}^3$

Máximo caudal para el vapor,  $m_v = 22.233 \text{ kg/s}$

Con todos estos datos, ya podemos proceder con el cálculo de los parámetros principales y dimensionamiento básico del equipo:

- Velocidad máxima permitida para el vapor:

$$u_v = (-0.171 \cdot l_t^2 + 0.27 \cdot l_t - 0.047) \cdot \left( \frac{\rho_L - \rho_v}{\rho_v} \right);$$

$$u_v = (-0.171 \cdot 0.3^2 + 0.27 \cdot 0.3 - 0.047) \cdot \left( \frac{1089.841 - 3.447}{3.447} \right) = 5.865 \text{ m/s}$$

- Diámetro de la columna:

$$D_c = \sqrt{\frac{4 \cdot m_v}{\pi \cdot \rho_v \cdot u_v}}; D_c = \sqrt{\frac{4 \cdot 22.233}{\pi \cdot 3.447 \cdot 5.865}} = 1.183 \text{ m}$$

Redondeamos a  $D_c = 1.20 \text{ m}$

- Número de platos teóricos:

Si introducimos en el ChemCAD las variables y corrientes de proceso correspondientes y llevamos a cabo la simulación, obtenemos que necesitamos una columna de 10 platos teóricos.

- Altura de la columna:

$$z = NPT \cdot l_t = 10 \cdot 0.3 = 3 \text{ m}$$

<b>Equipo:</b>	Columna de destilación 3
<b>Referencia:</b>	D-203
<b>Tipo:</b>	Columna de platos
<b>Posición del equipo:</b>	Vertical

En este equipo se lleva a cabo la separación de nuestro producto de interés, el AM, de los restos de disolvente que pueda contener la corriente que sale de la columna de destilación 2, disolvente que se recirculará a la columna de destilación a vacío para separar totalmente el AM que pueda contener y que, posteriormente, será reaprovechado en la columna de absorción.

A continuación calculamos, de forma aproximada, el diámetro y la altura de esta columna de destilación. Para ello disponemos de los siguientes datos de diseño:

Espaciado entre platos,  $l_t = 0.3 \text{ m}$

Densidad del vapor,  $\rho_v = 3.414 \text{ kg/m}^3$

Densidad del líquido,  $\rho_L = 757.242 \text{ kg/m}^3$

Máximo caudal para el vapor,  $m_v = 22.017 \text{ kg/s}$

Con todos estos datos, ya podemos proceder con el cálculo de los parámetros principales y dimensionamiento básico del equipo:

- Velocidad máxima permitida para el vapor:

$$u_v = (-0.171 \cdot l_t^2 + 0.27 \cdot l_t - 0.047) \cdot \left( \frac{\rho_L - \rho_v}{\rho_v} \right);$$

$$u_v = (-0.171 \cdot 0.3^2 + 0.27 \cdot 0.3 - 0.047) \cdot \left( \frac{757.242 - 3.414}{3.414} \right) = 4.109 \text{ m/s}$$

- Diámetro de la columna:

$$D_c = \sqrt{\frac{4 \cdot m_v}{\pi \cdot \rho_v \cdot u_v}}; D_c = \sqrt{\frac{4 \cdot 22.017}{\pi \cdot 3.414 \cdot 4.109}} = 1.414 \text{ m}$$

Redondeamos a  $D_c = 1.50 \text{ m}$

- Número de platos teóricos:

Si introducimos en el ChemCAD las variables y corrientes de proceso correspondientes y llevamos a cabo la simulación, obtenemos que necesitamos una columna de 13 platos teóricos.

- Altura de la columna:

$$z = NPT \cdot l_t = 13 \cdot 0.3 = 3.90 \text{ m}$$

- FILTRO

<b>Equipo:</b>	Filtro
<b>Referencia:</b>	F-201
<b>Tipo:</b>	Filtro de tambor rotatorio a vacío
<b>Posición del equipo:</b>	Horizontal

En este equipo se produce la eliminación de los cristales de ácido fumárico que se hayan podido formar en la columna de destilación 1. En la planta dispondremos de dos filtros colocados en paralelo, de forma que no tengamos que interrumpir el proceso cada vez que se necesite realizar tareas de limpieza y mantenimiento en alguno de ellos. Así siempre estará uno de estos filtros en funcionamiento.

A continuación calculamos, de forma aproximada, tanto el área total del filtro como el diámetro y la longitud del tambor rotatorio. Para ello disponemos de los siguientes datos de diseño:

Densidad del sólido,  $\rho_s = 1296 \text{ kg/m}^3$

Densidad del filtrado,  $\rho_f = 1038 \text{ kg/m}^3$

Viscosidad,  $\mu = 0.01343 \text{ Pa}\cdot\text{s}$

Caída de presión en el filtro,  $\Delta P = 50 \text{ mmHg} = 6666.12 \text{ Pa}$

Fracción del tambor sumergida,  $f = 0.30$

Velocidad de giro del tambor,  $n = 0.1 \text{ rpm} = 0.00167 \text{ rev/s}$

Resistencia específica de la torta,  $\alpha = 10^{10} \text{ m/kg}$

Resistencia del medio filtrante,  $\beta = 0 \text{ m}^{-1}$  (la suponemos despreciable)

Caudal de alimentación al filtro,  $m_f = 16289 \text{ kg/h} = 4.525 \text{ kg/s}$

Caudal de sólidos en la alimentación,  $m_s = 14 \text{ kg/h} = 0.00389 \text{ kg/s}$

Con todos estos datos, ya podemos proceder con el cálculo de los parámetros principales y dimensionamiento básico del equipo:

- Caudal volumétrico de alimentación:

$$q_f = \frac{m_f}{\rho_f} = \frac{4.525}{1038} = 4.359 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^3 \text{ alimentación}}{\text{s}}$$

- Concentración de sólidos en la alimentación:

$$C_{s,f} = \frac{m_s}{q_f} = \frac{0.00389}{4.359 \cdot 10^{-3}} = 0.892 \frac{\text{kg sólidos}}{\text{m}^3 \text{ alimentación}}$$

- Masa de suspensión por cada metro cúbico alimentado:

$$m_{suspensión} = \left( V - \frac{C_{s,f}}{\rho_s} \right) \cdot \rho_f = \left( 1 - \frac{0.892}{1296} \right) \cdot 1038 = 1037.3 \frac{kg \text{ suspensión}}{m^3 \text{ alimentación}}$$

- Fracción de sólidos en la alimentación:

$$x = \frac{C_{s,f}}{C_{s,f} + m_{suspensión}} = \frac{0.892}{0.892 + 1037.3} = 0.000859$$

- Masa de sólidos depositados en el filtro por unidad de volumen filtrado:

$$S = \frac{x}{1-x} \cdot \rho_f = \frac{0.000859}{1-0.000859} \cdot 1038 = 0.892 \frac{kg \text{ sólidos}}{m^3 \text{ filtrado}}$$

- Área total del filtro:

$$A_T = \frac{m_s}{\alpha \sqrt{\frac{2 \cdot S \cdot \alpha \cdot \Delta P \cdot f \cdot n}{\mu} + (n \cdot \beta)^2 - n \cdot \beta}};$$

$$A_T = \frac{0.00389}{\sqrt{\frac{2 \cdot 0.892 \cdot 10^{10} \cdot 6666.12 \cdot 0.30 \cdot 0.00167}{0.01343} + (n \cdot \beta)^2 - n \cdot \beta}} = 18.4686 \text{ m}^2$$

- Diámetro del tambor rotatorio:

Tomando 1.5 como la razón de esbeltez, se halla el diámetro y la longitud del tambor rotatorio:

$$A_T = \pi \cdot D \cdot L = \pi \cdot D \cdot (1.5 \cdot D) = 1.5 \cdot \pi \cdot D^2$$

$$D = \sqrt{\frac{A_T}{1.5 \cdot \pi}} = \sqrt{\frac{18.4686}{1.5 \cdot \pi}} = 1.9797 \text{ m}$$

$$\frac{L}{D} = 1.5; L = 1.5 \cdot D = 1.5 \cdot 1.9797 = 2.9696 \text{ m}$$

- INTERCAMBIADORES DE CALOR

<b>Equipo:</b>	Intercambiador de calor 1
<b>Referencia:</b>	I-201
<b>Tipo:</b>	Serpentín
<b>Producto en el interior del serpentín:</b>	Vapor de agua
<b>Producto en el exterior del serpentín:</b>	<i>n</i> -butano

Este primer intercambiador de calor se utiliza para aumentar la temperatura del *n*-butano y favorecer así su vaporización. Como sistema de calefacción se ha optado por un serpentín interno, ya que éste posee una gran área de transferencia de calor.

El fluido calefactor será vapor de agua a baja presión, procedente de otras partes de la planta. De esta forma conseguimos aprovechar parte de la energía generada en el proceso, haciendo éste más rentable.

El *n*-butano, que llega al depósito a 20 °C y 4.5 atm de presión, inmediatamente se expandirá hasta una presión de 3.5 atm. Vamos a suponer, poniéndonos en el peor de los casos, que esta expansión es adiabática, por lo que el *n*-butano sufrirá un descenso de temperatura. Si la expansión fuese politrópica o isoterma, este descenso de temperatura sería más pequeño o nulo, luego si hacemos el diseño para la expansión adiabática, nos aseguramos de tener un dimensionamiento más que suficiente para el resto de los casos. Esta temperatura del *n*-butano tras la expansión adiabática la calculamos mediante la siguiente expresión:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} ; T_2 = T_1 \cdot \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} = 293.15 \cdot \left( \frac{3.5}{4.5} \right)^{\frac{1.15-1}{1.15}} = 283.7 \text{ K} = 10.5 \text{ °C}$$

Luego el serpentín deberá de elevar la temperatura del *n*-butano desde los 10.5 °C a los que según hemos calculado anteriormente se encuentra tras la expansión, hasta los 47 °C. A la presión a la que se encuentra el *n*-butano, 3.5 atm, se produce el cambio de estado a los 37.6 °C. Por consiguiente, el calor absorbido por el *n*-butano será calor sensible para pasar desde los 10.5 °C hasta los 37.6 °C, a esta temperatura se producirá el cambio de estado absorbiendo calor latente, y posteriormente aumentará su temperatura hasta los 47 °C absorbiendo nuevamente calor sensible. Para evaluar este calor absorbido, necesitaremos conocer los siguientes datos:

$$C_{p_{n-but,24.05^\circ C}} = 2.4289 \text{ kJ/(kg}\cdot^\circ\text{C)}$$

$$\lambda_{n-but,3.5atm} = 346.4 \text{ kJ/kg}$$

$$C_{p_{n-but,42.3^\circ C}} = 1.7734 \text{ kJ/(kg}\cdot^\circ\text{C)}$$

A continuación calculamos el calor absorbido por el *n*-butano mediante la siguiente expresión:

$$q_{n-but} = m_{n-but} \cdot C_{p_{n-but,24.05^\circ C}} \cdot (T_{vap} - T_i) + m_{n-but} \cdot \lambda_{n-but,3.5atm} + m_{n-but} \cdot C_{p_{n-but,42.3^\circ C}} \cdot (T_f - T_{vap})$$

$$q_{n-but} = 1263 \cdot 2.4289 \cdot (37.6 - 10.5) + 1263 \cdot 346.4 + 1263 \cdot 1.7734 \cdot (47 - 37.6) = 541692 \text{ kJ/h}$$

Por tanto, éste será el calor que deberá ser aportado por el serpentín para aumentar la temperatura del *n*-butano hasta los valores deseados. Para aportar este calor, como ya hemos mencionado, utilizaremos vapor de agua a baja presión procedente de alguna otra parte de la planta. A continuación calculamos la cantidad de vapor, a 3.5 atm de presión, que necesitaremos para conseguir ese aumento de temperatura:

$$\lambda_{\text{vapor},3.5\text{atm}} = 2154 \text{ kJ/kg}$$

$$q_{\text{abs},n-but} = q_{\text{ced},\text{vapor}} = m_{\text{vapor}} \cdot \lambda_{\text{vapor},3.5\text{atm}}; m_{\text{vapor}} = \frac{q_{\text{abs},n-but}}{\lambda_{\text{vapor},3.5\text{atm}}} = \frac{541692}{2154} = 251.48 \text{ kg/h}$$

Llegados a este punto, una vez calculadas las necesidades de vapor de calefacción, procedemos con el dimensionamiento del serpentín. Pero antes de abordarlo, mostramos los siguientes datos que necesitamos para el diseño del mismo:

Diámetro del tanque:  $D = 2.25 \text{ m}$  (calculado más adelante)

Diámetro externo del tubo del serpentín:  $D_{ts} = 25.4 \text{ mm}$

Factor de seguridad:  $F = 2$

Coefficiente global de transmisión del calor:  $U = 680 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{°C)}$

Para el coeficiente global de transmisión del calor hemos tomado un valor aproximado encontrado en la bibliografía (Perry, 2001). En el proyecto técnico calcularemos de forma más rigurosa este coeficiente.

Con todos estos datos, ya podemos proceder con el cálculo de los parámetros principales y dimensionamiento básico del serpentín:

- Incremento de temperatura medio logarítmico:

$$\Delta T_{ml} = \frac{(T_{i,\text{vapor}} - T_{i,n-but}) - (T_{s,\text{vapor}} - T_{s,n-but})}{\ln\left(\frac{T_{i,\text{vapor}} - T_{i,n-but}}{T_{s,\text{vapor}} - T_{s,n-but}}\right)} = \frac{(139 - 10.5) - (139 - 47)}{\ln\left(\frac{139 - 10.5}{139 - 47}\right)} = 109.2 \text{ °C}$$

- Área del serpentín:

$$q \cdot F = U \cdot A \cdot \Delta T_{ml}; A = \frac{q \cdot F}{U \cdot \Delta T_{ml}} = \frac{541692 \cdot 2}{680 \cdot 109.2} = 14.590 \text{ m}^2$$

- Longitud del serpentín:

$$A = \pi \cdot D_{ts} \cdot L_s; L_s = \frac{A}{\pi \cdot D_{ts}} = \frac{14.590}{\pi \cdot 0.0254} = 182.84 \text{ m}$$

- Diámetro de la espira:

Para el diseño, vamos a suponer que el diámetro de la espira va a ser el 75 % del diámetro del tanque. Según esta consideración, calculamos el diámetro de la espira como sigue:

$$D_e = 0.75 \cdot D = 0.75 \cdot 2.25 = 1.69 \text{ m}$$

- Longitud de cada espira:

$$L_e = \pi \cdot D_e = \pi \cdot 1.69 = 5.31 \text{ m}$$

- Número de espiras:

$$N_e = \frac{L_s}{L_e} = \frac{182.84}{5.31} = 34.43 \Rightarrow N_e = 35 \text{ espiras}$$

- Separación entre espiras:

Vamos a elegir que la separación entre espiras sea de 5 cm,  $S_e = 5 \text{ cm}$ .

- Altura total del serpentín:

$$H_s = N_e \cdot D_{ts} + (N_e - 1) \cdot S_e = 35 \cdot 0.0254 + (35 - 1) \cdot 0.05 = 2.59 \text{ m}$$



<b>Equipo:</b>	Intercambiador de calor 2
<b>Referencia:</b>	I-202
<b>Tipo:</b>	De carcasa y tubos
<b>Producto en el interior de los tubos:</b>	<i>n</i> -butano
<b>Producto en el exterior de los tubos:</b>	Vapor de agua
<b>Posición del equipo:</b>	Horizontal

La misión de este segundo intercambiador de calor no es más que recalentar el *n*-butano, en estado gaseoso, hasta la temperatura idónea (110 °C) para su mezcla con el aire previa a la entrada en el reactor principal.

En la siguiente tabla resumimos los datos más importantes sobre las corrientes de entrada y salida del intercambiador:

	<b>Entrada</b>	<b>Salida</b>
$m_{n-butano}$ (kg/h)	1263	1263
$T_{n-butano}$ (°C)	47	110
$m_{vapor}$ (kg/h)	72	72
$T_{vapor}$ (°C)	139	139

A continuación mostramos algunos datos que necesitamos para el diseño del equipo:

$$C_{p_{n-but,78.5^{\circ}C}} = 1.9417 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$$

$$\lambda_{vapor,3.5atm} = 2154 \text{ kJ}/\text{kg}$$

$$U = 680 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})$$

Para el coeficiente global de transmisión del calor hemos tomado un valor aproximado encontrado en la bibliografía (Perry, 2001). En el proyecto técnico calcularemos de forma más rigurosa este coeficiente.

Finalmente, mostramos algunos valores que fijamos como datos de partida para el diseño del equipo:

$$\text{Longitud de los tubos: } L_t = 2.4384 \text{ m}$$

$$\text{Diámetro externo de los tubos: } D_2 = 25.4 \text{ mm}$$

$$\text{Espesor de los tubos: } e_t = 2.413 \text{ mm}$$

$$\text{Diámetro interno de los tubos: } D_1 = 20.574 \text{ mm}$$

$$\text{Paso de tubo: } P_t = 1.25 \cdot D_2 = 1.25 \cdot 25.4 = 31.75 \text{ mm}$$

Separación de los tubos:  $P_t - D_2 = 31.75 - 25.4 = 6.35 \text{ mm}$

Espesor de la carcasa:  $e_c = 9.5 \text{ mm}$

Factor de seguridad:  $F = 2$

Con todos estos datos, ya podemos proceder con el cálculo de los parámetros principales y dimensionamiento básico del equipo:

- Calor intercambiado en el equipo:

$$q = m_{n-but} \cdot Cp_{n-but, 78.5^\circ C} \cdot (T_{f, n-but} - T_{i, n-but}) = 1263 \cdot 1.9417 \cdot (110 - 47) = 154499 \text{ kJ/h}$$

- Cantidad de vapor necesaria:

$$q = m_{vapor} \cdot \lambda_{vapor, 3.5atm}; m_{vapor} = \frac{q}{\lambda_{vapor, 3.5atm}} = \frac{154499}{2154} = 71.73 \text{ kg/h}$$

- Incremento de temperatura medio logarítmico:

$$\Delta T_{ml} = \frac{(T_{i,vapor} - T_{i,n-but}) - (T_{s,vapor} - T_{s,n-but})}{\ln\left(\frac{T_{i,vapor} - T_{i,n-but}}{T_{s,vapor} - T_{s,n-but}}\right)} = \frac{(139 - 47) - (139 - 110)}{\ln\left(\frac{139 - 47}{139 - 110}\right)} = 54.6 \text{ }^\circ\text{C}$$

- Área de intercambio de calor:

$$q \cdot F = U \cdot A \cdot \Delta T_{ml}; A = \frac{q \cdot F}{U \cdot \Delta T_{ml}} = \frac{154499 \cdot 2}{680 \cdot 54.6} = 8.323 \text{ m}^2$$

- Número de tubos:

$$A = \pi \cdot D_1 \cdot L \cdot N_t; N_t = \frac{A}{\pi \cdot D_1 \cdot L} = \frac{8.323}{\pi \cdot 0.020574 \cdot 2.4384} = 53 \text{ tubos}$$

- Diámetro interno de la carcasa:

$$D_{1c} = 0.637 \cdot \sqrt{\frac{CL}{CTP}} \cdot \sqrt{\frac{A \cdot \left(\frac{P_t}{D_2}\right)^2 \cdot D_2}{L}}$$

Donde en la ecuación anterior, las constantes son las siguientes (Kakaç & Liu):

Constante de disposición de los tubos,  $CL = 1.0$  (para una distribución cuadrada)

Constante del paso de los tubos,  $CTP = 0.93$  (para un sólo paso de tubo)

Sustituyendo los valores correspondientes en la ecuación anterior obtenemos:

$$D_{1c} = 0.637 \cdot \sqrt{\frac{1.0}{0.93}} \cdot \sqrt{\frac{8.323 \cdot \left(\frac{0.03175}{0.0254}\right)^2 \cdot 0.0254}{2.4384}} = 0.2431 \text{ m} = 243.1 \text{ mm}$$

- Diámetro externo de la carcasa:

$$D_{2c} = D_{1c} + 2 \cdot e_c = 0.2431 + 2 \cdot 0.0095 = 0.2621 \text{ m} = 262.1 \text{ mm}$$

- Dimensiones del equipo:

Ancho:  $D_{2c} = 0.2621 \text{ m}$

Largo:  $L + 0.1 \cdot L = 2.4384 + 0.1 \cdot 2.4384 = 2.6822 \text{ m}$

Superficie:  $S = D_{2c} \cdot (L + 0.1 \cdot L) = 0.2621 \cdot 2.6822 = 0.7030 \text{ m}^2$

Altura:  $H = D_{2c} = 0.2621 \text{ m}$

Redondeando los valores obtenidos, el equipo tendría el siguiente tamaño:

$D_{2c} = 0.30 \text{ m}$

$L = 2.75 \text{ m}$

$H = 0.30 \text{ m}$

$S = 0.825 \text{ m}^2$

<b>Equipo:</b>	Intercambiador de calor 3
<b>Referencia:</b>	I-203
<b>Tipo:</b>	De carcasa y tubos
<b>Producto en el interior de los tubos:</b>	Productos de la reacción
<b>Producto en el exterior de los tubos:</b>	Agua
<b>Posición del equipo:</b>	Horizontal

La función de este tercer intercambiador de calor no es más que enfriar la mezcla de productos de la reacción que salen del reactor principal, en estado gaseoso, para recuperar parte de la energía que posee esta corriente y obtener así un vapor de agua a alta presión.

En la siguiente tabla resumimos los datos más importantes sobre las corrientes de entrada y salida del intercambiador:

	<b>Entrada</b>	<b>Salida</b>
$m_{prod}$ (kg/h)	37037	37037
$T_{prod}$ (°C)	410	260
$m_{agua}$ (kg/h)	3365	3365
$T_{agua}$ (°C)	213	213

A continuación mostramos algunos datos que necesitamos para el diseño del equipo:

$$C_{p_{prod,335^{\circ}C}} = 1.1424 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$$

$$\lambda_{agua,20atm} = 1887 \text{ kJ}/\text{kg}$$

$$U = 250 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})$$

Para el coeficiente global de transmisión del calor hemos tomado un valor aproximado encontrado en la bibliografía (Perry, 2001). En el proyecto técnico calcularemos de forma más rigurosa este coeficiente.

Finalmente, mostramos algunos valores que fijamos como datos de partida para el diseño del equipo:

$$\text{Longitud de los tubos: } L_t = 4.8768 \text{ m}$$

$$\text{Diámetro externo de los tubos: } D_2 = 25.4 \text{ mm}$$

$$\text{Espesor de los tubos: } e_t = 2.413 \text{ mm}$$

$$\text{Diámetro interno de los tubos: } D_1 = 20.574 \text{ mm}$$

$$\text{Paso de tubo: } P_t = 1.25 \cdot D_2 = 1.25 \cdot 25.4 = 31.75 \text{ mm}$$

$$\text{Separación de los tubos: } P_t - D_2 = 31.75 - 25.4 = 6.35 \text{ mm}$$

$$\text{Espesor de la carcasa: } e_c = 9.5 \text{ mm}$$

$$\text{Factor de seguridad: } F = 2$$

Con todos estos datos, ya podemos proceder con el cálculo de los parámetros principales y dimensionamiento básico del equipo:

- Calor intercambiado en el equipo:

$$q = m_{\text{prod}} \cdot C_{p_{\text{prod},335^\circ\text{C}}} \cdot (T_{f,\text{prod}} - T_{i,\text{prod}}) = 37037 \cdot 1.1424 \cdot (410 - 260) = 6346660 \text{ kJ/h}$$

- Cantidad de agua necesaria:

$$q = m_{\text{agua}} \cdot \lambda_{\text{agua},20\text{atm}}; m_{\text{agua}} = \frac{q}{\lambda_{\text{agua},20\text{atm}}} = \frac{6346660}{1887} = 3363.36 \text{ kg/h}$$

- Incremento de temperatura medio logarítmico:

$$\Delta T_{ml} = \frac{(T_{i,\text{prod}} - T_{i,\text{agua}}) - (T_{s,\text{prod}} - T_{s,\text{agua}})}{\ln\left(\frac{T_{i,\text{prod}} - T_{i,\text{agua}}}{T_{s,\text{prod}} - T_{s,\text{agua}}}\right)} = \frac{(410 - 213) - (260 - 213)}{\ln\left(\frac{410 - 213}{260 - 213}\right)} = 104.7 \text{ }^\circ\text{C}$$

- Área de intercambio de calor:

$$q \cdot F = U \cdot A \cdot \Delta T_{ml}; A = \frac{q \cdot F}{U \cdot \Delta T_{ml}} = \frac{6346660 \cdot 2}{250 \cdot 104.7} = 484.941 \text{ m}^2$$

- Número de tubos:

$$A = \pi \cdot D_1 \cdot L \cdot N_t; N_t = \frac{A}{\pi \cdot D_1 \cdot L} = \frac{484.941}{\pi \cdot 0.020574 \cdot 4.8768} = 1539 \text{ tubos}$$

- Diámetro interno de la carcasa:

$$D_{1c} = 0.637 \cdot \sqrt{\frac{CL}{CTP}} \cdot \sqrt{\frac{A \cdot \left(\frac{P_t}{D_2}\right)^2 \cdot D_2}{L}}$$

Donde en la ecuación anterior, las constantes son las siguientes (Kakaç & Liu):

Constante de disposición de los tubos, CL = 1.0 (para una distribución cuadrada)

Constante del paso de los tubos, CTP = 0.93 (para un sólo paso de tubo)

Sustituyendo los valores correspondientes en la ecuación anterior obtenemos:

$$D_{1c} = 0.637 \cdot \sqrt{\frac{1.0}{0.93}} \cdot \sqrt{\frac{484.941 \cdot \left(\frac{0.03175}{0.0254}\right)^2 \cdot 0.0254}{4.8768}} = 1.3122 \text{ m}$$

- Diámetro externo de la carcasa:

$$D_{2c} = D_{1c} + 2 \cdot e_c = 1.3122 + 2 \cdot 0.0095 = 1.3312 \text{ m}$$

- Dimensiones del equipo:

$$\text{Ancho: } D_{2c} = 1.3312 \text{ m}$$

$$\text{Largo: } L + 0.1 \cdot L = 4.8768 + 0.1 \cdot 4.8768 = 5.3645 \text{ m}$$

$$\text{Superficie: } S = D_{2c} \cdot (L + 0.1 \cdot L) = 1.3312 \cdot 5.3645 = 7.1412 \text{ m}^2$$

$$\text{Altura: } H = D_{2c} = 1.3312 \text{ m}$$

Redondeando los valores obtenidos, el equipo tendría el siguiente tamaño:

$$D_{2c} = 1.40 \text{ m}$$

$$L = 5.50 \text{ m}$$

$$H = 1.40 \text{ m}$$

$$S = 7.70 \text{ m}^2$$

<b>Equipo:</b>	Intercambiador de calor 4
<b>Referencia:</b>	I-204
<b>Tipo:</b>	De carcasa y tubos
<b>Producto en el interior de los tubos:</b>	Productos de la reacción
<b>Producto en el exterior de los tubos:</b>	Agua
<b>Posición del equipo:</b>	Horizontal

El objetivo de este cuarto intercambiador de calor no es más que continuar enfriando la mezcla de productos de la reacción que salen del intercambiador de calor 3, en estado gaseoso, para recuperar parte de la energía que posee esta corriente y obtener así un vapor de agua a baja presión.

En la siguiente tabla resumimos los datos más importantes sobre las corrientes de entrada y salida del intercambiador:

	<b>Entrada</b>	<b>Salida</b>
$m_{prod} \text{ (kg/h)}$	37037	37037
$T_{prod} \text{ (}^\circ\text{C)}$	260	135
$m_{agua} \text{ (kg/h)}$	2316	2316
$T_{agua} \text{ (}^\circ\text{C)}$	121	121

A continuación mostramos algunos datos que necesitamos para el diseño del equipo:

$$C_{p_{prod,197.5^\circ\text{C}}} = 1.1040 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$$

$$\lambda_{agua,2atm} = 2209 \text{ kJ}/\text{kg}$$

$$U = 350 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})$$

Para el coeficiente global de transmisión del calor hemos tomado un valor aproximado encontrado en la bibliografía (Perry, 2001). En el proyecto técnico calcularemos de forma más rigurosa este coeficiente.

Finalmente, mostramos algunos valores que fijamos como datos de partida para el diseño del equipo:

$$\text{Longitud de los tubos: } L_t = 4.8768 \text{ m}$$

$$\text{Diámetro externo de los tubos: } D_2 = 25.4 \text{ mm}$$

$$\text{Espesor de los tubos: } e_t = 2.413 \text{ mm}$$

$$\text{Diámetro interno de los tubos: } D_1 = 20.574 \text{ mm}$$

$$\text{Paso de tubo: } P_t = 1.25 \cdot D_2 = 1.25 \cdot 25.4 = 31.75 \text{ mm}$$

$$\text{Separación de los tubos: } P_t - D_2 = 31.75 - 25.4 = 6.35 \text{ mm}$$

$$\text{Espesor de la carcasa: } e_c = 9.5 \text{ mm}$$

$$\text{Factor de seguridad: } F = 2$$

Con todos estos datos, ya podemos proceder con el cálculo de los parámetros principales y dimensionamiento básico del equipo:

- Calor intercambiado en el equipo:

$$q = m_{prod} \cdot C_{p_{prod, 197.5^\circ C}} \cdot (T_{f, prod} - T_{i, prod}) = 37037 \cdot 1.1040 \cdot (260 - 135) = 5111106 \text{ kJ/h}$$

- Cantidad de agua necesaria:

$$q = m_{agua} \cdot \lambda_{agua, 2atm}; m_{agua} = \frac{q}{\lambda_{agua, 2atm}} = \frac{5111106}{2209} = 2313.76 \text{ kg/h}$$

- Incremento de temperatura medio logarítmico:

$$\Delta T_{ml} = \frac{(T_{i, prod} - T_{i, agua}) - (T_{s, prod} - T_{s, agua})}{\ln\left(\frac{T_{i, prod} - T_{i, agua}}{T_{s, prod} - T_{s, agua}}\right)} = \frac{(260 - 121) - (135 - 121)}{\ln\left(\frac{260 - 121}{135 - 121}\right)} = 54.5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- Área de intercambio de calor:

$$q \cdot F = U \cdot A \cdot \Delta T_{ml}; A = \frac{q \cdot F}{U \cdot \Delta T_{ml}} = \frac{5111106 \cdot 2}{350 \cdot 54.5} = 535.896 \text{ m}^2$$

- Número de tubos:

$$A = \pi \cdot D_1 \cdot L \cdot N_t; N_t = \frac{A}{\pi \cdot D_1 \cdot L} = \frac{535.896}{\pi \cdot 0.020574 \cdot 4.8768} = 1701 \text{ tubos}$$

- Diámetro interno de la carcasa:

$$D_{1c} = 0.637 \cdot \sqrt{\frac{CL}{CTP}} \cdot \sqrt{\frac{A \cdot \left(\frac{P_t}{D_2}\right)^2 \cdot D_2}{L}}$$

Donde en la ecuación anterior, las constantes son las siguientes (Kakaç & Liu):

Constante de disposición de los tubos, CL = 1.0 (para una distribución cuadrada)

Constante del paso de los tubos, CTP = 0.93 (para un sólo paso de tubo)

Sustituyendo los valores correspondientes en la ecuación anterior obtenemos:

$$D_{1c} = 0.637 \cdot \sqrt{\frac{1.0}{0.93}} \cdot \sqrt{\frac{535.896 \cdot \left(\frac{0.03175}{0.0254}\right)^2 \cdot 0.0254}{4.8768}} = 1.3794 \text{ m}$$

- Diámetro externo de la carcasa:

$$D_{2c} = D_{1c} + 2 \cdot e_c = 1.3794 + 2 \cdot 0.0095 = 1.3984 \text{ m}$$



- Dimensiones del equipo:

$$\text{Ancho: } D_{2c} = 1.3984 \text{ m}$$

$$\text{Largo: } L + 0.1 \cdot L = 4.8768 + 0.1 \cdot 4.8768 = 5.3645 \text{ m}$$

$$\text{Superficie: } S = D_{2c} \cdot (L + 0.1 \cdot L) = 1.3984 \cdot 5.3645 = 7.5017 \text{ m}^2$$

$$\text{Altura: } H = D_{2c} = 1.3984 \text{ m}$$

Redondeando los valores obtenidos, el equipo tendría el siguiente tamaño:

$$D_{2c} = 1.40 \text{ m}$$

$$L = 5.50 \text{ m}$$

$$H = 1.40 \text{ m}$$

$$S = 7.70 \text{ m}^2$$

<b>Equipo:</b>	Intercambiador de calor 5
<b>Referencia:</b>	I-205
<b>Tipo:</b>	De carcasa y tubos
<b>Producto en el interior de los tubos:</b>	Ftalato de dibutilo
<b>Producto en el exterior de los tubos:</b>	Agua
<b>Posición del equipo:</b>	Horizontal

La función de este quinto intercambiador de calor no es más que enfriar el disolvente que sale de la columna de destilación a vacío, en estado líquido, para recuperar parte de la energía que posee esta corriente y obtener así un vapor de agua a baja presión.

En la siguiente tabla resumimos los datos más importantes sobre las corrientes de entrada y salida del intercambiador:

	<b>Entrada</b>	<b>Salida</b>
$m_{prod}$ (kg/h)	16289	16289
$T_{prod}$ (°C)	230	30
$m_{agua}$ (kg/h)	2656	2656
$T_{agua}$ (°C)	20	112

A continuación mostramos algunos datos que necesitamos para el diseño del equipo:

$$C_{p_{prod,130^{\circ}C}} = 2.0560 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$$

$$C_{p_{agua,66^{\circ}C}} = 4.1851 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$$

$$\lambda_{agua,1.5\text{atm}} = 2234 \text{ kJ}/\text{kg}$$

$$U = 300 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})$$

Para el coeficiente global de transmisión del calor hemos tomado un valor aproximado encontrado en la bibliografía (Perry, 2001). En el proyecto técnico calcularemos de forma más rigurosa este coeficiente.

Finalmente, mostramos algunos valores que fijamos como datos de partida para el diseño del equipo:

$$\text{Longitud de los tubos: } L_t = 6.0960 \text{ m}$$

$$\text{Diámetro externo de los tubos: } D_2 = 25.4 \text{ mm}$$

$$\text{Espesor de los tubos: } e_t = 2.413 \text{ mm}$$

Diámetro interno de los tubos:  $D_1 = 20.574 \text{ mm}$

Paso de tubo:  $P_t = 1.25 \cdot D_2 = 1.25 \cdot 25.4 = 31.75 \text{ mm}$

Separación de los tubos:  $P_t - D_2 = 31.75 - 25.4 = 6.35 \text{ mm}$

Espesor de la carcasa:  $e_c = 9.5 \text{ mm}$

Factor de seguridad:  $F = 2$

Con todos estos datos, ya podemos proceder con el cálculo de los parámetros principales y dimensionamiento básico del equipo:

- Calor intercambiado en el equipo:

$$q = m_{\text{prod}} \cdot C_{p_{\text{prod},130^\circ\text{C}}} \cdot (T_{f,\text{prod}} - T_{i,\text{prod}}) = 16289 \cdot 2.0560 \cdot (230 - 30) = 6698036.8 \text{ kJ/h}$$

- Cantidad de agua necesaria:

$$q = m_{\text{agua}} \cdot C_{p_{\text{agua},66^\circ\text{C}}} \cdot (T_{f,\text{agua}} - T_{i,\text{agua}}) + m_{\text{agua}} \cdot \lambda_{\text{agua},1.5\text{atm}} ;$$

$$m_{\text{agua}} = \frac{q}{C_{p_{\text{agua},66^\circ\text{C}}} \cdot (T_{f,\text{agua}} - T_{i,\text{agua}}) + \lambda_{\text{agua},1.5\text{atm}}} = \frac{6698036.8}{4.1851 \cdot (112 - 20) + 2234} = 2557.45 \text{ kg/h}$$

- Incremento de temperatura medio logarítmico:

$$\Delta T_{ml} = \frac{(T_{i,\text{prod}} - T_{s,\text{agua}}) - (T_{s,\text{prod}} - T_{i,\text{agua}})}{\ln\left(\frac{T_{i,\text{prod}} - T_{s,\text{agua}}}{T_{s,\text{prod}} - T_{i,\text{agua}}}\right)} = \frac{(230 - 112) - (30 - 20)}{\ln\left(\frac{230 - 112}{30 - 20}\right)} = 43.8 \text{ }^\circ\text{C}$$

- Área de intercambio de calor:

$$q \cdot F = U \cdot A \cdot \Delta T_{ml} ; A = \frac{q \cdot F}{U \cdot \Delta T_{ml}} = \frac{6698036.8 \cdot 2}{300 \cdot 43.8} = 1019.488 \text{ m}^2$$

- Número de tubos:

$$A = \pi \cdot D_1 \cdot L \cdot N_t ; N_t = \frac{A}{\pi \cdot D_1 \cdot L} = \frac{1019.488}{\pi \cdot 0.020574 \cdot 6.0960} = 2588 \text{ tubos}$$

- Diámetro interno de la carcasa:

$$D_{1c} = 0.637 \cdot \sqrt{\frac{CL}{CTP}} \cdot \sqrt{\frac{A \cdot \left(\frac{P_t}{D_2}\right)^2 \cdot D_2}{L}}$$

Donde en la ecuación anterior, las constantes son las siguientes (Kakaç & Liu):

Constante de disposición de los tubos,  $CL = 1.0$  (para una distribución cuadrada)

Constante del paso de los tubos,  $CTP = 0.93$  (para un sólo paso de tubo)

Sustituyendo los valores correspondientes en la ecuación anterior obtenemos:

$$D_{1c} = 0.637 \cdot \sqrt{\frac{1.0}{0.93}} \cdot \sqrt{\frac{1019.488 \cdot \left(\frac{0.03175}{0.0254}\right)^2 \cdot 0.0254}{6.0960}} = 1.7017 \text{ m}$$

- Diámetro externo de la carcasa:

$$D_{2c} = D_{1c} + 2 \cdot e_c = 1.7017 + 2 \cdot 0.0095 = 1.7207 \text{ m}$$

- Dimensiones del equipo:

Ancho:  $D_{2c} = 1.7207 \text{ m}$

Largo:  $L + 0.1 \cdot L = 6.0960 + 0.1 \cdot 6.0960 = 6.7056 \text{ m}$

Superficie:  $S = D_{2c} \cdot (L + 0.1 \cdot L) = 1.7207 \cdot 6.7056 = 11.5383 \text{ m}^2$

Altura:  $H = D_{2c} = 1.7207 \text{ m}$

Redondeando los valores obtenidos, el equipo tendría el siguiente tamaño:

$$D_{2c} = 1.75 \text{ m}$$

$$L = 6.75 \text{ m}$$

$$H = 1.75 \text{ m}$$

$$S = 11.81 \text{ m}^2$$

<b>Equipo:</b>	Intercambiador de calor 10
<b>Referencia:</b>	I-210
<b>Tipo:</b>	De carcasa y tubos
<b>Producto en el interior de los tubos:</b>	Mezcla de sales fundidas
<b>Producto en el exterior de los tubos:</b>	Agua
<b>Posición del equipo:</b>	Horizontal

Este intercambiador de calor cumple una doble misión. En primer lugar nos permite precalentar el agua que llega a la planta a temperatura ambiente, a unos 20 °C, hasta la temperatura de saturación a la presión correspondiente, 20 atm (alta presión). Además, este equipo nos permite enfriar el fluido refrigerante del reactor principal, una mezcla eutéctica de sales fundidas, por lo que este fluido puede estar continuamente recirculándose al reactor.

En la siguiente tabla resumimos los datos más importantes sobre las corrientes de entrada y salida del intercambiador:

	<b>Entrada</b>	<b>Salida</b>
$m_{sales} \text{ (kg/h)}$	100000	100000
$T_{sales} \text{ (°C)}$	330	277.5
$m_{agua} \text{ (kg/h)}$	10000	10000
$T_{agua} \text{ (°C)}$	20	213

A continuación mostramos algunos datos que necesitamos para el diseño del equipo:

$$C_{p_{sales,275^\circ\text{C}}} = 1.56 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{°C)}$$

$$C_{p_{agua,116.5^\circ\text{C}}} = 4.2432 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{°C)}$$

$$U = 900 \text{ W/(m}^2\cdot\text{°C)}$$

Para el coeficiente global de transmisión del calor hemos tomado un valor aproximado encontrado en la bibliografía (Perry, 2001). En el proyecto técnico calcularemos de forma más rigurosa este coeficiente.

Finalmente, mostramos algunos valores que fijamos como datos de partida para el diseño del equipo:

$$\text{Longitud de los tubos: } L_t = 3.6576 \text{ m}$$

$$\text{Diámetro externo de los tubos: } D_2 = 25.4 \text{ mm}$$

$$\text{Espesor de los tubos: } e_t = 2.413 \text{ mm}$$

Diámetro interno de los tubos:  $D_1 = 20.574 \text{ mm}$

Paso de tubo:  $P_t = 1.25 \cdot D_2 = 1.25 \cdot 25.4 = 31.75 \text{ mm}$

Separación de los tubos:  $P_t - D_2 = 31.75 - 25.4 = 6.35 \text{ mm}$

Espesor de la carcasa:  $e_c = 9.5 \text{ mm}$

Factor de seguridad:  $F = 2$

Con todos estos datos, ya podemos proceder con el cálculo de los parámetros principales y dimensionamiento básico del equipo:

- Calor intercambiado en el equipo:

$$q = m_{\text{agua}} \cdot C_{p_{\text{agua},116.5^\circ\text{C}}} \cdot (T_{f,\text{agua}} - T_{i,\text{agua}}) = 10000 \cdot 4.2432 \cdot (213 - 20) = 8189376 \text{ kJ/h}$$

- Temperatura de salida de las sales:

$$q = m_{\text{sales}} \cdot C_{p_{\text{sales},275^\circ\text{C}}} \cdot (T_{i,\text{sales}} - T_{f,\text{sales}});$$

$$T_{f,\text{sales}} = T_{i,\text{sales}} - \frac{q}{m_{\text{sales}} \cdot C_{p_{\text{sales},275^\circ\text{C}}}} = 330 - \frac{8189376}{100000 \cdot 1.56} = 277.5 \text{ }^\circ\text{C}$$

- Incremento de temperatura medio logarítmico:

$$\Delta T_{ml} = \frac{(T_{i,\text{sales}} - T_{i,\text{agua}}) - (T_{s,\text{sales}} - T_{s,\text{agua}})}{\ln\left(\frac{T_{i,\text{sales}} - T_{i,\text{agua}}}{T_{s,\text{sales}} - T_{s,\text{agua}}}\right)} = \frac{(330 - 20) - (277.5 - 213)}{\ln\left(\frac{330 - 20}{277.5 - 213}\right)} = 156.4 \text{ }^\circ\text{C}$$

- Área de intercambio de calor:

$$q \cdot F = U \cdot A \cdot \Delta T_{ml}; A = \frac{q \cdot F}{U \cdot \Delta T_{ml}} = \frac{8189376 \cdot 2}{900 \cdot 156.4} = 116.359 \text{ m}^2$$

- Número de tubos:

$$A = \pi \cdot D_1 \cdot L \cdot N_t; N_t = \frac{A}{\pi \cdot D_1 \cdot L} = \frac{116.359}{\pi \cdot 0.020574 \cdot 3.6576} = 493 \text{ tubos}$$

- Diámetro interno de la carcasa:

$$D_{1c} = 0.637 \cdot \sqrt{\frac{CL}{CTP}} \cdot \sqrt{\frac{A \cdot \left(\frac{P_t}{D_2}\right)^2 \cdot D_2}{L}}$$

Donde en la ecuación anterior, las constantes son las siguientes (Kakaç & Liu):

Constante de disposición de los tubos,  $CL = 1.0$  (para una distribución cuadrada)

Constante del paso de los tubos,  $CTP = 0.93$  (para un sólo paso de tubo)

Sustituyendo los valores correspondientes en la ecuación anterior obtenemos:

$$D_{1c} = 0.637 \cdot \sqrt{\frac{1.0}{0.93}} \cdot \sqrt{\frac{116.359 \cdot \left(\frac{0.03175}{0.0254}\right)^2 \cdot 0.0254}{3.6576}} = 0.7422 \text{ m}$$

- Diámetro externo de la carcasa:

$$D_{2c} = D_{1c} + 2 \cdot e_c = 0.7422 + 2 \cdot 0.0095 = 0.7612 \text{ m}$$

- Dimensiones del equipo:

$$\text{Ancho: } D_{2c} = 0.7612 \text{ m}$$

$$\text{Largo: } L + 0.1 \cdot L = 3.6576 + 0.1 \cdot 3.6576 = 4.0234 \text{ m}$$

$$\text{Superficie: } S = D_{2c} \cdot (L + 0.1 \cdot L) = 0.7612 \cdot 4.0234 = 3.0626 \text{ m}^2$$

$$\text{Altura: } H = D_{2c} = 0.7612 \text{ m}$$

Redondeando los valores obtenidos, el equipo tendría el siguiente tamaño:

$$D_{2c} = 0.80 \text{ m}$$

$$L = 4 \text{ m}$$

$$H = 0.80 \text{ m}$$

$$S = 3.20 \text{ m}^2$$

<b>Equipo:</b>	Intercambiador de calor 11
<b>Referencia:</b>	I-211
<b>Tipo:</b>	De carcasa y tubos
<b>Producto en el interior de los tubos:</b>	Mezcla de sales fundidas
<b>Producto en el exterior de los tubos:</b>	Agua
<b>Posición del equipo:</b>	Horizontal

Este segundo intercambiador de calor también cumple una doble misión. En primer lugar nos permite precalentar el agua que llega a la planta a temperatura ambiente, a unos 20 °C, hasta la temperatura de saturación a la presión correspondiente, 4 atm (baja presión). Además, este equipo nos permite enfriar el fluido refrigerante del reactor principal, una mezcla eutéctica de sales fundidas, por lo que este fluido puede estar continuamente recirculándose al reactor.

En la siguiente tabla resumimos los datos más importantes sobre las corrientes de entrada y salida del intercambiador:

	<b>Entrada</b>	<b>Salida</b>
$m_{sales} \text{ (kg/h)}$	100000	100000
$T_{sales} \text{ (°C)}$	277.5	231
$m_{agua} \text{ (kg/h)}$	13936	13936
$T_{agua} \text{ (°C)}$	20	144

A continuación mostramos algunos datos que necesitamos para el diseño del equipo:

$$C_{p_{sales,275^\circ\text{C}}} = 1.56 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{°C)}$$

$$C_{p_{agua,82^\circ\text{C}}} = 4.1979 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{°C)}$$

$$U = 900 \text{ W/(m}^2\cdot\text{°C)}$$

Para el coeficiente global de transmisión del calor hemos tomado un valor aproximado encontrado en la bibliografía (Perry, 2001). En el proyecto técnico calcularemos de forma más rigurosa este coeficiente.

Finalmente, mostramos algunos valores que fijamos como datos de partida para el diseño del equipo:

$$\text{Longitud de los tubos: } L_t = 3.6576 \text{ m}$$

$$\text{Diámetro externo de los tubos: } D_2 = 25.4 \text{ mm}$$

$$\text{Espesor de los tubos: } e_t = 2.413 \text{ mm}$$



Diámetro interno de los tubos:  $D_1 = 20.574 \text{ mm}$

Paso de tubo:  $P_t = 1.25 \cdot D_2 = 1.25 \cdot 25.4 = 31.75 \text{ mm}$

Separación de los tubos:  $P_t - D_2 = 31.75 - 25.4 = 6.35 \text{ mm}$

Espesor de la carcasa:  $e_c = 9.5 \text{ mm}$

Factor de seguridad:  $F = 2$

Con todos estos datos, ya podemos proceder con el cálculo de los parámetros principales y dimensionamiento básico del equipo:

- Calor intercambiado en el equipo:

$$q = m_{sales} \cdot Cp_{sales,275^\circ C} \cdot (T_{i,sales} - T_{f,sales}) = 100000 \cdot 1.56 \cdot (277.5 - 231) = 7254000 \text{ kJ/h}$$

- Cantidad de agua necesaria:

$$q = m_{agua} \cdot Cp_{agua,82^\circ C} \cdot (T_{f,agua} - T_{i,agua});$$

$$m_{agua} = \frac{q}{Cp_{agua,82^\circ C} \cdot (T_{f,agua} - T_{i,agua})} = \frac{7254000}{4.1979 \cdot (144 - 20)} = 13935.54 \text{ kg/h}$$

- Incremento de temperatura medio logarítmico:

$$\Delta T_{ml} = \frac{(T_{i,sales} - T_{i,agua}) - (T_{s,sales} - T_{s,agua})}{\ln\left(\frac{T_{i,sales} - T_{i,agua}}{T_{s,sales} - T_{s,agua}}\right)} = \frac{(277.5 - 20) - (231 - 144)}{\ln\left(\frac{277.4 - 20}{231 - 144}\right)} = 157.2 \text{ }^\circ\text{C}$$

- Área de intercambio de calor:

$$q \cdot F = U \cdot A \cdot \Delta T_{ml}; A = \frac{q \cdot F}{U \cdot \Delta T_{ml}} = \frac{7254000 \cdot 2}{900 \cdot 157.2} = 102.545 \text{ m}^2$$

- Número de tubos:

$$A = \pi \cdot D_1 \cdot L \cdot N_t; N_t = \frac{A}{\pi \cdot D_1 \cdot L} = \frac{102.545}{\pi \cdot 0.020574 \cdot 3.6576} = 434 \text{ tubos}$$

- Diámetro interno de la carcasa:

$$D_{1c} = 0.637 \cdot \sqrt{\frac{CL}{CTP}} \cdot \sqrt{\frac{A \cdot \left(\frac{P_t}{D_2}\right)^2 \cdot D_2}{L}}$$

Donde en la ecuación anterior, las constantes son las siguientes (Kakaç & Liu):

Constante de disposición de los tubos,  $CL = 1.0$  (para una distribución cuadrada)

Constante del paso de los tubos,  $CTP = 0.93$  (para un sólo paso de tubo)

Sustituyendo los valores correspondientes en la ecuación anterior obtenemos:

$$D_{1c} = 0.637 \cdot \sqrt{\frac{1.0}{0.93}} \cdot \sqrt{\frac{102.545 \cdot \left(\frac{0.03175}{0.0254}\right)^2 \cdot 0.0254}{3.6576}} = 0.6968 \text{ m}$$

- Diámetro externo de la carcasa:

$$D_{2c} = D_{1c} + 2 \cdot e_c = 0.6968 + 2 \cdot 0.0095 = 0.7158 \text{ m}$$

- Dimensiones del equipo:

$$\text{Ancho: } D_{2c} = 0.7158 \text{ m}$$

$$\text{Largo: } L + 0.1 \cdot L = 3.6576 + 0.1 \cdot 3.6576 = 4.0234 \text{ m}$$

$$\text{Superficie: } S = D_{2c} \cdot (L + 0.1 \cdot L) = 0.7158 \cdot 4.0234 = 2.8799 \text{ m}^2$$

$$\text{Altura: } H = D_{2c} = 0.7158 \text{ m}$$

Redondeando los valores obtenidos, el equipo tendría el siguiente tamaño:

$$D_{2c} = 0.75 \text{ m}$$

$$L = 4 \text{ m}$$

$$H = 0.75 \text{ m}$$

$$S = 3 \text{ m}^2$$

- REACTOR

<b>Equipo:</b>	Reactor
<b>Referencia:</b>	R-201
<b>Tipo:</b>	Reactor tubular de lecho fijo
<b>Producto en el interior de los tubos:</b>	Mezcla homogénea de <i>n</i> -butano y aire
<b>Producto en el exterior de los tubos:</b>	Mezcla eutéctica de sales nítricas fundidas
<b>Posición del equipo:</b>	Vertical

En el reactor es donde se va a llevar a cabo la reacción entre el aire y el *n*-butano, en presencia de un catalizador, para producir AM entre otros subproductos.

En la siguiente tabla resumimos los datos más importantes sobre las corrientes de entrada y salida del reactor:

	<b>Entrada</b>	<b>Salida</b>
$m_{prod}$ (kg/h)	37037	37037
$T_{prod}$ (°C)	120	410
$m_{sales}$ (kg/h)	100000	100000
$T_{sales}$ (°C)	231	330

A continuación mostramos algunos datos que necesitamos para el diseño del equipo:

$$C_{p_{prod,265^{\circ}C}} = 1.1221 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$$

$$C_{p_{sales,275^{\circ}C}} = 1.56 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$$

$$U = 1000 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})$$

Para el coeficiente global de transmisión del calor hemos tomado un valor aproximado encontrado en la bibliografía (Perry, 2001). En el proyecto técnico calcularemos de forma más rigurosa este coeficiente.

Finalmente, mostramos algunos valores que fijamos como datos de partida para el diseño del equipo:

$$\text{Longitud de los tubos: } L_t = 3.6576 \text{ m}$$

$$\text{Diámetro externo de los tubos: } D_2 = 25.4 \text{ mm}$$

$$\text{Espesor de los tubos: } e_t = 2.413 \text{ mm}$$

$$\text{Diámetro interno de los tubos: } D_1 = 20.574 \text{ mm}$$

$$\text{Paso de tubo: } P_t = 2 \cdot D_2 = 2 \cdot 25.4 = 50.8 \text{ mm}$$

Separación de los tubos:  $P_t - D_2 = 50.8 - 25.4 = 25.4 \text{ mm}$

Espesor de la carcasa:  $e_c = 9.5 \text{ mm}$

Tiempo de residencia:  $\tau = 0.1 \text{ s}$

Caudal volumétrico de producto a la entrada del reactor:  $q_{ent} = 20523 \text{ m}^3/\text{h}$

Porosidad del catalizador:  $\varepsilon_c = 0.15$

Con todos estos datos, ya podemos proceder con el cálculo de los parámetros principales y dimensionamiento básico del equipo:

- Volumen libre de reactor:

$$\tau = \frac{V_l}{q_{ent}}; V_l = q_{ent} \cdot \tau = \frac{20523}{3600} \cdot 0.1 = 0.57 \text{ m}^3$$

- Volumen real de reactor (teniendo en cuenta el lecho fijo de catalizador):

$$\varepsilon_c = \frac{V_l}{V_r}; V_r = \frac{V_l}{\varepsilon_c} = \frac{0.57}{0.15} = 3.8 \text{ m}^3$$

- Número de tubos:

$$V_r = \frac{\pi}{4} \cdot D_1^2 \cdot L \cdot N_t; N_t = \frac{V_r}{\frac{\pi}{4} \cdot D_1^2 \cdot L} = \frac{3.8}{\frac{\pi}{4} \cdot 0.020574^2 \cdot 3.6576} = 3125 \text{ tubos}$$

- Área de intercambio de calor en el reactor:

$$A = \pi \cdot D_1 \cdot L \cdot N_t; A = \pi \cdot 0.020574 \cdot 3.6576 \cdot 3125 = 738.780 \text{ m}^2$$

- Diámetro interno de la carcasa del reactor:

$$D_{1c} = 0.637 \cdot \sqrt{\frac{CL}{CTP}} \cdot \sqrt{\frac{A \cdot \left(\frac{P_t}{D_2}\right)^2 \cdot D_2}{L}}$$

Donde en la ecuación anterior, las constantes son las siguientes (Kakaç & Liu):

Constante de disposición de los tubos,  $CL = 1.0$  (para una distribución cuadrada)

Constante del paso de los tubos,  $CTP = 0.93$  (para un sólo paso de tubo)

Sustituyendo los valores correspondientes en la ecuación anterior obtenemos:

$$D_{1c} = 0.637 \cdot \sqrt{\frac{1.0}{0.93}} \cdot \sqrt{\frac{738.780 \cdot \left(\frac{0.0508}{0.0254}\right)^2 \cdot 0.0254}{3.6576}} = 2.9923 \text{ m}$$

- Diámetro externo de la carcasa del reactor:

$$D_{2c} = D_{1c} + 2 \cdot e_c = 2.9923 + 2 \cdot 0.0095 = 3.0113 \text{ m}$$

- Altura del reactor:

$$H = L + 0.1 \cdot L; H = 3.6576 + 0.1 \cdot 3.6576 = 4.0234 \text{ m}$$

- Razón de esbeltez del reactor:

$$R_{H/D} = \frac{H}{D_{2c}} = \frac{4.0234}{3.0113} = 1.333$$

- Calor intercambiado en el reactor:

$$q = \frac{m_{n-but}}{Mm_{n-but}} \cdot (\eta_1 \cdot \Delta H_1 + \eta_2 \cdot \Delta H_2 + \eta_3 \cdot \Delta H_3 + \eta_4 \cdot \Delta H_4) - m_{prod} \cdot Cp_{prod,265^\circ C} \cdot (T_f - T_i);$$

$$q = \frac{1263}{0.058} \cdot (0.595 \cdot 1240 + 0.238 \cdot 2091.5 + 0.0085 \cdot 1329.5 + 0.0085 \cdot 1819.5) - 37037 \cdot 1.1221 \cdot (410 - 120);$$

$$q = 15436445 \text{ kJ/h}$$

- Temperatura de entrada del fluido refrigerante:

$$q = m_{sales} \cdot Cp_{sales,275^\circ C} \cdot (T_{f,sales} - T_{i,sales});$$

$$T_{i,sales} = T_{f,sales} - \frac{q}{m_{sales} \cdot Cp_{sales,275^\circ C}} = 330 - \frac{15436445}{100000 \cdot 1.56} = 231 \text{ }^\circ C$$

- Diseño del sistema de agitación:

Continuamos ahora nuestro diseño del reactor calculando el sistema de agitación del medio refrigerante, la mezcla de sales fundidas. Para ello necesitamos conocer algunos datos referentes a las propiedades de dicha mezcla a la temperatura más baja de trabajo del sistema, ya que estas condiciones siempre serán las más desfavorables para la agitación. Dichas propiedades las mostramos a continuación:

$$\rho_{sales,231^\circ C} = 2790 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu_{sales,231^\circ C} = 1.940 \cdot 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$$

Dada la razón de esbeltez del reactor, inferior a 1.5, sólo se necesita un rotor para el agitador.

Como la mezcla reaccionante tiene una viscosidad muy baja, inferior a 0.5 Pa·s, como rotor del agitador utilizaremos una turbina de paletas planas de diámetro de rotor:

$$D_a = 0.50 \cdot D_{1c} = 0.50 \cdot 3 = 1.50 \text{ m}$$

También calculamos la anchura de la paleta de agitación como:

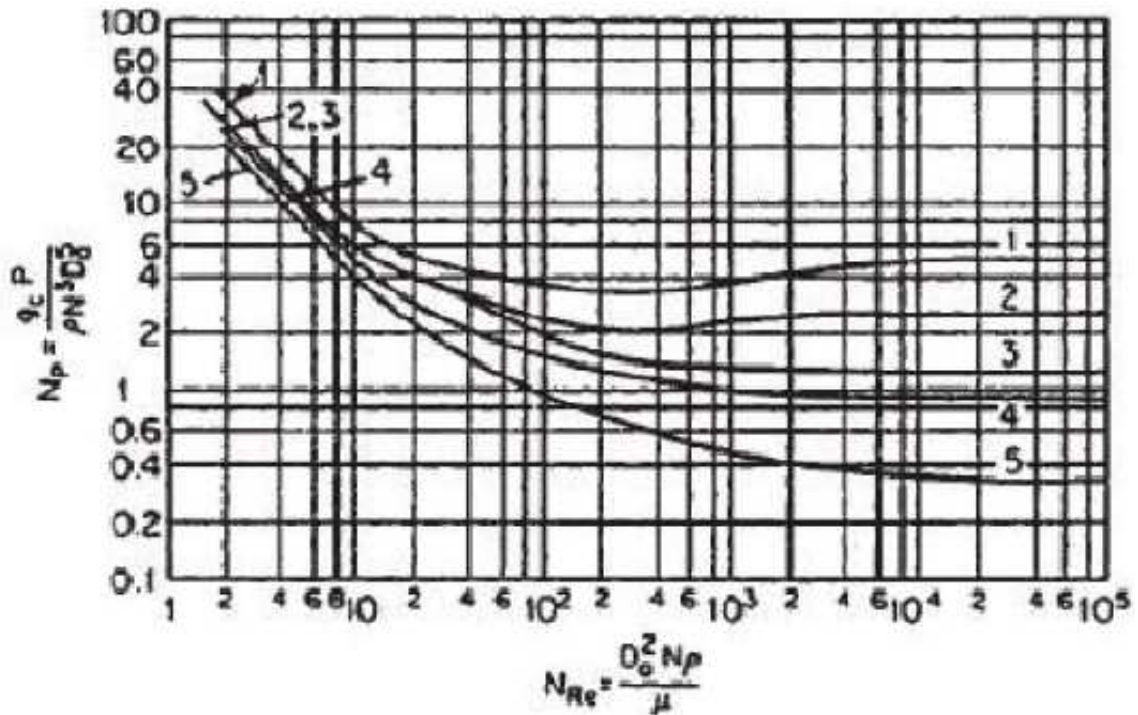
$$W = \frac{D_a}{5} = \frac{1.50}{5} = 0.30 \text{ m}$$

Conocido el diámetro del agitador y suponiendo una velocidad de giro de 100 rpm, podemos calcular el Re mediante la siguiente expresión:

$$Re = \frac{D_a^2 \cdot N \cdot \rho}{\mu} = \frac{1.50^2 \cdot \frac{100}{60} \cdot 2790}{1.940 \cdot 10^{-3}} = 5393041$$

Con este dato de Re podemos irnos a la figura 1, y mirando la curva 1 que es la correspondiente a nuestro agitador, obtenemos un número de potencia de 5.

Figura 1. Representación del número de potencia en función del número de Reynolds para distintos tipos de agitadores. Perry (2001)



Y finalmente calculamos la potencia del agitador mediante la ecuación:

$$N_p = \frac{P}{D_a^5 \cdot N^3 \cdot \rho}; P = N_p \cdot D_a^5 \cdot N^3 \cdot \rho = 5 \cdot 1.50^5 \cdot \left(\frac{100}{60}\right)^3 \cdot 2790 = 490430 \text{ W} \approx 490 \text{ kW}$$

- SOPLANTE

<b>Equipo:</b>	Soplante
<b>Referencia:</b>	COM-201
<b>Producto de trabajo:</b>	Aire

El parámetro fundamental de diseño de una soplante es la potencia de la misma. Para su cálculo conocemos los siguientes datos:

$$R = 8.314 \text{ J}/(\text{K} \cdot \text{mol})$$

$$C_{v,\text{aire},20^\circ\text{C}} = 729.88 \text{ J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$$

$$k = C_p/C_v = 1.3994$$

$$Z = 0.9997$$

$$M_m = 0.02875 \text{ kg/mol}$$

$$m = 35774 \text{ kg/h} = 9.937 \text{ kg/s}$$

$$P_{\text{ent}} = 1 \text{ atm}$$

$$T_{\text{ent}} = 20^\circ\text{C} = 293.15 \text{ K}$$

$$P_{\text{sal}} = 2.2 \text{ atm}$$

Con ellos, suponiendo una compresión adiabática y un rendimiento de la soplante del 75 %, ya podemos proceder con el cálculo de los parámetros principales y dimensionamiento básico del equipo:

- Trabajo de la soplante:

$$W = \frac{k}{k-1} \cdot \frac{Z \cdot R \cdot T_{\text{ent}}}{M_m} \cdot \left( \left( \frac{P_{\text{sal}}}{P_{\text{ent}}} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right);$$

$$W = \frac{1.3994}{1.3994-1} \cdot \frac{0.9997 \cdot 8.314 \cdot 293.15}{0.02875} \cdot \left( \left( \frac{2.2}{1} \right)^{\frac{1.3994-1}{1.3994}} - 1 \right) = 74936.1 \text{ J/kg}$$

- Potencia de la soplante:

$$N_b = \frac{W \cdot m}{\eta} = \frac{74936.1 \cdot 9.937}{0.75} = 992853 \text{ J/s} = 993 \text{ kW}$$

Por lo que, para nuestro diseño preliminar, podemos suponer que la potencia de la soplante será de 1000 kW.

Además, podemos hacer un cálculo estimativo de la temperatura de salida de la soplante mediante la siguiente expresión:

$$T_{sal} = T_{ent} \cdot \left( \frac{P_{sal}}{P_{ent}} \right)^{\frac{k-1}{k}} + \frac{1-\eta}{\eta} \cdot \frac{W}{Cv};$$

$$T_{sal} = 293.15 \cdot \left( \frac{2.2}{1} \right)^{\frac{1.3994-1}{1.3994}} + \frac{1-0.75}{0.75} \cdot \frac{74936.1}{729.88} = 401.2 \text{ K} = 128.1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

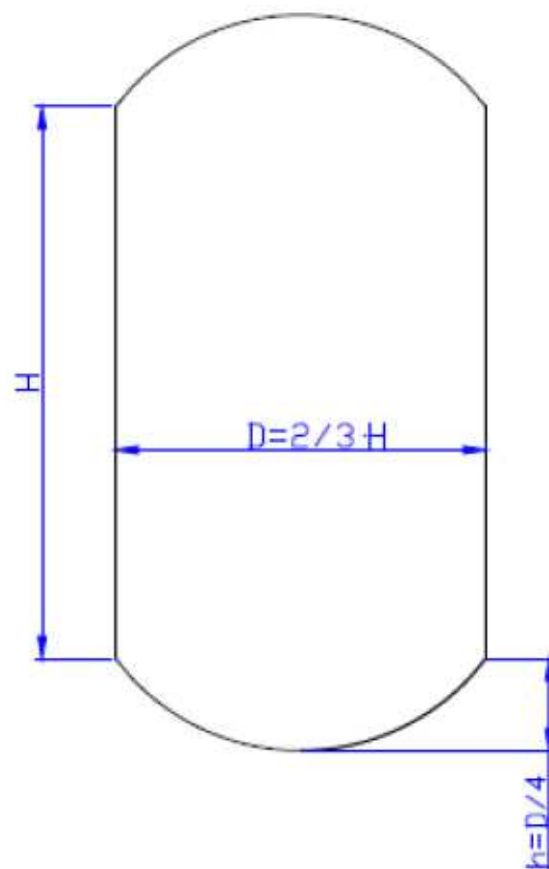


- TANQUES DE ALMACENAMIENTO

Los tanques de almacenamiento de materias primas y productos de la planta se diseñan según el código API-ASME, para el diseño de tanques que trabajan a presión atmosférica y contienen productos (líquidos o sólidos) en su interior. Estos cálculos servirán de referencia para cuando acudamos a una empresa de fabricación de depósitos que se encargará del asesoramiento necesario para adquirir las unidades más adecuadas y que cumplan con las especificaciones indicadas.

Todos los tanques, que contendrán líquidos, serán de cuerpo cilíndrico con fondo y cabeza elipsoidal 2:1, con las siguientes proporciones:

Figura 2. Tanque para almacenamiento de líquidos.



A continuación calculamos las dimensiones y el espesor del acero utilizado para construir los distintos depósitos.

<b>Equipo:</b>	Tanque de almacenamiento de materia prima
<b>Referencia:</b>	T-201
<b>Producto que almacena:</b>	<i>n</i> -butano

El *n*-butano se va a almacenar en el tanque de almacenamiento de materia prima a temperatura ambiente, aproximadamente 20 °C, y a una presión de 5 atm. En estas condiciones el *n*-butano se encuentra en estado líquido, con una densidad de 578.8 kg/m<sup>3</sup>. Por tanto, dividiendo los 1263 kg/h que se consumen de *n*-butano entre su densidad, obtenemos un caudal volumétrico de 2.18 m<sup>3</sup>/h. Con este consumo volumétrico a la hora, diariamente se necesitarán 52.37 m<sup>3</sup>.

Se optará por colocar ocho depósitos de 100 m<sup>3</sup>, de forma que tengamos en planta materia prima para algo más de 15 días de producción. Seguidamente se calculan las dimensiones de la unidad.

El tanque tendrá una disposición vertical, con un cuerpo cilíndrico y fondo y cabeza de tipo elipsoidal 2:1. Por lo tanto, el volumen se puede calcular como:

$$V_{cilindro} = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot H$$

$$V_{cabeza} = \frac{\pi}{6} \cdot D^2 \cdot h$$

Debemos de recordar que tanto la cabeza como el fondo del depósito son de tipo elipsoidal 2:1, por lo que el volumen de ambos es igual. Por tanto, el volumen total del tanque lo podemos calcular como la suma de los tres anteriores:

$$V_T = V_{cilindro} + 2 \cdot V_{cabeza} = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot H + 2 \cdot \frac{\pi}{6} \cdot D^2 \cdot h$$

$$V_T = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot H + \frac{\pi}{3} \cdot D^2 \cdot h$$

donde:

- $V_T$  = Volumen total del depósito de almacenamiento de *n*-butano, 100 m<sup>3</sup>.
- $D$  = Diámetro interno del cilindro, m.
- $H$  = Altura del cuerpo cilíndrico, m.
- $h$  = Altura de la elipse de la cabeza o del fondo, m.

Si además recordamos las siguientes relaciones que aparecían en la figura 2:

$$D = \frac{2}{3} \cdot H ; H = \frac{3}{2} \cdot D$$

$$h = \frac{D}{4}$$

Podemos sustituir estas relaciones en la expresión para el cálculo del  $V_T$  hallado anteriormente de forma que obtenemos la siguiente ecuación:

$$V_T = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot \frac{3}{2} \cdot D + \frac{\pi}{3} \cdot D^2 \cdot \frac{D}{4} = \frac{3 \cdot \pi}{8} \cdot D^3 + \frac{\pi}{12} \cdot D^3$$

$$V_T = \pi \cdot D^3 \cdot \left( \frac{3}{8} + \frac{1}{12} \right)$$

Así pues, el diámetro del tanque se puede calcular despejando de la ecuación anterior y, con él, el resto de los parámetros. De esta forma se obtienen los siguientes resultados:

$$D = \sqrt[3]{\frac{V_T}{\pi \cdot \left( \frac{3}{8} + \frac{1}{12} \right)}} = \sqrt[3]{\frac{100}{\pi \cdot \left( \frac{3}{8} + \frac{1}{12} \right)}} = 4.11 \text{ m}$$

$$H = \frac{3}{2} \cdot D = \frac{3}{2} \cdot 4.11 = 6.17 \text{ m}$$

$$h = \frac{D}{4} = \frac{4.11}{4} = 1.03 \text{ m}$$

Y la altura del tanque será la suma de las longitudes de las tres partes que lo forman: carcasa, cabeza y fondo.

$$H_T = H + 2 \cdot h = 6.17 + 2 \cdot 1.03 = 8.23 \text{ m}$$

Seguidamente se calcularán los espesores del depósito. Se calculan por separado los espesores para el cuerpo cilíndrico y para la cabeza y el fondo.

Para el cuerpo cilíndrico tenemos la siguiente expresión:

$$t_{cilindro} = \frac{\rho \cdot d \cdot r}{\sigma_T \cdot E_S} + t_{corrosión}$$

donde:

- $t_{cilindro}$  = espesor del cuerpo cilíndrico, cm.
- $\rho$  = densidad del producto almacenado,  $578.8 \cdot 10^{-6} \text{ kg/cm}^3$  para el *n*-butano en las condiciones en las que se encuentra en el tanque.
- $d$  = nivel máximo de producto almacenado, en este caso será de 800 cm.
- $r$  = radio del cilindro, 205.5 cm.
- $\sigma_T$  = tensión máxima admisible del material,  $\text{kg/cm}^2$ .
- $E_S$  = eficiencia de soldadura según tipo de soldadura. En este caso se va a hacer una junta soldada a tope en doble V y no examinada, tomando la eficiencia un valor de 0.6.
- $t_{corrosión}$  = espesor que desaparecerá debido a la corrosión durante la vida útil del tanque. Tomando que anualmente el espesor disminuya 1.024 mm debido a la corrosión y suponiendo una vida útil de 10 años, este término tendrá un valor de 1.024 cm.

Es necesario calcular la tensión máxima admisible del material,  $\sigma_T$ , que es el resultado de dividir la tensión admisible del material por el coeficiente de seguridad aplicado en cada caso, según se indica en la siguiente expresión:

$$\sigma_T = \frac{\sigma_a}{n}$$

donde:

- $\sigma_a$  = tensión admisible del material. En este caso se escoge acero inoxidable AISI-316, que tiene una tensión admisible de 3663 kg/cm<sup>2</sup>.
- $n$  = coeficiente de seguridad, se tomará un valor de 2.

Sustituyendo estos datos en la expresión anterior se tiene que:

$$\sigma_T = \frac{\sigma_a}{n} = \frac{3663}{2} = 1831.5 \text{ kg/cm}^2$$

Luego ya se conocen todos los términos necesarios para calcular el espesor del cuerpo cilíndrico mediante la expresión:

$$t_{cilindro} = \frac{\rho \cdot d \cdot r}{\sigma_T \cdot E_S} + t_{corrosión} = \frac{578.8 \cdot 10^{-6} \cdot 800 \cdot 205.5}{1831.5 \cdot 0.6} + 1.024 = 1.111 \text{ cm}$$

Las placas de acero utilizadas para el cuerpo cilíndrico del tanque de almacenamiento de *n*-butano tendrán un espesor de 11.2 mm.

Para calcular los espesores de la cabeza y del fondo elipsoidales utilizaremos la ecuación:

$$t_{cabeza} = \frac{P \cdot D_e}{2 \cdot \sigma_T \cdot E_S + 1.8 \cdot P} + t_{corrosión}$$

donde:

- $t_{cabeza}$  = espesor de la cabeza, cm.
- $P$  = Presión de proyecto, kg/cm<sup>2</sup>.
- $D_e$  = Diámetro externo del cuerpo cilíndrico. Como ya se ha calculado el espesor, este dato se conoce, 413.2 cm.

La presión de proyecto para el diseño de los recipientes debe ser mayor que la máxima de:

$$P > 1.1 \cdot \text{Presión máxima de operación} = 1.1 \cdot 5.166 = 5.687 \text{ kg/cm}^2$$

$$P > 1 \text{ kg/cm}^2 + \text{Presión máxima de operación} = 1 + 5.166 = 6.166 \text{ kg/cm}^2$$

La presión máxima de operación son 5 atm. La presión de proyecto tiene un valor de 6.166 kg/cm<sup>2</sup>.

Ya podemos calcular el espesor mediante la expresión anterior:

$$t_{cabeza} = \frac{P \cdot D_e}{2 \cdot \sigma_T \cdot E_S + 1.8 \cdot P} + t_{corrosión} = \frac{6.166 \cdot 413.2}{2 \cdot 1831.5 \cdot 0.6 + 1.8 \cdot 6.166} + 1.024 = 2.177 \text{ cm}$$

Las placas de acero utilizadas para la cabeza y el fondo elipsoidales del depósito de alimentación tendrán un espesor de 21.8 mm.

<b>Equipo:</b>	Tanque de almacenamiento de agua
<b>Referencia:</b>	T-202
<b>Producto que almacena:</b>	Agua

En nuestra planta vamos a tener un consumo de agua importante, fundamentalmente por las necesidades de refrigeración de nuestro proceso que, al ser tan exotérmico, tenemos que refrigerar continuamente. Aunque este agua de refrigeración la tomaremos directamente de la red, contaremos con una serie de depósitos de almacenamiento para que, en caso de posibles cortes en el suministro, contemos con agua suficiente para poder refrigerar el proceso. En caso contrario, si se produjese un corte de suministro en la red, no tendríamos agua de refrigeración por lo que las temperaturas se podrían disparar y provocar un accidente en la planta.

El agua se va a almacenar en el tanque de almacenamiento de agua a temperatura ambiente, aproximadamente 20 °C, y a una presión de 3 atm. En estas condiciones el agua se encuentra en estado líquido, con una densidad de 1000 kg/m<sup>3</sup>. Por tanto, dividiendo los 30000 kg/h que aproximadamente se consumen de agua entre su densidad, obtenemos un caudal volumétrico de 30 m<sup>3</sup>/h.

Se optará por colocar doce depósitos de 100 m<sup>3</sup>, de forma que tengamos en planta agua suficiente para unas 40 horas aproximadamente. De esta forma, en caso de haber un corte de agua por avería o por alguna otra razón, la planta puede continuar operando durante todo ese tiempo sin ningún problema. Y en el caso de que, por cualquier motivo, el corte del suministro de agua se prolongase, habría tiempo más que suficiente para parar el proceso de producción y enfriar los equipos correctamente sin entrañar ningún tipo de peligro. Seguidamente se calculan las dimensiones de la unidad.

El tanque tendrá una disposición vertical, con un cuerpo cilíndrico y fondo y cabeza de tipo elipsoidal 2:1. Por lo tanto, el volumen se puede calcular como:

$$V_{cilindro} = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot H$$

$$V_{cabeza} = \frac{\pi}{6} \cdot D^2 \cdot h$$

Debemos de recordar que tanto la cabeza como el fondo del depósito son de tipo elipsoidal 2:1, por lo que el volumen de ambos es igual. Por tanto, el volumen total del tanque lo podemos calcular como la suma de los tres anteriores:

$$V_T = V_{cilindro} + 2 \cdot V_{cabeza} = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot H + 2 \cdot \frac{\pi}{6} \cdot D^2 \cdot h$$

$$V_T = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot H + \frac{\pi}{3} \cdot D^2 \cdot h$$

donde:

- $V_T$  = Volumen total del depósito de almacenamiento de *n*-butano, 100 m<sup>3</sup>.

- $D$  = Diámetro interno del cilindro, m.
- $H$  = Altura del cuerpo cilíndrico, m.
- $h$  = Altura de la elipse de la cabeza o del fondo, m.

Si además recordamos las siguientes relaciones que aparecían en la figura 2:

$$D = \frac{2}{3} \cdot H ; H = \frac{3}{2} \cdot D$$

$$h = \frac{D}{4}$$

Podemos sustituir estas relaciones en la expresión para el cálculo del  $V_T$  hallado anteriormente de forma que obtenemos la siguiente ecuación:

$$V_T = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot \frac{3}{2} \cdot D + \frac{\pi}{3} \cdot D^2 \cdot \frac{D}{4} = \frac{3 \cdot \pi}{8} \cdot D^3 + \frac{\pi}{12} \cdot D^3$$

$$V_T = \pi \cdot D^3 \cdot \left( \frac{3}{8} + \frac{1}{12} \right)$$

Así pues, el diámetro del tanque se puede calcular despejando de la ecuación anterior y, con él, el resto de los parámetros. De esta forma se obtienen los siguientes resultados:

$$D = \sqrt[3]{\frac{V_T}{\pi \cdot \left( \frac{3}{8} + \frac{1}{12} \right)}} = \sqrt[3]{\frac{100}{\pi \cdot \left( \frac{3}{8} + \frac{1}{12} \right)}} = 4.11 \text{ m}$$

$$H = \frac{3}{2} \cdot D = \frac{3}{2} \cdot 4.11 = 6.17 \text{ m}$$

$$h = \frac{D}{4} = \frac{4.11}{4} = 1.03 \text{ m}$$

Y la altura del tanque será la suma de las longitudes de las tres partes que lo forman: carcasa, cabeza y fondo.

$$H_T = H + 2 \cdot h = 6.17 + 2 \cdot 1.03 = 8.23 \text{ m}$$

Seguidamente se calcularán los espesores del depósito. Se calculan por separado los espesores para el cuerpo cilíndrico y para la cabeza y el fondo.

Para el cuerpo cilíndrico tenemos la siguiente expresión:

$$t_{cilindro} = \frac{\rho \cdot d \cdot r}{\sigma_T \cdot E_S} + t_{corrosión}$$

donde:

- $t_{cilindro}$  = espesor del cuerpo cilíndrico, cm.
- $\rho$  = densidad del producto almacenado,  $10^{-3} \text{ kg/cm}^3$  para el agua en las condiciones en las que se encuentra en el tanque.
- $d$  = nivel máximo de producto almacenado, en este caso será de 800 cm.

- $r$  = radio del cilindro, 205.5 cm.
- $\sigma_T$  = tensión máxima admisible del material,  $\text{kg/cm}^2$ .
- $E_S$  = eficiencia de soldadura según tipo de soldadura. En este caso se va a hacer una junta soldada a tope en doble V y no examinada, tomando la eficiencia un valor de 0.6.
- $t_{\text{corrosión}}$  = espesor que desaparecerá debido a la corrosión durante la vida útil del tanque. Tomando que anualmente el espesor disminuya 1.024 mm debido a la corrosión y suponiendo una vida útil de 10 años, este término tendrá un valor de 1.024 cm.

Es necesario calcular la tensión máxima admisible del material,  $\sigma_T$ , que es el resultado de dividir la tensión admisible del material por el coeficiente de seguridad aplicado en cada caso, según se indica en la siguiente expresión:

$$\sigma_T = \frac{\sigma_a}{n}$$

donde:

- $\sigma_a$  = tensión admisible del material. En este caso se escoge acero inoxidable AISI-316, que tiene una tensión admisible de  $3663 \text{ kg/cm}^2$ .
- $n$  = coeficiente de seguridad, se tomará un valor de 2.

Sustituyendo estos datos en la expresión anterior se tiene que:

$$\sigma_T = \frac{\sigma_a}{n} = \frac{3663}{2} = 1831.5 \text{ kg/cm}^2$$

Luego ya se conocen todos los términos necesarios para calcular el espesor del cuerpo cilíndrico mediante la expresión:

$$t_{\text{cilindro}} = \frac{\rho \cdot d \cdot r}{\sigma_T \cdot E_S} + t_{\text{corrosión}} = \frac{10^{-3} \cdot 800 \cdot 205.5}{1831.5 \cdot 0.6} + 1.024 = 1.174 \text{ cm}$$

Las placas de acero utilizadas para el cuerpo cilíndrico del tanque de almacenamiento de *n*-butano tendrán un espesor de 11.8 mm.

Para calcular los espesores de la cabeza y del fondo elipsoidales utilizaremos la ecuación:

$$t_{\text{cabeza}} = \frac{P \cdot D_e}{2 \cdot \sigma_T \cdot E_S + 1.8 \cdot P} + t_{\text{corrosión}}$$

donde:

- $t_{\text{cabeza}}$  = espesor de la cabeza, cm.
- $P$  = Presión de proyecto,  $\text{kg/cm}^2$ .
- $D_e$  = Diámetro externo del cuerpo cilíndrico. Como ya se ha calculado el espesor, este dato se conoce, 413.3 cm.

La presión de proyecto para el diseño de los recipientes debe ser mayor que la máxima de:

$$P > 1.1 \cdot \text{Presión máxima de operación} = 1.1 \cdot 3.100 = 3.410 \text{ kg/cm}^2$$

$$P > 1 \text{ kg/cm}^2 + \text{Presión máxima de operación} = 1 + 3.100 = 4.100 \text{ kg/cm}^2$$

La presión máxima de operación son 3 atm. La presión de proyecto tiene un valor de 4.100 kg/cm<sup>2</sup>.

Ya podemos calcular el espesor mediante la expresión anterior:

$$t_{\text{cabeza}} = \frac{P \cdot D_e}{2 \cdot \sigma_T \cdot E_S + 1.8 \cdot P} + t_{\text{corrosión}} = \frac{4.100 \cdot 413.3}{2 \cdot 1831.5 \cdot 0.6 + 1.8 \cdot 4.100} + 1.024 = 1.792 \text{ cm}$$

Las placas de acero utilizadas para la cabeza y el fondo elipsoidales del depósito de alimentación tendrán un espesor de 18.0 mm.



<b>Equipo:</b>	Tanque de almacenamiento de disolvente
<b>Referencia:</b>	T-203
<b>Producto que almacena:</b>	Ftalato de dibutilo

El ftalato de dibutilo que se utiliza en la columna de absorción para separar el AM del resto de componentes gaseosos que salen del reactor, a medida que se vaya llevando a cabo el proceso, se irá contaminando con otras sustancias presentes en la instalación. Por ello, es necesario realizar una pequeña purga de disolvente que, evidentemente, deberemos ir reponiendo continuamente. De esta forma, en el sistema siempre tendremos un ftalato de dibutilo lo suficientemente puro.

Este ftalato de dibutilo que deberemos de ir reponiendo continuamente se va a almacenar en el tanque de almacenamiento de disolvente, T-203, a temperatura ambiente, aproximadamente 20 °C, y a una presión de 2.5 atm. En estas condiciones el ftalato de dibutilo se encuentra en estado líquido, con una densidad de 1045.6 kg/m<sup>3</sup>. Por tanto, dividiendo los 10 kg/h de ftalato de dibutilo que se van a reponer entre su densidad, obtenemos un caudal volumétrico de 0.0096 m<sup>3</sup>/h. Con este consumo volumétrico a la hora, diariamente se necesitarán 0.230 m<sup>3</sup>.

Se optará por colocar dos depósitos de 10 m<sup>3</sup>, de forma que podamos almacenar en planta disolvente para algo menos de tres meses de producción. Seguidamente se calculan las dimensiones de la unidad.

El tanque tendrá una disposición vertical, con un cuerpo cilíndrico y fondo y cabeza de tipo elipsoidal 2:1. Por lo tanto, el volumen se puede calcular como:

$$V_{cilindro} = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot H$$

$$V_{cabeza} = \frac{\pi}{6} \cdot D^2 \cdot h$$

Debemos de recordar que tanto la cabeza como el fondo del depósito son de tipo elipsoidal 2:1, por lo que el volumen de ambos es igual. Por tanto, el volumen total del tanque lo podemos calcular como la suma de los tres anteriores:

$$V_T = V_{cilindro} + 2 \cdot V_{cabeza} = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot H + 2 \cdot \frac{\pi}{6} \cdot D^2 \cdot h$$

$$V_T = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot H + \frac{\pi}{3} \cdot D^2 \cdot h$$

donde:

- $V_T$  = Volumen total del depósito de almacenamiento de *n*-butano, 10 m<sup>3</sup>.
- $D$  = Diámetro interno del cilindro, m.
- $H$  = Altura del cuerpo cilíndrico, m.
- $h$  = Altura de la elipse de la cabeza o del fondo, m.

Si además recordamos las siguientes relaciones que aparecían en la figura 2:

$$D = \frac{2}{3} \cdot H ; H = \frac{3}{2} \cdot D$$

$$h = \frac{D}{4}$$

Podemos sustituir estas relaciones en la expresión para el cálculo del  $V_T$  hallado anteriormente de forma que obtenemos la siguiente ecuación:

$$V_T = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot \frac{3}{2} \cdot D + \frac{\pi}{3} \cdot D^2 \cdot \frac{D}{4} = \frac{3 \cdot \pi}{8} \cdot D^3 + \frac{\pi}{12} \cdot D^3$$

$$V_T = \pi \cdot D^3 \cdot \left( \frac{3}{8} + \frac{1}{12} \right)$$

Así pues, el diámetro del tanque se puede calcular despejando de la ecuación anterior y, con él, el resto de los parámetros. De esta forma se obtienen los siguientes resultados:

$$D = \sqrt[3]{\frac{V_T}{\pi \cdot \left( \frac{3}{8} + \frac{1}{12} \right)}} = \sqrt[3]{\frac{10}{\pi \cdot \left( \frac{3}{8} + \frac{1}{12} \right)}} = 1.91 \text{ m}$$

$$H = \frac{3}{2} \cdot D = \frac{3}{2} \cdot 1.91 = 2.87 \text{ m}$$

$$h = \frac{D}{4} = \frac{1.91}{4} = 0.48 \text{ m}$$

Y la altura del tanque será la suma de las longitudes de las tres partes que lo forman: carcasa, cabeza y fondo.

$$H_T = H + 2 \cdot h = 2.87 + 2 \cdot 0.48 = 3.83 \text{ m}$$

Seguidamente se calcularán los espesores del depósito. Se calculan por separado los espesores para el cuerpo cilíndrico y para la cabeza y el fondo.

Para el cuerpo cilíndrico tenemos la siguiente expresión:

$$t_{cilindro} = \frac{\rho \cdot d \cdot r}{\sigma_T \cdot E_S} + t_{corrosión}$$

donde:

- $t_{cilindro}$  = espesor del cuerpo cilíndrico, cm.
- $\rho$  = densidad del producto almacenado,  $1045.6 \cdot 10^{-6} \text{ kg/cm}^3$  para el ftalato de dibutilo en las condiciones en las que se encuentra en el tanque.
- $d$  = nivel máximo de producto almacenado, en este caso será de 350 cm.
- $r$  = radio del cilindro, 95.5 cm.
- $\sigma_T$  = tensión máxima admisible del material,  $\text{kg/cm}^2$ .

- $E_S$  = eficiencia de soldadura según tipo de soldadura. En este caso se va a hacer una junta soldada a tope en doble V y no examinada, tomando la eficiencia un valor de 0.6.
- $t_{\text{corrosión}}$  = espesor que desaparecerá debido a la corrosión durante la vida útil del tanque. Tomando que anualmente el espesor disminuya 1.024 mm debido a la corrosión y suponiendo una vida útil de 10 años, este término tendrá un valor de 1.024 cm.

Es necesario calcular la tensión máxima admisible del material,  $\sigma_T$ , que es el resultado de dividir la tensión admisible del material por el coeficiente de seguridad aplicado en cada caso, según se indica en la siguiente expresión:

$$\sigma_T = \frac{\sigma_a}{n}$$

donde:

- $\sigma_a$  = tensión admisible del material. En este caso se escoge acero inoxidable AISI-316, que tiene una tensión admisible de 3663 kg/cm<sup>2</sup>.
- $n$  = coeficiente de seguridad, se tomará un valor de 2.

Sustituyendo estos datos en la expresión anterior se tiene que:

$$\sigma_T = \frac{\sigma_a}{n} = \frac{3663}{2} = 1831.5 \text{ kg/cm}^2$$

Luego ya se conocen todos los términos necesarios para calcular el espesor del cuerpo cilíndrico mediante la expresión:

$$t_{\text{cilindro}} = \frac{\rho \cdot d \cdot r}{\sigma_T \cdot E_S} + t_{\text{corrosión}} = \frac{1045.6 \cdot 10^{-6} \cdot 350 \cdot 95.5}{1831.5 \cdot 0.6} + 1.024 = 1.056 \text{ cm}$$

Las placas de acero utilizadas para el cuerpo cilíndrico del tanque de almacenamiento de *n*-butano tendrán un espesor de 10.6 mm.

Para calcular los espesores de la cabeza y del fondo elipsoidales utilizaremos la ecuación:

$$t_{\text{cabeza}} = \frac{P \cdot D_e}{2 \cdot \sigma_T \cdot E_S + 1.8 \cdot P} + t_{\text{corrosión}}$$

donde:

- $t_{\text{cabeza}}$  = espesor de la cabeza, cm.
- $P$  = Presión de proyecto, kg/cm<sup>2</sup>.
- $D_e$  = Diámetro externo del cuerpo cilíndrico. Como ya se ha calculado el espesor, este dato se conoce, 193.1 cm.

La presión de proyecto para el diseño de los recipientes debe ser mayor que la máxima de:

$$P > 1.1 \cdot \text{Presión máxima de operación} = 1.1 \cdot 2.583 = 2.841 \text{ kg/cm}^2$$

$$P > 1 \text{ kg/cm}^2 + \text{Presión máxima de operación} = 1 + 2.583 = 3.583 \text{ kg/cm}^2$$

La presión máxima de operación son 2.5 atm. La presión de proyecto tiene un valor de 3.583 kg/cm<sup>2</sup>.

Ya podemos calcular el espesor mediante la expresión anterior:

$$t_{cabeza} = \frac{P \cdot D_e}{2 \cdot \sigma_T \cdot E_S + 1.8 \cdot P} + t_{corrosión} = \frac{3.583 \cdot 193.1}{2 \cdot 1831.5 \cdot 0.6 + 1.8 \cdot 3.583} + 1.024 = 1.338 \text{ cm}$$

Las placas de acero utilizadas para la cabeza y el fondo elipsoidales del depósito de alimentación tendrán un espesor de 13.4 mm.

<b>Equipo:</b>	Vaporizador
<b>Referencia:</b>	T-204
<b>Producto que contiene:</b>	<i>n</i> -butano

Aunque este equipo no es un tanque de almacenamiento propiamente dicho, pero sí que es un depósito que contará con un serpentín interior, I-201, en el que, por expansión y posterior calentamiento, se producirá la vaporización del *n*-butano. Por tanto, a efectos de su dimensionamiento, lo trataremos como si fuese un depósito de producto.

Según hemos calculado en los balances de materia y energía anteriores, el caudal volumétrico de *n*-butano vaporizado a la salida del equipo es de 150 m<sup>3</sup>/h o, lo que es lo mismo, 2.5 m<sup>3</sup>/min. Si suponemos que el tiempo de retención del vaporizador es de 5 minutos, esto es, el *n*-butano permanecerá en el interior del recipiente durante 5 minutos, el volumen de dicho recipiente tiene que ser de 12.5 m<sup>3</sup>. Seguidamente se calculan las dimensiones de la unidad.

El tanque tendrá una disposición vertical, con un cuerpo cilíndrico y fondo y cabeza de tipo elipsoidal 2:1. Por lo tanto, el volumen se puede calcular como:

$$V_{cilindro} = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot H$$

$$V_{cabeza} = \frac{\pi}{6} \cdot D^2 \cdot h$$

Debemos de recordar que tanto la cabeza como el fondo del depósito son de tipo elipsoidal 2:1, por lo que el volumen de ambos es igual. Por tanto, el volumen total del tanque lo podemos calcular como la suma de los tres anteriores:

$$V_T = V_{cilindro} + 2 \cdot V_{cabeza} = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot H + 2 \cdot \frac{\pi}{6} \cdot D^2 \cdot h$$

$$V_T = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot H + \frac{\pi}{3} \cdot D^2 \cdot h$$

donde:

- $V_T$  = Volumen total del depósito de almacenamiento de *n*-butano, 12.5 m<sup>3</sup>.
- $D$  = Diámetro interno del cilindro, m.
- $H$  = Altura del cuerpo cilíndrico, m.
- $h$  = Altura de la elipse de la cabeza o del fondo, m.

Si además recordamos las siguientes relaciones que aparecían en la figura 2:

$$D = \frac{2}{3} \cdot H ; H = \frac{3}{2} \cdot D$$

$$h = \frac{D}{4}$$

Podemos sustituir estas relaciones en la expresión para el cálculo del  $V_T$  hallado anteriormente de forma que obtenemos la siguiente ecuación:

$$V_T = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot \frac{3}{2} \cdot D + \frac{\pi}{3} \cdot D^2 \cdot \frac{D}{4} = \frac{3 \cdot \pi}{8} \cdot D^3 + \frac{\pi}{12} \cdot D^3$$

$$V_T = \pi \cdot D^3 \cdot \left( \frac{3}{8} + \frac{1}{12} \right)$$

Así pues, el diámetro del tanque se puede calcular despejando de la ecuación anterior y, con él, el resto de los parámetros. De esta forma se obtienen los siguientes resultados:

$$D = \sqrt[3]{\frac{V_T}{\pi \cdot \left( \frac{3}{8} + \frac{1}{12} \right)}} = \sqrt[3]{\frac{12.5}{\pi \cdot \left( \frac{3}{8} + \frac{1}{12} \right)}} = 2.06 \text{ m}$$

$$H = \frac{3}{2} \cdot D = \frac{3}{2} \cdot 2.06 = 3.09 \text{ m}$$

$$h = \frac{D}{4} = \frac{2.06}{4} = 0.52 \text{ m}$$

Y la altura del tanque será la suma de las longitudes de las tres partes que lo forman: carcasa, cabeza y fondo.

$$H_T = H + 2 \cdot h = 3.09 + 2 \cdot 0.52 = 4.13 \text{ m}$$

Seguidamente se calcularán los espesores del depósito. Se calculan por separado los espesores para el cuerpo cilíndrico y para la cabeza y el fondo.

Para el cuerpo cilíndrico tenemos la siguiente expresión:

$$t_{cilindro} = \frac{\rho \cdot d \cdot r}{\sigma_T \cdot E_S} + t_{corrosión}$$

donde:

- $t_{cilindro}$  = espesor del cuerpo cilíndrico, cm.
- $\rho$  = densidad del producto almacenado,  $578.8 \cdot 10^{-6} \text{ kg/cm}^3$  para el *n*-butano en las condiciones en las que se encuentra en el vaporizador.
- $d$  = nivel máximo de producto almacenado, en este caso será de 400 cm.
- $r$  = radio del cilindro, 103 cm.
- $\sigma_T$  = tensión máxima admisible del material,  $\text{kg/cm}^2$ .
- $E_S$  = eficiencia de soldadura según tipo de soldadura. En este caso se va a hacer una junta soldada a tope en doble V y no examinada, tomando la eficiencia un valor de 0.6.
- $t_{corrosión}$  = espesor que desaparecerá debido a la corrosión durante la vida útil del tanque. Tomando que anualmente el espesor disminuya 1.024 mm

debido a la corrosión y suponiendo una vida útil de 10 años, este término tendrá un valor de 1.024 cm.

Es necesario calcular la tensión máxima admisible del material,  $\sigma_T$ , que es el resultado de dividir la tensión admisible del material por el coeficiente de seguridad aplicado en cada caso, según se indica en la siguiente expresión:

$$\sigma_T = \frac{\sigma_a}{n}$$

donde:

- $\sigma_a$  = tensión admisible del material. En este caso se escoge acero inoxidable AISI-316, que tiene una tensión admisible de 3663 kg/cm<sup>2</sup>.
- $n$  = coeficiente de seguridad, se tomará un valor de 2.

Sustituyendo estos datos en la expresión anterior se tiene que:

$$\sigma_T = \frac{\sigma_a}{n} = \frac{3663}{2} = 1831.5 \text{ kg/cm}^2$$

Luego ya se conocen todos los términos necesarios para calcular el espesor del cuerpo cilíndrico mediante la expresión:

$$t_{cilindro} = \frac{\rho \cdot d \cdot r}{\sigma_T \cdot E_s} + t_{corrosión} = \frac{578.8 \cdot 10^{-6} \cdot 400 \cdot 103}{1831.5 \cdot 0.6} + 1.024 = 1.046 \text{ cm}$$

Las placas de acero utilizadas para el cuerpo cilíndrico del tanque de almacenamiento de *n*-butano tendrán un espesor de 10.5 mm.

Para calcular los espesores de la cabeza y del fondo elipsoidales utilizaremos la ecuación:

$$t_{cabeza} = \frac{P \cdot D_e}{2 \cdot \sigma_T \cdot E_s + 1.8 \cdot P} + t_{corrosión}$$

donde:

- $t_{cabeza}$  = espesor de la cabeza, cm.
- $P$  = Presión de proyecto, kg/cm<sup>2</sup>.
- $D_e$  = Diámetro externo del cuerpo cilíndrico. Como ya se ha calculado el espesor, este dato se conoce, 208.1 cm.

La presión de proyecto para el diseño de los recipientes debe ser mayor que la máxima de:

$$P > 1.1 \cdot \text{Presión máxima de operación} = 1.1 \cdot 4.650 = 5.115 \text{ kg/cm}^2$$

$$P > 1 \text{ kg/cm}^2 + \text{Presión máxima de operación} = 1 + 4.650 = 5.650 \text{ kg/cm}^2$$

La presión máxima de operación son 4.5 atm. La presión de proyecto tiene un valor de 5.650 kg/cm<sup>2</sup>.

Ya podemos calcular el espesor mediante la expresión anterior:

$$t_{cabeza} = \frac{P \cdot D_e}{2 \cdot \sigma_T \cdot E_s + 1.8 \cdot P} + t_{corrosión} = \frac{5.650 \cdot 208.1}{2 \cdot 1831.5 \cdot 0.6 + 1.8 \cdot 5.650} + 1.024 = 1.557 \text{ cm}$$

Las placas de acero utilizadas para la cabeza y el fondo elipsoidales del depósito de alimentación tendrán un espesor de 15.6 mm.



<b>Equipo:</b>	Tanque de almacenamiento de producto terminado
<b>Referencia:</b>	T-205
<b>Producto que almacena:</b>	AM puro (> 99.8 %)

El AM puro se va a almacenar en el tanque de almacenamiento de producto terminado a una temperatura de 60 °C aproximadamente, y a una presión de 1.75 atm. En estas condiciones el AM puro se encuentra en estado líquido, con una densidad de 1313.3 kg/m<sup>3</sup>. Por tanto, dividiendo los 1253 kg/h de producto terminado producido entre su densidad, obtenemos un caudal volumétrico de 0.95 m<sup>3</sup>/h. Con esta cantidad volumétrica producida a la hora, diariamente se necesitarán almacenar 22.90 m<sup>3</sup>.

Se optará por colocar seis depósitos de 200 m<sup>3</sup>, de forma que podamos almacenar en planta producto terminado durante aproximadamente 52 días de producción. Seguidamente se calculan las dimensiones de la unidad.

El tanque tendrá una disposición vertical, con un cuerpo cilíndrico y fondo y cabeza de tipo elipsoidal 2:1. Por lo tanto, el volumen se puede calcular como:

$$V_{cilindro} = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot H$$

$$V_{cabeza} = \frac{\pi}{6} \cdot D^2 \cdot h$$

Debemos de recordar que tanto la cabeza como el fondo del depósito son de tipo elipsoidal 2:1, por lo que el volumen de ambos es igual. Por tanto, el volumen total del tanque lo podemos calcular como la suma de los tres anteriores:

$$V_T = V_{cilindro} + 2 \cdot V_{cabeza} = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot H + 2 \cdot \frac{\pi}{6} \cdot D^2 \cdot h$$

$$V_T = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot H + \frac{\pi}{3} \cdot D^2 \cdot h$$

donde:

- $V_T$  = Volumen total del depósito de almacenamiento de *n*-butano, 200 m<sup>3</sup>.
- $D$  = Diámetro interno del cilindro, m.
- $H$  = Altura del cuerpo cilíndrico, m.
- $h$  = Altura de la elipse de la cabeza o del fondo, m.

Si además recordamos las siguientes relaciones que aparecían en la figura 2:

$$D = \frac{2}{3} \cdot H ; H = \frac{3}{2} \cdot D$$

$$h = \frac{D}{4}$$

Podemos sustituir estas relaciones en la expresión para el cálculo del  $V_T$  hallado anteriormente de forma que obtenemos la siguiente ecuación:

$$V_T = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot \frac{3}{2} \cdot D + \frac{\pi}{3} \cdot D^2 \cdot \frac{D}{4} = \frac{3 \cdot \pi}{8} \cdot D^3 + \frac{\pi}{12} \cdot D^3$$

$$V_T = \pi \cdot D^3 \cdot \left( \frac{3}{8} + \frac{1}{12} \right)$$

Así pues, el diámetro del tanque se puede calcular despejando de la ecuación anterior y, con él, el resto de los parámetros. De esta forma se obtienen los siguientes resultados:

$$D = \sqrt[3]{\frac{V_T}{\pi \cdot \left( \frac{3}{8} + \frac{1}{12} \right)}} = \sqrt[3]{\frac{200}{\pi \cdot \left( \frac{3}{8} + \frac{1}{12} \right)}} = 5.18 \text{ m}$$

$$H = \frac{3}{2} \cdot D = \frac{3}{2} \cdot 5.18 = 7.77 \text{ m}$$

$$h = \frac{D}{4} = \frac{5.18}{4} = 1.30 \text{ m}$$

Y la altura del tanque será la suma de las longitudes de las tres partes que lo forman: carcasa, cabeza y fondo.

$$H_T = H + 2 \cdot h = 7.77 + 2 \cdot 1.30 = 10.37 \text{ m}$$

Seguidamente se calcularán los espesores del depósito. Se calculan por separado los espesores para el cuerpo cilíndrico y para la cabeza y el fondo.

Para el cuerpo cilíndrico tenemos la siguiente expresión:

$$t_{cilindro} = \frac{\rho \cdot d \cdot r}{\sigma_T \cdot E_S} + t_{corrosión}$$

donde:

- $t_{cilindro}$  = espesor del cuerpo cilíndrico, cm.
- $\rho$  = densidad del producto almacenado,  $1313.3 \cdot 10^{-6} \text{ kg/cm}^3$  para el AM en las condiciones en las que se encuentra en el tanque.
- $d$  = nivel máximo de producto almacenado, en este caso será de 1000 cm.
- $r$  = radio del cilindro, 259 cm.
- $\sigma_T$  = tensión máxima admisible del material,  $\text{kg/cm}^2$ .
- $E_S$  = eficiencia de soldadura según tipo de soldadura. En este caso se va a hacer una junta soldada a tope en doble V y no examinada, tomando la eficiencia un valor de 0.6.
- $t_{corrosión}$  = espesor que desaparecerá debido a la corrosión durante la vida útil del tanque. Tomando que anualmente el espesor disminuya 1.024 mm debido a la corrosión y suponiendo una vida útil de 10 años, este término tendrá un valor de 1.024 cm.

Es necesario calcular la tensión máxima admisible del material,  $\sigma_T$ , que es el resultado de dividir la tensión admisible del material por el coeficiente de seguridad aplicado en cada caso, según se indica en la siguiente expresión:

$$\sigma_T = \frac{\sigma_a}{n}$$

donde:

- $\sigma_a$  = tensión admisible del material. En este caso se escoge acero inoxidable AISI-316, que tiene una tensión admisible de 3663 kg/cm<sup>2</sup>.
- $n$  = coeficiente de seguridad, se tomará un valor de 2.

Sustituyendo estos datos en la expresión anterior se tiene que:

$$\sigma_T = \frac{\sigma_a}{n} = \frac{3663}{2} = 1831.5 \text{ kg/cm}^2$$

Luego ya se conocen todos los términos necesarios para calcular el espesor del cuerpo cilíndrico mediante la expresión:

$$t_{cilindro} = \frac{\rho \cdot d \cdot r}{\sigma_T \cdot E_S} + t_{corrosión} = \frac{1313.3 \cdot 10^{-6} \cdot 1000 \cdot 259}{1831.5 \cdot 0.6} + 1.024 = 1.334 \text{ cm}$$

Las placas de acero utilizadas para el cuerpo cilíndrico del tanque de almacenamiento de *n*-butano tendrán un espesor de 13.4 mm.

Para calcular los espesores de la cabeza y del fondo elipsoidales utilizaremos la ecuación:

$$t_{cabeza} = \frac{P \cdot D_e}{2 \cdot \sigma_T \cdot E_S + 1.8 \cdot P} + t_{corrosión}$$

donde:

- $t_{cabeza}$  = espesor de la cabeza, cm.
- $P$  = Presión de proyecto, kg/cm<sup>2</sup>.
- $D_e$  = Diámetro externo del cuerpo cilíndrico. Como ya se ha calculado el espesor, este dato se conoce, 520.7 cm.

La presión de proyecto para el diseño de los recipientes debe ser mayor que la máxima de:

$$P > 1.1 \cdot \text{Presión máxima de operación} = 1.1 \cdot 1.808 = 1.989 \text{ kg/cm}^2$$

$$P > 1 \text{ kg/cm}^2 + \text{Presión máxima de operación} = 1 + 1.808 = 2.808 \text{ kg/cm}^2$$

La presión máxima de operación son 1.75 atm. La presión de proyecto tiene un valor de 2.808 kg/cm<sup>2</sup>.

Ya podemos calcular el espesor mediante la expresión anterior:

$$t_{cabeza} = \frac{P \cdot D_e}{2 \cdot \sigma_T \cdot E_S + 1.8 \cdot P} + t_{corrosión} = \frac{2.808 \cdot 520.7}{2 \cdot 1831.5 \cdot 0.6 + 1.8 \cdot 2.808} + 1.024 = 1.688 \text{ cm}$$

Las placas de acero utilizadas para la cabeza y el fondo elipsoidales del depósito de alimentación tendrán un espesor de 16.9 mm.

<b>Equipo:</b>	Tanque de almacenamiento de residuos
<b>Referencia:</b>	T-206
<b>Producto que almacena:</b>	Residuos, compuestos más ligeros que el AM

Los subproductos se van a almacenar en el tanque de almacenamiento de residuos a una temperatura de 25 °C aproximadamente, y a una presión de 1.75 atm, a la espera de que una empresa de tratamiento de residuos nos retire estos subproductos. En estas condiciones los residuos se encuentran en estado líquido, con una densidad de 1017.4 kg/m<sup>3</sup>. Por tanto, dividiendo los 13 kg/h de subproductos producidos entre su densidad, obtenemos un caudal volumétrico de 0.013 m<sup>3</sup>/h. Con esta cantidad volumétrica producida a la hora, diariamente se necesitarán almacenar 0.312 m<sup>3</sup>.

Se optará por colocar un depósito de 20 m<sup>3</sup>, de forma que podamos almacenar en planta residuos durante algo más de 2 meses de producción. Seguidamente se calculan las dimensiones de la unidad.

El tanque tendrá una disposición vertical, con un cuerpo cilíndrico y fondo y cabeza de tipo elipsoidal 2:1. Por lo tanto, el volumen se puede calcular como:

$$V_{cilindro} = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot H$$

$$V_{cabeza} = \frac{\pi}{6} \cdot D^2 \cdot h$$

Debemos de recordar que tanto la cabeza como el fondo del depósito son de tipo elipsoidal 2:1, por lo que el volumen de ambos es igual. Por tanto, el volumen total del tanque lo podemos calcular como la suma de los tres anteriores:

$$V_T = V_{cilindro} + 2 \cdot V_{cabeza} = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot H + 2 \cdot \frac{\pi}{6} \cdot D^2 \cdot h$$

$$V_T = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot H + \frac{\pi}{3} \cdot D^2 \cdot h$$

donde:

- $V_T$  = Volumen total del depósito de almacenamiento de *n*-butano, 20 m<sup>3</sup>.
- $D$  = Diámetro interno del cilindro, m.
- $H$  = Altura del cuerpo cilíndrico, m.
- $h$  = Altura de la elipse de la cabeza o del fondo, m.

Si además recordamos las siguientes relaciones que aparecían en la figura 2:

$$D = \frac{2}{3} \cdot H ; H = \frac{3}{2} \cdot D$$

$$h = \frac{D}{4}$$

Podemos sustituir estas relaciones en la expresión para el cálculo del  $V_T$  hallado anteriormente de forma que obtenemos la siguiente ecuación:

$$V_T = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot \frac{3}{2} \cdot D + \frac{\pi}{3} \cdot D^2 \cdot \frac{D}{4} = \frac{3 \cdot \pi}{8} \cdot D^3 + \frac{\pi}{12} \cdot D^3$$

$$V_T = \pi \cdot D^3 \cdot \left( \frac{3}{8} + \frac{1}{12} \right)$$

Así pues, el diámetro del tanque se puede calcular despejando de la ecuación anterior y, con él, el resto de los parámetros. De esta forma se obtienen los siguientes resultados:

$$D = \sqrt[3]{\frac{V_T}{\pi \cdot \left( \frac{3}{8} + \frac{1}{12} \right)}} = \sqrt[3]{\frac{20}{\pi \cdot \left( \frac{3}{8} + \frac{1}{12} \right)}} = 2.40 \text{ m}$$

$$H = \frac{3}{2} \cdot D = \frac{3}{2} \cdot 2.40 = 3.60 \text{ m}$$

$$h = \frac{D}{4} = \frac{2.40}{4} = 0.60 \text{ m}$$

Y la altura del tanque será la suma de las longitudes de las tres partes que lo forman: carcasa, cabeza y fondo.

$$H_T = H + 2 \cdot h = 3.60 + 2 \cdot 0.60 = 4.80 \text{ m}$$

Seguidamente se calcularán los espesores del depósito. Se calculan por separado los espesores para el cuerpo cilíndrico y para la cabeza y el fondo.

Para el cuerpo cilíndrico tenemos la siguiente expresión:

$$t_{cilindro} = \frac{\rho \cdot d \cdot r}{\sigma_T \cdot E_S} + t_{corrosión}$$

donde:

- $t_{cilindro}$  = espesor del cuerpo cilíndrico, cm.
- $\rho$  = densidad del producto almacenado,  $1017.4 \cdot 10^{-6} \text{ kg/cm}^3$  para el residuo en las condiciones en las que se encuentra en el tanque.
- $d$  = nivel máximo de producto almacenado, en este caso será de 450 cm.
- $r$  = radio del cilindro, 180 cm.
- $\sigma_T$  = tensión máxima admisible del material,  $\text{kg/cm}^2$ .
- $E_S$  = eficiencia de soldadura según tipo de soldadura. En este caso se va a hacer una junta soldada a tope en doble V y no examinada, tomando la eficiencia un valor de 0.6.
- $t_{corrosión}$  = espesor que desaparecerá debido a la corrosión durante la vida útil del tanque. Tomando que anualmente el espesor disminuya 1.024 mm debido a la corrosión y suponiendo una vida útil de 10 años, este término tendrá un valor de 1.024 cm.

Es necesario calcular la tensión máxima admisible del material,  $\sigma_T$ , que es el resultado de dividir la tensión admisible del material por el coeficiente de seguridad aplicado en cada caso, según se indica en la siguiente expresión:

$$\sigma_T = \frac{\sigma_a}{n}$$

donde:

- $\sigma_a$  = tensión admisible del material. En este caso se escoge acero inoxidable AISI-316, que tiene una tensión admisible de 3663 kg/cm<sup>2</sup>.
- $n$  = coeficiente de seguridad, se tomará un valor de 2.

Sustituyendo estos datos en la expresión anterior se tiene que:

$$\sigma_T = \frac{\sigma_a}{n} = \frac{3663}{2} = 1831.5 \text{ kg/cm}^2$$

Luego ya se conocen todos los términos necesarios para calcular el espesor del cuerpo cilíndrico mediante la expresión:

$$t_{cilindro} = \frac{\rho \cdot d \cdot r}{\sigma_T \cdot E_s} + t_{corrosión} = \frac{1017.4 \cdot 10^{-6} \cdot 450 \cdot 180}{1831.5 \cdot 0.6} + 1.024 = 1.099 \text{ cm}$$

Las placas de acero utilizadas para el cuerpo cilíndrico del tanque de almacenamiento de *n*-butano tendrán un espesor de 11.0 mm.

Para calcular los espesores de la cabeza y del fondo elipsoidales utilizaremos la ecuación:

$$t_{cabeza} = \frac{P \cdot D_e}{2 \cdot \sigma_T \cdot E_s + 1.8 \cdot P} + t_{corrosión}$$

donde:

- $t_{cabeza}$  = espesor de la cabeza, cm.
- $P$  = Presión de proyecto, kg/cm<sup>2</sup>.
- $D_e$  = Diámetro externo del cuerpo cilíndrico. Como ya se ha calculado el espesor, este dato se conoce, 262 cm.

La presión de proyecto para el diseño de los recipientes debe ser mayor que la máxima de:

$$P > 1.1 \cdot \text{Presión máxima de operación} = 1.1 \cdot 1.808 = 1.989 \text{ kg/cm}^2$$

$$P > 1 \text{ kg/cm}^2 + \text{Presión máxima de operación} = 1 + 1.808 = 2.808 \text{ kg/cm}^2$$

La presión máxima de operación son 5 atm. La presión de proyecto tiene un valor de 2.808 kg/cm<sup>2</sup>.

Ya podemos calcular el espesor mediante la expresión anterior:

$$t_{cabeza} = \frac{P \cdot D_e}{2 \cdot \sigma_T \cdot E_s + 1.8 \cdot P} + t_{corrosión} = \frac{2.808 \cdot 262}{2 \cdot 1831.5 \cdot 0.6 + 1.8 \cdot 2.808} + 1.024 = 1.358 \text{ cm}$$

Las placas de acero utilizadas para la cabeza y el fondo elipsoidales del depósito de alimentación tendrán un espesor de 13.6 mm.

<b>Equipo:</b>	Tanque de almacenamiento de residuos
<b>Referencia:</b>	T-207
<b>Producto que almacena:</b>	Residuos, purga de ftalato de dibutilo

El ftalato de dibutilo purgado se va a almacenar en otro tanque de almacenamiento de residuos a una temperatura de 25 °C aproximadamente, y a una presión de 1.75 atm, a la espera de que una empresa de tratamiento de residuos nos retire este disolvente. En estas condiciones el residuo se encuentra en estado líquido, con una densidad de 1041.6 kg/m<sup>3</sup>. Por tanto, dividiendo los 10 kg/h de disolvente purgado entre su densidad, obtenemos un caudal volumétrico de 0.0096 m<sup>3</sup>/h. Con esta cantidad volumétrica producida a la hora, diariamente se necesitarán almacenar 0.230 m<sup>3</sup>.

Se optará por colocar un depósito de 10 m<sup>3</sup>, de forma que podamos almacenar en planta disolvente para algo menos de mes y medio de producción. Seguidamente se calculan las dimensiones de la unidad.

El tanque tendrá una disposición vertical, con un cuerpo cilíndrico y fondo y cabeza de tipo elipsoidal 2:1. Por lo tanto, el volumen se puede calcular como:

$$V_{cilindro} = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot H$$

$$V_{cabeza} = \frac{\pi}{6} \cdot D^2 \cdot h$$

Debemos de recordar que tanto la cabeza como el fondo del depósito son de tipo elipsoidal 2:1, por lo que el volumen de ambos es igual. Por tanto, el volumen total del tanque lo podemos calcular como la suma de los tres anteriores:

$$V_T = V_{cilindro} + 2 \cdot V_{cabeza} = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot H + 2 \cdot \frac{\pi}{6} \cdot D^2 \cdot h$$

$$V_T = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot H + \frac{\pi}{3} \cdot D^2 \cdot h$$

donde:

- $V_T$  = Volumen total del depósito de almacenamiento de *n*-butano, 10 m<sup>3</sup>.
- $D$  = Diámetro interno del cilindro, m.
- $H$  = Altura del cuerpo cilíndrico, m.
- $h$  = Altura de la elipse de la cabeza o del fondo, m.

Si además recordamos las siguientes relaciones que aparecían en la figura 2:

$$D = \frac{2}{3} \cdot H ; H = \frac{3}{2} \cdot D$$

$$h = \frac{D}{4}$$

Podemos sustituir estas relaciones en la expresión para el cálculo del  $V_T$  hallado anteriormente de forma que obtenemos la siguiente ecuación:

$$V_T = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot \frac{3}{2} \cdot D + \frac{\pi}{3} \cdot D^2 \cdot \frac{D}{4} = \frac{3 \cdot \pi}{8} \cdot D^3 + \frac{\pi}{12} \cdot D^3$$

$$V_T = \pi \cdot D^3 \cdot \left( \frac{3}{8} + \frac{1}{12} \right)$$

Así pues, el diámetro del tanque se puede calcular despejando de la ecuación anterior y, con él, el resto de los parámetros. De esta forma se obtienen los siguientes resultados:

$$D = \sqrt[3]{\frac{V_T}{\pi \cdot \left( \frac{3}{8} + \frac{1}{12} \right)}} = \sqrt[3]{\frac{10}{\pi \cdot \left( \frac{3}{8} + \frac{1}{12} \right)}} = 1.91 \text{ m}$$

$$H = \frac{3}{2} \cdot D = \frac{3}{2} \cdot 1.91 = 2.87 \text{ m}$$

$$h = \frac{D}{4} = \frac{1.91}{4} = 0.48 \text{ m}$$

Y la altura del tanque será la suma de las longitudes de las tres partes que lo forman: carcasa, cabeza y fondo.

$$H_T = H + 2 \cdot h = 2.87 + 2 \cdot 0.48 = 3.83 \text{ m}$$

Seguidamente se calcularán los espesores del depósito. Se calculan por separado los espesores para el cuerpo cilíndrico y para la cabeza y el fondo.

Para el cuerpo cilíndrico tenemos la siguiente expresión:

$$t_{cilindro} = \frac{\rho \cdot d \cdot r}{\sigma_T \cdot E_S} + t_{corrosión}$$

donde:

- $t_{cilindro}$  = espesor del cuerpo cilíndrico, cm.
- $\rho$  = densidad del producto almacenado,  $1041.6 \cdot 10^{-6} \text{ kg/cm}^3$  para el residuo de ftalato de dibutilo en las condiciones en las que se encuentra en el tanque.
- $d$  = nivel máximo de producto almacenado, en este caso será de 350 cm.
- $r$  = radio del cilindro, 95.5 cm.
- $\sigma_T$  = tensión máxima admisible del material,  $\text{kg/cm}^2$ .
- $E_S$  = eficiencia de soldadura según tipo de soldadura. En este caso se va a hacer una junta soldada a tope en doble V y no examinada, tomando la eficiencia un valor de 0.6.
- $t_{corrosión}$  = espesor que desaparecerá debido a la corrosión durante la vida útil del tanque. Tomando que anualmente el espesor disminuya 1.024 mm



debido a la corrosión y suponiendo una vida útil de 10 años, este término tendrá un valor de 1.024 cm.

Es necesario calcular la tensión máxima admisible del material,  $\sigma_T$ , que es el resultado de dividir la tensión admisible del material por el coeficiente de seguridad aplicado en cada caso, según se indica en la siguiente expresión:

$$\sigma_T = \frac{\sigma_a}{n}$$

donde:

- $\sigma_a$  = tensión admisible del material. En este caso se escoge acero inoxidable AISI-316, que tiene una tensión admisible de 3663 kg/cm<sup>2</sup>.
- $n$  = coeficiente de seguridad, se tomará un valor de 2.

Sustituyendo estos datos en la expresión anterior se tiene que:

$$\sigma_T = \frac{\sigma_a}{n} = \frac{3663}{2} = 1831.5 \text{ kg/cm}^2$$

Luego ya se conocen todos los términos necesarios para calcular el espesor del cuerpo cilíndrico mediante la expresión:

$$t_{cilindro} = \frac{\rho \cdot d \cdot r}{\sigma_T \cdot E_s} + t_{corrosión} = \frac{1041.6 \cdot 10^{-6} \cdot 350 \cdot 95.5}{1831.5 \cdot 0.6} + 1.024 = 1.056 \text{ cm}$$

Las placas de acero utilizadas para el cuerpo cilíndrico del tanque de almacenamiento de *n*-butano tendrán un espesor de 10.6 mm.

Para calcular los espesores de la cabeza y del fondo elipsoidales utilizaremos la ecuación:

$$t_{cabeza} = \frac{P \cdot D_e}{2 \cdot \sigma_T \cdot E_s + 1.8 \cdot P} + t_{corrosión}$$

donde:

- $t_{cabeza}$  = espesor de la cabeza, cm.
- $P$  = Presión de proyecto, kg/cm<sup>2</sup>.
- $D_e$  = Diámetro externo del cuerpo cilíndrico. Como ya se ha calculado el espesor, este dato se conoce, 193.1 cm.

La presión de proyecto para el diseño de los recipientes debe ser mayor que la máxima de:

$$P > 1.1 \cdot \text{Presión máxima de operación} = 1.1 \cdot 1.808 = 1.989 \text{ kg/cm}^2$$

$$P > 1 \text{ kg/cm}^2 + \text{Presión máxima de operación} = 1 + 1.808 = 2.808 \text{ kg/cm}^2$$

La presión máxima de operación son 5 atm. La presión de proyecto tiene un valor de 2.808 kg/cm<sup>2</sup>.

Ya podemos calcular el espesor mediante la expresión anterior:

$$t_{cabeza} = \frac{P \cdot D_e}{2 \cdot \sigma_T \cdot E_s + 1.8 \cdot P} + t_{corrosión} = \frac{2.808 \cdot 193.1}{2 \cdot 1831.5 \cdot 0.6 + 1.8 \cdot 2.808} + 1.024 = 1.270 \text{ cm}$$

Las placas de acero utilizadas para la cabeza y el fondo elipsoidales del depósito de alimentación tendrán un espesor de 12.7 mm.

## 1.3. Bombas y tuberías

### 1.3.1. Determinación del diámetro óptimo de la conducción

Un aspecto muy importante a tener en cuenta para el diseño del sistema de tuberías es el de la velocidad que alcanza el fluido por el interior de las conducciones. Dicha velocidad, en el caso de la circulación isoterma de fluidos incompresibles, viene determinada por el caudal y el diámetro de la sección interna de la conducción, y para cada fluido tiene un valor máximo que no debe ser sobrepasado, ya que de lo contrario puede producirse un deterioro del producto por tratamiento mecánico inadecuado. Los valores aproximados que se usan en la práctica dependen del tipo de fluido de que se trate, pero los más corrientes se recogen en la tabla 1. Los valores de la tabla son los más corrientes en la práctica ordinaria, sin embargo, en condiciones especiales, pueden requerirse velocidades que están fuera de los intervalos indicados. Las velocidades pequeñas han de ser las más utilizadas, especialmente cuando el flujo es por gravedad desde tanques elevados.

Tabla 1. Velocidades recomendadas para fluidos en tuberías. McCabe (2007)

Fluido	Tipo de flujo	Velocidad, m/s
Líquidos poco viscosos	Flujo por gravedad	0.15 – 0.30
	Entrada a la bomba	0.30 – 0.90
	Salida de la bomba	1.20 – 3
	Línea de conducción	1.20 – 2.40
Líquidos viscosos	Entrada a la bomba	0.06 – 0.15
	Salida de la bomba	0.15 – 0.60
Vapor de agua	En toda la conducción	9 – 15
Aire o gas	En toda la conducción	9 – 30

Para la limpieza CIP, la velocidad de las soluciones detergentes o del líquido para el aclarado, no debe ser menor de 1.5 m/s.

Así, para un caudal determinado del fluido a bombear, imponiendo la velocidad máxima del mismo, se determina de forma inmediata el diámetro mínimo de la conducción mediante la expresión:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot v}}$$

donde:

- D = Diámetro interno de la conducción, m.
- Q = Caudal, m<sup>3</sup>/s.
- v = Velocidad, m/s.

Deberá escogerse, en cualquier caso, el diámetro normalizado inmediatamente superior a dicho valor mínimo. Dicho valor es lo que se conoce como diámetro óptimo de la conducción, pues representa el menor coste posible, cumpliendo las exigencias en cuanto a la velocidad de máxima circulación del fluido por la misma.

Al ser el diámetro final mayor que el mínimo es necesario recalcular la velocidad, siendo ésta la velocidad real en la conducción. Para ello se utiliza la siguiente ecuación:

$$v = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D^2}$$

### 1.3.2. Cálculo de las pérdidas de carga

El rozamiento de un fluido con las paredes de la tubería por la que circula provoca en el mismo una caída de presión. Conocer el valor de esta caída de presión es necesario de cara al cálculo de las bombas, pero también para comprobar que el diámetro elegido para la conducción es suficiente, pues de ser éste muy pequeño, la pérdida de carga que se produzca será muy elevada. En este sentido se consideran valores razonables de caída de presión en una conducción los siguientes (para caudales de 0 a 60 m<sup>3</sup>/h):

- Zona de aspiración de bombas: 0.40 kg/cm<sup>2</sup> (0.39 bar)
- Zona de impulsión de bombas: 0.60 a 0.80 kg/cm<sup>2</sup> (0.59 a 0.78 bar)

De esta forma, al realizar el cálculo de las pérdidas de carga se procurará que, en la medida de lo posible, no superen los valores anteriores. Si esto sucediere habrá que aumentar el diámetro de la conducción por encima del que recomienda la velocidad de circulación máxima del fluido, de modo que la pérdida de carga disminuya. Sin embargo, en algunos casos, no será posible incrementar dicho valor ya que éste se halla igualmente limitado por el diámetro de las conexiones de los equipos (sobre el que ha de informar el fabricante).

Para calcular las pérdidas de carga en una conducción se utilizará la ecuación de Fanning, que expresada en términos de altura es la siguiente:

$$H = \left( \frac{4 \cdot f \cdot L}{d} \right) \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g}$$

donde:

- H es la pérdida de carga en metros de columna de líquido, m.c.l.
- f es un coeficiente de fricción adimensional.

- $L$  es la longitud total de la tubería, m. Engloba la longitud efectiva del tramo recto más la longitud equivalente de los accesorios que se encuentran en el mismo.
- $d$  es el diámetro interno de la tubería, m.
- $v$  es la velocidad de flujo del fluido, m/s.
- $g$  es la aceleración de la gravedad,  $9.81 \text{ m/s}^2$ .

Antes de poder calcular las pérdidas de carga en la conducción se debe conocer el factor de fricción y las longitudes equivalentes de los accesorios.

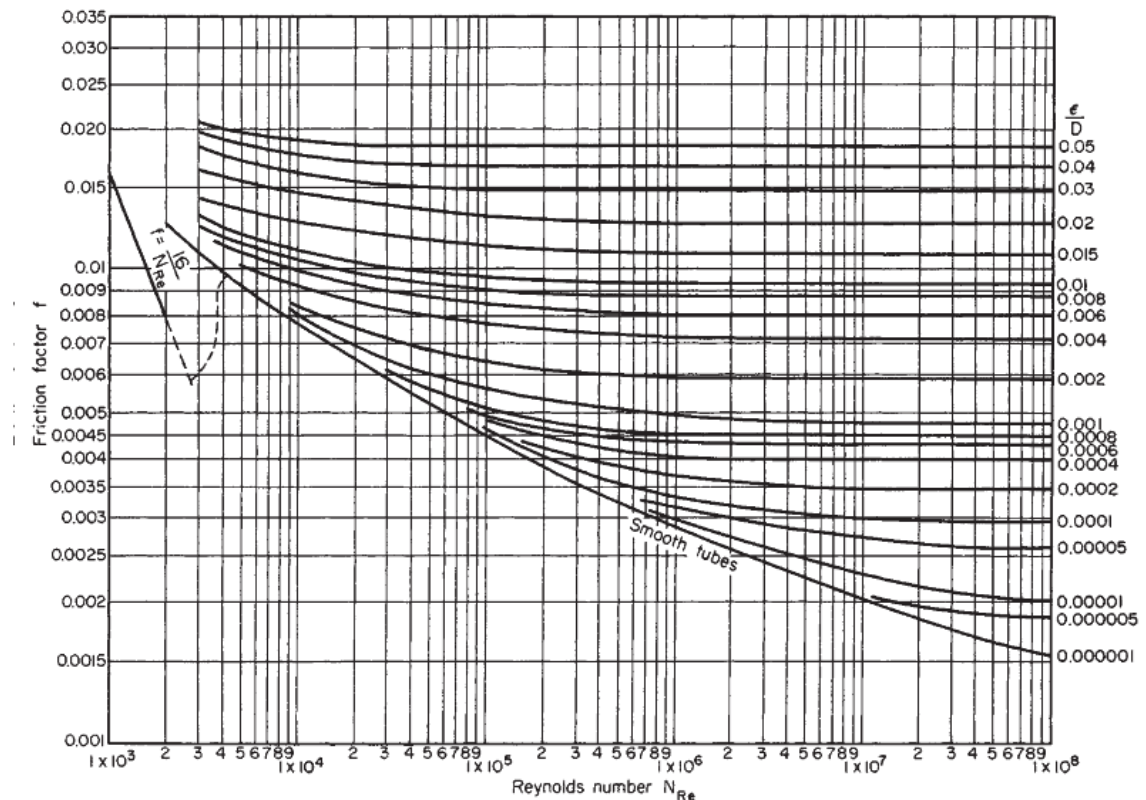
El coeficiente de fricción,  $f$ , es función del tipo de flujo y se calcula del modo siguiente:

- Si el flujo es laminar ( $Re \leq 2000$ ):

$$f = \frac{16}{Re}$$

- Si el flujo es turbulento ( $Re \geq 4000$ ) o pertenece a la llamada zona de transición ( $2000 < Re < 4000$ ) se recurre a diagramas como el de Moody (figura 3) que expresa la relación entre  $f$ , el número de Reynolds ( $Re$ ) y un parámetro conocido como rugosidad relativa de la conducción, que se representa como  $\varepsilon/d$  (donde  $d$  sigue siendo el diámetro interno de la conducción) y que se encuentra tabulado para distintos materiales. En concreto, para tubos de acero inoxidable el valor de diseño de  $\varepsilon$  es de 0.006 cm.

Figura 3. Gráfico de Moody.



Por tanto para calcular las pérdidas de carga se hace necesario caracterizar el tipo de flujo que se da en la conducción, para lo que es preciso conocer el número de Reynolds, el cual se calcula mediante la expresión siguiente:

$$\text{Re} = \frac{d \cdot v \cdot \rho}{\mu}$$

donde:

- $d$  es el diámetro interno de la tubería, m.
- $v$  es la velocidad de flujo del fluido, m/s.
- $\rho$  es la densidad del fluido,  $\text{kg/m}^3$ .
- $\mu$  es la viscosidad dinámica del fluido, Pa·s

Todo lo anterior es válido para fluidos newtonianos pero si el fluido no es de esta clase será necesario, para calcular el factor de fricción de Fanning, recurrir a un gráfico de Moody modificado en el que se usa el número de Reynolds generalizado, que se calcula mediante la expresión siguiente:

$$\text{Re}' = \frac{d^n \cdot v^{(n-1)} \cdot \rho}{\mu}$$

donde  $n$  es el exponente de la ley de la potencia para el fluido en cuestión.

A pesar de que la longitud que figura en la ecuación de Fanning se refiere a la de la conducción, los accesorios incluidos en la misma (válvulas, codos, tes, reducciones, etc.) provocan también una pérdida de carga en el fluido, que ha de ser tenida en cuenta en la ecuación anterior. La forma más usual de considerar dicha pérdida de carga es a través del concepto de longitud equivalente. Por longitud equivalente de un accesorio determinado se entiende la longitud de un tramo recto de tubería capaz de producir la misma pérdida de carga que estos elementos. Así la longitud de tubo que se usa en la ecuación de Fanning es la suma de la longitud efectiva de la tubería recta y la longitud equivalente de los accesorios insertos en ella. Dichas longitudes equivalentes se encuentran tabuladas para distintos tipos de accesorios en función de las dimensiones de la tubería. A continuación se incluye la tabla 2 con valores adecuados para estas longitudes equivalentes:

Tabla 2. Longitudes equivalentes de diferentes accesorios (en pies). Branam (2005)

Nominal Pipe size in.	Globe valve or ball check valve	Angle valve	Swing check valve	Plug cock	Gate or ball valve	45° ell					90° miter bends			Enlargement				Contraction						
						Weld thrd	Short rad. ell	Long rad. ell	Hard T.	Soft T.	2 miter	3 miter	4 miter	Sudden		Std. red.		Sudden		Std. red.				
														d/D = %	d/D = %	d/D = %	d/D = %	d/D = %	d/D = %	d/D = %	d/D = %			
						Equiv. L in terms of small d																		
1 1/2	55	28	13	7	1	12	35	23	8	9	23				5	3	1	4	1	3	2	1	1	—
2	70	33	17	14	2	23	45	34	10	11	34				7	4	1	5	1	3	3	1	1	—
2 1/2	80	40	20	11	2	5	5	3	12	3	3				8	5	2	6	2	4	3	2	2	—
3	100	50	25	17	2	6	6	4	14	4	4				10	6	2	8	2	5	4	2	2	—
4	130	65	32	30	3	7	7	5	19	5	5				12	8	3	10	3	6	5	3	3	—
6	200	100	48	70	4	11	11	8	28	8	8				18	12	4	14	4	9	7	4	4	1
8	260	125	64	120	6	15	15	9	37	9	9				26	16	5	19	5	12	9	5	5	2
10	330	160	80	170	7	19	19	12	47	12	12				31	20	7	24	7	15	12	6	6	2
12	400	190	95	170	9	22	22	14	55	14	14	28	21	20	37	24	8	28	8	18	14	7	7	2
14	450	210	105	80	10	26	26	16	62	16	16	32	24	22	42	26	9	—	—	20	16	8	—	—
16	500	240	120	145	11	29	29	18	72	18	18	38	27	24	47	30	10	—	—	24	18	9	—	—
18	550	280	140	160	12	33	33	20	82	20	20	42	30	28	53	35	11	—	—	26	20	10	—	—
20	650	300	155	210	14	36	36	23	90	23	23	46	33	32	60	38	13	—	—	30	23	11	—	—
22	688	335	170	225	15	40	40	25	100	25	25	52	36	34	65	42	14	—	—	32	25	12	—	—
24	750	370	185	254	16	44	44	27	110	27	27	56	39	36	70	46	15	—	—	35	27	13	—	—
30	—	—	—	312	21	55	55	40	140	40	40	70	51	44	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
36	—	—	—	—	25	66	66	47	170	47	47	84	60	52	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
42	—	—	—	—	30	77	77	55	200	55	55	98	69	64	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
48	—	—	—	—	35	88	88	65	220	65	65	112	81	72	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
54	—	—	—	—	40	99	99	70	250	70	70	126	90	80	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
60	—	—	—	—	45	110	110	80	260	80	80	130	99	92	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Las longitudes equivalentes de los accesorios que nosotros vamos a utilizar se calculan en función del diámetro, según los valores indicados en la tabla 3. El resultado obtenido se sumará a la longitud efectiva del tramo recto para calcular la longitud total de la conducción:

Tabla 3. Longitudes equivalentes de los accesorios de las tuberías.

<b>Válvula de asiento (abierta la mitad)</b>	475·D
<b>Válvula de compuerta (abierta)</b>	8.5·D
<b>Válvula de bola (abierta)</b>	4.8·D
<b>Válvula anti-retorno (abierta)</b>	100·D
<b>Codo 45°</b>	15·D
<b>Codo 90°</b>	35·D
<b>Entrada T</b>	90·D
<b>Salida T</b>	60·D

Para establecer el número de válvulas a colocar se debe tener en cuenta la disposición de las bombas reflejada en los diagramas de flujo y la necesidad de derivar el flujo. La colocación de las bombas responde a los criterios que se establecerán posteriormente en el apartado correspondiente.

Otros elementos que forman parte de las líneas de proceso y que pueden provocar elevadas caídas de presión por fricción, son los propios equipos. Entre éstos los que más pérdidas de carga provocan son los filtros y los cambiadores de calor, especialmente los de placas. A continuación se presentan, a modo de ejemplo, valores aproximados para las pérdidas de carga provocadas por dichos equipos. Para obtener información para otros equipos hay que remitirse en casi todos los casos al fabricante (catálogos, páginas web o consulta directa al proveedor).

- Filtros de tela o malla metálica: 1 bar/elemento filtrante.
- Cambiadores de calor de placas: 1 bar por cada sección del mismo que atravesase el producto.

Los cálculos realizados se presentan en la siguiente tabla:



Tabla 4. Cálculo de las tuberías.

Tramo	Caudal, m <sup>3</sup> /h	Vel. máx., m/s	D interno mínimo, cm	DN, pulg.	D interno final, cm	Espesor, cm	Vel., m/s	Re	$\epsilon/d$	f	L tubería recta, m	L equiv., m	L total, m	H, m.c.l.
1-1-AMP	86	0,6	22,52	10	26,62	0,340	0,43	114243	0,0002	0,004660	4,20	28,26	32,46	0,02
2-1-AMP	86	0,6	22,52	10	26,62	0,340	0,43	114243	0,0002	0,004660	4,20	28,26	32,46	0,02
3-1-AMP	86	0,6	22,52	10	26,62	0,340	0,43	114243	0,0002	0,004660	1,04	26,90	27,94	0,02
4-1-AMP	86	2,1	12,03	5	13,58	0,277	1,65	224040	0,0004	0,004535	68,85	94,25	163,10	3,02
5-1-AMP	86	2,1	12,03	5	13,58	0,277	1,65	224040	0,0004	0,004535	6,65	18,86	25,51	0,47
6-1-AMP	86	2,1	12,03	5	13,58	0,277	1,65	224040	0,0004	0,004535	6,65	18,86	25,51	0,47
7-1-AMP	86	2,1	12,03	5	13,58	0,277	1,65	224040	0,0004	0,004535	6,65	18,86	25,51	0,47
8-1-AMP	86	2,1	12,03	5	13,58	0,277	1,65	224040	0,0004	0,004535	6,65	18,86	25,51	0,47
9-1-AMP	86	2,1	12,03	5	13,58	0,277	1,65	224040	0,0004	0,004535	6,65	18,86	25,51	0,47
10-1-AMP	86	2,1	12,03	5	13,58	0,277	1,65	224040	0,0004	0,004535	6,65	18,86	25,51	0,47
11-1-AMP	86	2,1	12,03	5	13,58	0,277	1,65	224040	0,0004	0,004535	6,65	18,86	25,51	0,47
12-1-AMP	86	2,1	12,03	5	13,58	0,277	1,65	224040	0,0004	0,004535	6,65	18,86	25,51	0,47
13-2-AMP	2,18	0,6	3,58	1 1/4	3,89	0,165	0,51	19840	0,0015	0,007253	6,38	2,89	9,27	0,09
14-2-AMP	2,18	0,6	3,58	1 1/4	3,89	0,165	0,51	19840	0,0015	0,007253	6,38	2,89	9,27	0,09
15-2-AMP	2,18	0,6	3,58	1 1/4	3,89	0,165	0,51	19840	0,0015	0,007253	6,38	2,89	9,27	0,09
16-2-AMP	2,18	0,6	3,58	1 1/4	3,89	0,165	0,51	19840	0,0015	0,007253	6,38	2,89	9,27	0,09
17-2-AMP	2,18	0,6	3,58	1 1/4	3,89	0,165	0,51	19840	0,0015	0,007253	6,38	2,89	9,27	0,09
18-2-AMP	2,18	0,6	3,58	1 1/4	3,89	0,165	0,51	19840	0,0015	0,007253	6,38	2,89	9,27	0,09
19-2-AMP	2,18	0,6	3,58	1 1/4	3,89	0,165	0,51	19840	0,0015	0,007253	6,38	2,89	9,27	0,09
20-2-AMP	2,18	0,6	3,58	1 1/4	3,89	0,165	0,51	19840	0,0015	0,007253	6,38	2,89	9,27	0,09
21-2-AMP	2,18	0,6	3,58	1 1/4	3,89	0,165	0,51	19840	0,0015	0,007253	71,71	32,55	104,26	1,03

<b>22-2-PR</b>	2,18	2,1	1,92	3/4	2,34	0,165	1,41	32995	0,0026	0,007254	27,66	17,88	45,54	5,75
<b>23-3-PR</b>	150	20	5,15	2	5,70	0,165	16,32	45713	0,0011	0,006166	10,10	4,22	14,32	84,05
<b>24-4-PR</b>	186	20	5,74	2 1/2	6,88	0,211	13,89	46975	0,0009	0,006009	14,74	37,94	52,68	181,08
<b>25-5-PR</b>	30060	30	59,53	24	59,85	0,554	29,68	872773	0,0001	0,003411	5,75	298,34	304,09	311,19
<b>26-6-PR</b>	18388	30	46,56	20	49,84	0,478	26,18	641074	0,0001	0,003518	21,14	71,02	92,16	90,86
<b>27-7-PR</b>	20523	30	49,19	20	49,84	0,478	29,22	715508	0,0001	0,003477	10,44	35,56	46,00	55,84
<b>28-8-PR</b>	43896	30	71,94	30	74,93	0,635	27,65	1018039	0,0001	0,003365	9,10	30,33	39,43	27,60
<b>29-8-PR</b>	43896	30	71,94	30	74,93	0,635	27,65	1018039	0,0001	0,003365	4,84	133,20	138,04	96,63
<b>30-9-PR</b>	35325	30	64,53	30	74,93	0,635	22,25	819260	0,0001	0,003431	5,00	0,00	5,00	2,31
<b>31-10-PR</b>	27724	30	57,17	24	59,85	0,554	27,37	804949	0,0001	0,003437	10,70	45,60	56,30	49,38
<b>32-10-SE</b>	27724	30	57,17	24	59,85	0,554	27,37	804949	0,0001	0,003437	7,91	63,89	71,80	62,97
<b>33-11-SE</b>	17	1,8	5,78	2 1/2	6,88	0,211	1,27	87380	0,0009	0,005553	6,50	5,11	11,61	0,31
<b>34-12-SE</b>	1,04	0,6	2,48	1	3,01	0,165	0,41	12220	0,0020	0,008138	28,67	4,96	33,63	0,31
<b>35-12-PU</b>	1,04	2,1	1,32	3/8	1,38	0,165	1,92	26571	0,0043	0,008146	10,83	1,86	12,69	5,61
<b>36-13-PU</b>	1,11	1,8	1,48	1/2	1,80	0,165	1,21	21769	0,0033	0,007924	6,80	1,49	8,29	1,08
<b>37-14-PU</b>	1,14	1,8	1,50	1/2	1,80	0,165	1,24	22357	0,0033	0,007898	69,46	3,17	72,63	9,97
<b>38-14-APT</b>	1,14	1,8	1,50	1/2	1,80	0,165	1,24	22357	0,0033	0,007898	3,57	2,85	6,42	0,88
<b>39-14-APT</b>	1,14	1,8	1,50	1/2	1,80	0,165	1,24	22357	0,0033	0,007898	3,57	2,85	6,42	0,88
<b>40-14-APT</b>	1,14	1,8	1,50	1/2	1,80	0,165	1,24	22357	0,0033	0,007898	3,57	2,85	6,42	0,88
<b>41-14-APT</b>	1,14	1,8	1,50	1/2	1,80	0,165	1,24	22357	0,0033	0,007898	3,57	2,85	6,42	0,88
<b>42-14-APT</b>	1,14	1,8	1,50	1/2	1,80	0,165	1,24	22357	0,0033	0,007898	3,57	2,85	6,42	0,88
<b>43-14-APT</b>	1,14	1,8	1,50	1/2	1,80	0,165	1,24	22357	0,0033	0,007898	3,57	2,85	6,42	0,88
<b>44-15-PU</b>	0,08	1,8	0,40	1/8	0,78	0,124	0,47	3628	0,0077	0,001202	93,75	1,80	95,55	0,65
<b>45-16-PU</b>	0,01	1,8	0,14	1/8	0,78	0,124	0,06	454	0,0077	0,035276	22,00	0,09	22,09	0,07
<b>46-17-SE</b>	16	0,6	9,71	3 1/3	9,74	0,211	0,60	58109	0,0006	0,005601	3,00	0,86	3,86	0,02

<b>47-17-SE</b>	16	2,1	5,19	2	5,70	0,165	1,74	99238	0,0011	0,005646	2,29	10,77	13,05	0,80
<b>48-18-SE</b>	16	1,8	5,61	2	5,70	0,165	1,74	99238	0,0011	0,005646	3,88	3,62	7,50	0,46
<b>49-18-SE</b>	16	1,8	5,61	2	5,70	0,165	1,74	99238	0,0011	0,005646	5,30	8,05	13,35	0,82
<b>50-18-SE</b>	16	1,8	5,61	2	5,70	0,165	1,74	99238	0,0011	0,005646	5,30	8,05	13,35	0,82
<b>51-20-SE</b>	16	1,8	5,61	2	5,70	0,165	1,74	99238	0,0011	0,005646	5,30	6,24	11,54	0,71
<b>52-20-SE</b>	16	1,8	5,61	2	5,70	0,165	1,74	99238	0,0011	0,005646	5,30	6,24	11,54	0,71
<b>53-20-SE</b>	16	1,8	5,61	2	5,70	0,165	1,74	99238	0,0011	0,005646	4,03	9,05	13,08	0,80
<b>54-21-SE</b>	16	1,8	5,61	2	5,70	0,165	1,74	99238	0,0011	0,005646	47,54	45,06	92,60	5,66
<b>55-22-SE</b>	0,01	1,8	0,14	1/8	0,78	0,124	0,06	454	0,0077	0,035276	36,11	2,45	38,56	0,12
<b>56-23-APT</b>	15	0,6	9,40	3 1/3	9,74	0,211	0,56	54477	0,0006	0,005658	27,02	5,28	32,30	0,12
<b>57-23-APT</b>	15	2,1	5,03	2	5,70	0,165	1,63	93036	0,0011	0,005680	26,85	8,66	35,51	1,92
<b>58-24-PR</b>	132	12	6,24	2 1/2	6,88	0,211	9,86	33337	0,0009	0,006340	17,55	49,63	67,18	122,69
<b>59-25-PR</b>	0,26	1,8	0,71	1/8	0,78	0,124	1,51	11793	0,0077	0,010002	2,26	0,87	3,13	1,87
<b>60-26-PR</b>	38	12	3,35	1 1/4	3,89	0,165	8,90	16992	0,0015	0,007457	7,49	27,18	34,67	107,40
<b>61-27-PR</b>	0,08	1,8	0,40	1/8	0,78	0,124	0,47	3628	0,0077	0,012016	2,96	0,15	3,11	0,21
<b>62-28-PR</b>	37	0,15	29,54	12	31,59	0,396	0,13	828	0,0002	0,019314	7,29	14,09	21,38	0,00
<b>63-28-PR</b>	37	0,5	16,18	6	16,27	0,277	0,49	1608	0,0004	0,009949	9,02	18,26	27,28	0,08
<b>64-29-PR</b>	36	0,15	29,13	12	31,59	0,396	0,13	806	0,0002	0,019850	1,51	2,75	4,26	0,00
<b>65-29-PR</b>	36	0,5	15,96	6	16,27	0,277	0,48	1565	0,0004	0,010225	4,41	18,26	22,67	0,07
<b>66-30-PR</b>	36	0,15	29,13	12	31,59	0,396	0,13	806	0,0002	0,019850	6,40	14,09	20,49	0,00
<b>67-30-PR</b>	36	0,5	15,96	6	16,27	0,277	0,48	1565	0,0004	0,010225	30,05	118,72	148,77	0,44
<b>68-31-PR</b>	3,62	1,8	2,67	1	3,01	0,165	1,41	42537	0,0020	0,006757	7,07	21,78	28,85	2,64
<b>69-32-PR</b>	341	12	10,03	4	11,01	0,211	9,95	53830	0,0005	0,005589	44,68	5,72	50,40	51,66
<b>70-33-PR</b>	2,4	1,8	2,17	3/4	2,34	0,165	1,55	36324	0,0026	0,007181	7,07	17,39	24,46	3,70
<b>71-34-PR</b>	2046	12	24,56	10	26,62	0,340	10,21	133544	0,0002	0,004546	38,85	30,04	68,89	24,99

<b>72-35-AMP</b>	50	0,6	17,17	8	21,35	0,277	0,39	82814	0,0003	0,005030	1,11	1,86	2,97	0,00
<b>73-35-AMP</b>	50	2,1	9,18	3 1/3	9,74	0,211	1,86	181590	0,0006	0,004883	43,17	95,71	138,88	4,94
<b>74-35-AMP</b>	50	2,1	9,18	3 1/3	9,74	0,211	1,86	181590	0,0006	0,004883	3,21	13,56	16,77	0,60
<b>75-35-AMP</b>	50	2,1	9,18	3 1/3	9,74	0,211	1,86	181590	0,0006	0,004883	3,21	13,56	16,77	0,60
<b>76-35-AMP</b>	50	2,1	9,18	3 1/3	9,74	0,211	1,86	181590	0,0006	0,004883	3,21	13,56	16,77	0,60
<b>77-35-AMP</b>	50	2,1	9,18	3 1/3	9,74	0,211	1,86	181590	0,0006	0,004883	3,21	13,56	16,77	0,60
<b>78-35-AMP</b>	50	2,1	9,18	3 1/3	9,74	0,211	1,86	181590	0,0006	0,004883	3,21	13,56	16,77	0,60
<b>79-35-AMP</b>	50	2,1	9,18	3 1/3	9,74	0,211	1,86	181590	0,0006	0,004883	3,21	13,56	16,77	0,60
<b>80-35-AMP</b>	50	2,1	9,18	3 1/3	9,74	0,211	1,86	181590	0,0006	0,004883	3,21	13,56	16,77	0,60
<b>81-35-AMP</b>	50	2,1	9,18	3 1/3	9,74	0,211	1,86	181590	0,0006	0,004883	3,21	13,56	16,77	0,60
<b>82-35-AMP</b>	50	2,1	9,18	3 1/3	9,74	0,211	1,86	181590	0,0006	0,004883	3,21	13,56	16,77	0,60
<b>83-35-AMP</b>	50	2,1	9,18	3 1/3	9,74	0,211	1,86	181590	0,0006	0,004883	3,21	13,56	16,77	0,60
<b>84-35-AMP</b>	50	2,1	9,18	3 1/3	9,74	0,211	1,86	181590	0,0006	0,004883	3,21	13,56	16,77	0,60
<b>85-35-AMP</b>	50	2,1	9,18	3 1/3	9,74	0,211	1,86	181590	0,0006	0,004883	3,21	13,56	16,77	0,60
<b>86-36-AMP</b>	27	0,6	12,62	5	13,58	0,277	0,52	70338	0,0004	0,005265	2,94	9,68	12,62	0,03
<b>87-36-AMP</b>	27	0,6	12,62	5	13,58	0,277	0,52	70338	0,0004	0,005265	2,94	9,68	12,62	0,03
<b>88-36-AMP</b>	27	0,6	12,62	5	13,58	0,277	0,52	70338	0,0004	0,005265	2,94	9,68	12,62	0,03
<b>89-36-AMP</b>	27	0,6	12,62	5	13,58	0,277	0,52	70338	0,0004	0,005265	2,94	9,68	12,62	0,03
<b>90-36-AMP</b>	27	0,6	12,62	5	13,58	0,277	0,52	70338	0,0004	0,005265	2,94	9,68	12,62	0,03
<b>91-36-AMP</b>	27	0,6	12,62	5	13,58	0,277	0,52	70338	0,0004	0,005265	2,94	9,68	12,62	0,03
<b>92-36-AMP</b>	27	0,6	12,62	5	13,58	0,277	0,52	70338	0,0004	0,005265	2,94	9,68	12,62	0,03
<b>93-36-AMP</b>	27	0,6	12,62	5	13,58	0,277	0,52	70338	0,0004	0,005265	2,94	9,68	12,62	0,03
<b>94-36-AMP</b>	27	0,6	12,62	5	13,58	0,277	0,52	70338	0,0004	0,005265	2,94	9,68	12,62	0,03
<b>95-36-AMP</b>	27	0,6	12,62	5	13,58	0,277	0,52	70338	0,0004	0,005265	2,94	9,68	12,62	0,03
<b>96-36-AMP</b>	27	0,6	12,62	5	13,58	0,277	0,52	70338	0,0004	0,005265	2,94	9,68	12,62	0,03

<b>97-36-AMP</b>	27	0,6	12,62	5	13,58	0,277	0,52	70338	0,0004	0,005265	2,94	9,68	12,62	0,03
<b>98-36-PR</b>	27	0,6	12,62	5	13,58	0,277	0,52	70338	0,0004	0,005265	31,69	159,95	191,64	0,41
<b>99-36-PR</b>	27	2,1	6,74	2 1/2	6,88	0,211	2,02	138781	0,0009	0,005312	7,15	12,30	19,45	1,25
<b>100-37-SE</b>	2,67	2,1	2,12	3/4	2,34	0,165	1,73	40411	0,0026	0,007105	46,63	18,32	64,95	12,04
<b>101-38-PR</b>	24	2,1	6,36	2 1/2	6,88	0,211	1,79	123361	0,0009	0,005366	10,59	10,95	21,54	1,10
<b>102-39-PR</b>	14	0,6	9,08	3 1/3	9,74	0,211	0,52	50845	0,0006	0,005720	1,28	10,01	11,29	0,04
<b>103-39-PR</b>	14	2,1	4,86	2	5,70	0,165	1,52	86833	0,0011	0,005718	4,11	40,45	44,56	2,11
<b>104-40-PR</b>	10	0,6	7,68	3	8,47	0,211	0,49	41765	0,0007	0,005980	11,90	8,76	20,66	0,07
<b>105-40-PR</b>	10	2,1	4,10	1 1/2	4,50	0,165	1,75	78668	0,0013	0,005925	4,16	32,36	36,52	3,00
<b>106-41-PR</b>	11	1,8	4,65	2	5,70	0,165	1,20	68226	0,0011	0,005866	8,16	3,62	11,78	0,35
<b>107-42-PR</b>	7,14	1,8	3,75	1 1/4	3,89	0,165	1,67	64980	0,0015	0,006175	2,79	3,79	6,58	0,60
<b>108-43-PR</b>	15	1,8	5,43	2	5,70	0,165	1,63	93036	0,0011	0,005680	8,16	3,62	11,78	0,64
<b>109-44-PR</b>	12	1,8	4,86	2	5,70	0,165	1,31	74428	0,0011	0,005810	2,79	5,43	8,22	0,29
<b>110-45-AMP</b>	36	0,6	14,57	6	16,27	0,277	0,48	78239	0,0004	0,005178	5,00	1,43	6,43	0,01
<b>111-45-AMP</b>	36	2,1	7,79	3	8,47	0,211	1,78	150353	0,0007	0,005078	20,28	25,07	45,35	1,75
<b>112-45-AMP</b>	36	2,1	7,79	3	8,47	0,211	1,78	150353	0,0007	0,005078	1,98	11,87	13,85	0,53
<b>113-45-AMP</b>	36	2,1	7,79	3	8,47	0,211	1,78	150353	0,0007	0,005078	1,98	11,87	13,85	0,53
<b>114-46-AMP</b>	0,01	0,6	0,24	1/8	0,78	0,124	0,06	454	0,0077	0,035276	1,81	0,70	2,51	0,01
<b>115-46-AMP</b>	0,01	0,6	0,24	1/8	0,78	0,124	0,06	454	0,0077	0,035276	1,81	0,70	2,51	0,01
<b>116-46-AMP</b>	0,01	0,6	0,24	1/8	0,78	0,124	0,06	454	0,0077	0,035276	21,44	1,10	22,54	0,07
<b>117-46-SE</b>	0,01	2,1	0,13	1/8	0,78	0,124	0,06	454	0,0077	0,035276	0,94	1,73	2,67	0,01
<b>118-47-SE</b>	16	2,1	5,19	2	5,70	0,165	1,74	99238	0,0011	0,005646	16,62	9,65	26,27	1,61
<b>119-48-SE</b>	22993	30	52,06	24	59,85	0,554	22,70	667587	0,0001	0,003503	38,43	42,67	81,10	49,87
<b>120-49-SE</b>	3070	12	30,08	12	31,59	0,396	10,88	168869	0,0002	0,004390	26,08	4,86	30,94	10,37
<b>121-50-APT</b>	20	0,6	10,86	4	11,01	0,211	0,58	64256	0,0005	0,005432	17,00	1,94	18,94	0,06

<b>122-50-APT</b>	20	2,1	5,80	2 1/2	6,88	0,211	1,49	102800	0,0009	0,005460	32,60	10,48	43,08	1,56
<b>123-51-APT</b>	76	0,6	21,17	8	21,35	0,277	0,59	125877	0,0003	0,005460	3,44	15,01	18,45	0,03
<b>124-51-APT</b>	76	0,6	21,17	8	21,35	0,277	0,59	125877	0,0003	0,005460	3,44	15,01	18,45	0,03
<b>125-51-APT</b>	76	0,6	21,17	8	21,35	0,277	0,59	125877	0,0003	0,005460	3,44	15,01	18,45	0,03
<b>126-51-APT</b>	76	0,6	21,17	8	21,35	0,277	0,59	125877	0,0003	0,005460	3,44	15,01	18,45	0,03
<b>127-51-APT</b>	76	0,6	21,17	8	21,35	0,277	0,59	125877	0,0003	0,005460	3,44	15,01	18,45	0,03
<b>128-51-APT</b>	76	0,6	21,17	8	21,35	0,277	0,59	125877	0,0003	0,005460	3,44	15,01	18,45	0,03
<b>129-51-APT</b>	76	0,6	21,17	8	21,35	0,277	0,59	125877	0,0003	0,005460	24,89	122,02	146,91	0,27
<b>130-51-APT</b>	76	2,1	11,31	5	13,58	0,277	1,46	197988	0,0004	0,004592	3,55	15,33	18,88	0,28

### 1.3.3. Cálculo de las bombas

Algunos conceptos importantes para el cálculo de las bombas son:

- La altura total de aspiración. Representa la presión a la entrada de la bomba. Es la suma algebraica de la altura estática de aspiración (distancia de la superficie libre del líquido al eje de la bomba), la presión existente sobre el líquido y las pérdidas de carga por rozamiento de la tubería de aspiración. Los dos primeros sumandos pueden ser positivos o negativos, pero el tercero es siempre negativo.
- La altura total de impulsión. Es la suma algebraica de la altura estática de impulsión, la pérdida de carga en la impulsión y la presión sobre el líquido en el punto de recepción.

La diferencia entre las alturas totales de impulsión y de aspiración es la carga de la bomba, es decir, la energía que ha de ser conferida al fluido.

- La carga neta positiva de aspiración. Se representa por las siglas NPSH (de la expresión inglesa “Net Positive Suction Head”) y es necesario diferenciar entre dos conceptos: la NPSH requerida ( $NPSH_r$ ) y la NPSH disponible ( $NPSH_{dis}$ ). La primera depende del diseño de la bomba y representa la energía necesaria para llenar la parte de aspiración de la misma y vencer las pérdidas por rozamientos y aumento de velocidad desde la conexión de aspiración hasta el punto donde se incrementa la energía. Es, por tanto, un valor que depende del diseño constructivo de la bomba y que debe suministrar el fabricante de la misma. La NPSH disponible es la diferencia entre la presión a la entrada de la bomba y la tensión de vapor del fluido a la temperatura de funcionamiento, medidas ambas en metros de columna de líquido. Lógicamente siempre deberá cumplirse que la  $NPSH_{dis}$  sea mayor o igual que la  $NPSH_r$ . Por otro lado la  $NPSH_{dis}$  siempre habrá de ser positiva y lo mayor posible, ya que de este modo se evitará que la presión a la entrada de la bomba descienda por debajo de la presión de vapor del fluido en las condiciones de temperatura existentes en dicho punto, lo que provocaría la aparición de burbujas de vapor, con el consiguiente peligro de que la bomba entre en cavitación lo que reduce su carga y eficacia al tiempo que daña el material de la misma, reduciendo seriamente la vida útil de la bomba.

Se pretende conocer la carga que necesita suministrar la bomba.

La ecuación de Bernouilli (balance de energía mecánica) para la circulación isotérmica de un fluido incompresible de un punto “1” a otro “2”, expresada en términos de altura (m.c.l.), es la siguiente:

$$\Delta h = Z_2 - Z_1 + \frac{P_2 - P_1}{\rho \cdot g} + \frac{v_2^2}{2 \cdot \alpha_2 \cdot g} - \frac{v_1^2}{2 \cdot \alpha_1 \cdot g} + h_{fs}$$

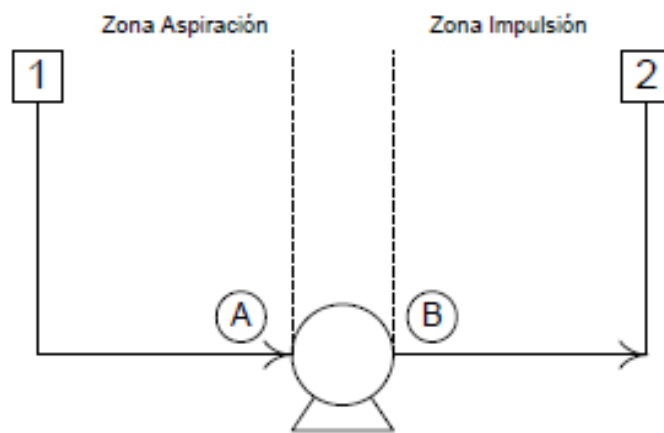
donde:

- $\Delta h$  es la carga de la bomba, m.c.l.
- $Z_i$  es la elevación del punto i, m
- $P_i$  es la presión en el punto i, Pa

- $\rho$  es la densidad del fluido,  $\text{kg/m}^3$ , que permanecerá constante
- $g$  es la aceleración de la gravedad,  $9.81 \text{ m/s}^2$
- $v_i$  es la velocidad media del fluido en el punto  $i$ ,  $\text{m/s}$
- $\alpha_i$  es un término que depende del tipo de flujo que se produzca. Es igual a  $1/2$  si el flujo es laminar ( $\text{Re} \leq 2000$ ) y vale 1 para flujo turbulento ( $\text{Re} \geq 4000$ )
- $h_{fs}$  son las pérdidas de presión por rozamiento en la conducción, m.c.l.

Para cuantificar los conceptos mencionados anteriormente se aplicará la ecuación de Bernouilli a las diferentes secciones que aparecen en el siguiente esquema:

Figura 3. Ejemplo de aplicación de la ecuación de Bernouilli.



La zona de aspiración es la comprendida entre el tanque o reserva desde donde se bombeará el líquido y la bomba. Por su parte, el tramo situado a la salida de la bomba es lo que se conoce como línea o zona de impulsión. La energía que la bomba confiere al fluido se mide en términos de presión y es lo que se conoce como carga de la bomba. La unidad más utilizada para expresar la carga de la bomba es el metro de columna de líquido (m.c.l.). Hay que tener en cuenta que para pasar esta unidad a bares es necesario conocer antes el líquido de que se trata.

Si aplicamos la ecuación de Bernouilli entre los puntos 1 y A (zona de aspiración), considerando la elevación del eje de la bomba igual a 0 ( $Z_A = 0$ ) y que al tratarse de un fluido incompresible y considerando una tubería de sección constante, la ecuación de continuidad determina que  $v_1 = v_A$ , resulta que:

$$0 = \frac{P_A - P_1}{\rho \cdot g} + h_{fs} - Z_1$$

De esta forma la presión a la entrada de la bomba (altura total de aspiración), en m.c.l., resulta ser de:

$$\frac{P_A}{\rho \cdot g} = \frac{P_1}{\rho \cdot g} + Z_1 - h_{fs}$$

Si a la expresión anterior le restamos la presión de vapor tendremos la Carga Neta Positiva de Aspiración Disponible ( $\text{NPSH}_{\text{dis}}$ ):



$$NPSH_{dis} = \frac{P_A - P_V}{\rho \cdot g} = \frac{P_1 - P_V}{\rho \cdot g} + Z_1 - h_{fs}$$

Para evitar la cavitación la  $NPSH_{dis}$  ha de ser positiva y con un valor lo más alto posible, siempre mayor o igual a la  $NPSH_r$  proporcionada por el fabricante de la bomba. Así cuando la bomba esté en carga ( $Z_1 > 0$ ) la cavitación es más difícil que si se encuentra en succión ( $Z_1 < 0$ ).

Aplicando la ecuación de Bernoulli entre los puntos B y 2 (zona de impulsión), con las mismas consideraciones anteriores, tenemos que:

$$0 = \frac{P_2 - P_B}{\rho \cdot g} + h_{fs} + Z_2$$

De modo que la presión a la salida de la bomba (altura total de impulsión), en m.c.l., es la siguiente:

$$\frac{P_B}{\rho \cdot g} = \frac{P_2}{\rho \cdot g} + h_{fs} + Z_2$$

Por último, si aplicamos la ecuación de Bernoulli a la bomba (entre A y B) resulta que:

$$\Delta h = \frac{P_B - P_A}{\rho \cdot g} + h_{fs}$$

Teniendo en cuenta que el rozamiento interno de la bomba suele estar incluido dentro del rendimiento de la misma, se puede observar cómo la energía que ha de ser suministrada al fluido es la diferencia entre las alturas totales de impulsión y de aspiración.

Este es el caso más sencillo de aplicación de la ecuación de Bernoulli. Pero en los cálculos realizados en la instalación aparecen una serie de complicaciones:

- Conducciones que se ramifican tras salir de la bomba y que tienen distinta pérdida de carga. En este caso se considera la pérdida de carga de todas las ramas igual a la mayor de ellas, teniendo en cuenta las elevaciones finales. De esta manera el caudal que circulará por cada una de ellas será igual. Se comprobará que se obtiene el mismo valor para la presión en el punto de división al calcularla a partir de todas las derivaciones que de él parten.
- Conducciones que se unen tras salir de la bomba. En este caso se ha considerado que cada bomba debe suministrar la carga correspondiente a su tramo específico más la parte proporcional del tramo común.

Una vez conocida la carga que debe suministrar cada bomba se consulta el catálogo (proporcionado por CALPEDA). Se elige el equipo que se asemeje más a las condiciones diseñadas para la bomba.

Para la selección del modelo adecuado de bomba (una vez establecido el tipo de ésta) se recurrirá a las llamadas curvas características de la bomba, aportadas por el fabricante de las mismas. Se necesitan tres curvas diferentes:

- Las de caudal y carga de la bomba, llamadas curvas QH.
- Las de potencia del motor necesario, kW.

- Las de Carga Positiva Neta de Aspiración Requerida (NPSH<sub>r</sub>).

Las curvas características se construyen normalmente mediante pruebas realizadas con agua, por lo que sus datos se deben recalcular si se van a bombear líquidos con otras propiedades físicas.

El modo de proceder, en el caso de las bombas centrífugas, para el empleo de estas curvas es el siguiente:

- 1) Conocer el fluido a bombear, la temperatura de bombeo y las propiedades físicas del fluido (densidad y viscosidad) a dicha temperatura.
- 2) Establecer el caudal volumétrico a desarrollar, m<sup>3</sup>/h.
- 3) Conocer la carga de la bomba, para lo que hay que determinar previamente las alturas totales de impulsión y aspiración.
- 4) Con la carga y el caudal que se precisan se ha de acudir a la curva QH y, fijando estas dos magnitudes, determinar el diámetro del rodete, que en caso de no resultar un valor exacto nos llevaría a escoger el valor mayor más cercano.
- 5) Con el diámetro de rodete determinado y el caudal, en la curva de potencia se determina el consumo de la bomba. El valor leído en la curva ha de incrementarse en un 15 % como margen de seguridad.
- 6) Finalmente y en la curva de NPSH<sub>r</sub> se determina dicho valor, para el caudal desarrollado.

En la actualidad hay disponibles programas informáticos, suministrados por los fabricantes, que realizan la función de las curvas características.

Para el caso de las bombas rotativas (de desplazamiento positivo) la elección del modelo adecuado requerirá conocer la viscosidad del fluido a bombear así como el caudal a desarrollar. Con estos dos valores, y sobre la curva característica de la bomba, se elige el modelo recomendado por el fabricante, que también deberá de suministrar datos como la potencia del motor y la NPSH<sub>r</sub>.

Los cálculos realizados se muestran a continuación. Se indicará también el modelo seleccionado dentro del catálogo del fabricante elegido.

**1.3.3.1. Bomba B-AMP-1-CE**

Tabla 5. Tramos de tubería relacionados con la bomba B-AMP-1-CE.

	Tramo de tubería	Z inicial, m	Z final, m	Presión inicial, Pa	Presión final, Pa	Pérdidas de carga, m.c.l.
<b>Zona de aspiración</b>	1-1-AMP	0	0	253312,50	253103,28	0,02
	3-1-AMP	0	0	253103,28	252923,23	0,02
	<i>TOTAL</i>	0	0	253312,50	252923,23	0,04
<b>Zona de impulsión</b>	4-1-AMP	0	8,50	252923,23	---	3,02
	5-1-AMP	8,50	8,23	---	506625,00	0,47
	6-1-AMP	8,50	8,23	---	506625,00	0,47
	7-1-AMP	8,50	8,23	---	506625,00	0,47
	8-1-AMP	8,50	8,23	---	506625,00	0,47
	9-1-AMP	8,50	8,23	---	506625,00	0,47
	10-1-AMP	8,50	8,23	---	506625,00	0,47
	11-1-AMP	8,50	8,23	---	506625,00	0,47
	12-1-AMP	8,50	8,23	---	506625,00	0,47
	<i>TOTAL</i>	0	8,50	252923,23	506625,00	3,50

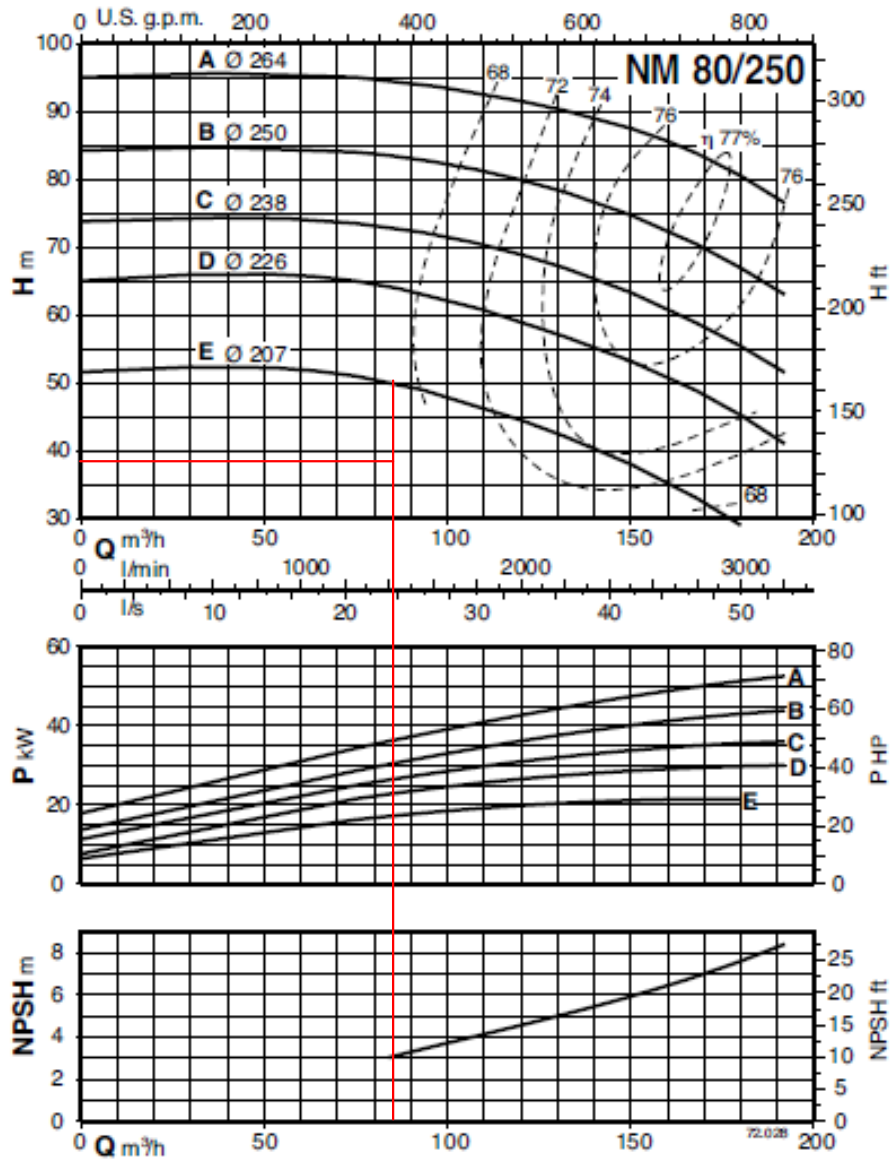
Tabla 6. Resultados de los cálculos y selección de la bomba B-AMP-1-CE.

	Caudal, m <sup>3</sup> /h	$\Delta h$ , m.c.l.	NPSH, m.c.l.	P, kW	Rendimiento, %
<b>Bomba diseñada</b>	86	37,86	25,54	---	---
<b>Bomba elegida</b>	86	50,00	3,10	17,50	67

Se puede observar que no existen bombas que trabajen en las condiciones exactas de diseño, por lo que se elige en el catálogo una bomba que suministre el mismo caudal y la carga inmediatamente superior. El exceso de carga suministrada por la bomba se podrá compensar con accesorios como válvulas.

No existirá cavitación ya que la NPSH disponible es mayor que la requerida.

Figura 4. Selección de la bomba B-AMP-1-CE.



El modelo seleccionado será el NM-80/250-E.

## 1.3.3.2. Bomba B-AMP-2-CE

Tabla 7. Tramos de tubería relacionados con la bomba B-AMP-2-CE.

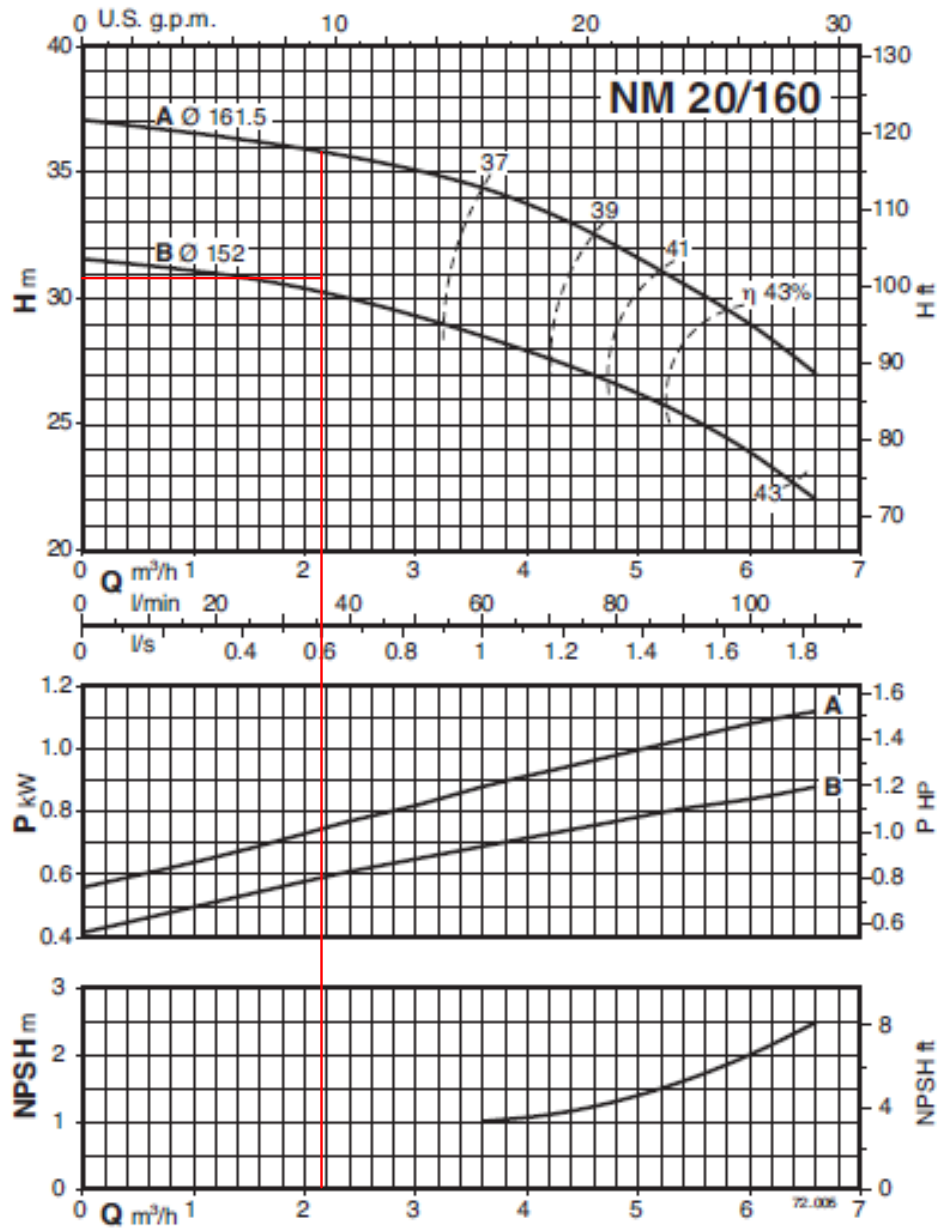
	Tramo de tubería	Z inicial, m	Z final, m	Presión inicial, Pa	Presión final, Pa	Pérdidas de carga, m.c.l.
<b>Zona de aspiración</b>	13-2-AMP	0	0	303975,00	303073,33	0,09
	14-2-AMP	0	0	303975,00	303073,33	0,09
	15-2-AMP	0	0	303975,00	303073,33	0,09
	16-2-AMP	0	0	303975,00	303073,33	0,09
	17-2-AMP	0	0	303975,00	303073,33	0,09
	18-2-AMP	0	0	303975,00	303073,33	0,09
	19-2-AMP	0	0	303975,00	303073,33	0,09
	20-2-AMP	0	0	303975,00	303073,33	0,09
	21-2-AMP	0	0	303073,33	292930,24	1,03
	<i>TOTAL</i>	0	0	303975,00	292930,24	1,13
<b>Zona de impulsión</b>	22-2-PR	0	4,13	292930,24	506625,00	5,75

Tabla 8. Resultados de los cálculos y selección de la bomba B-AMP-2-CE.

	Caudal, m <sup>3</sup> /h	$\Delta h$ , m.c.l.	NPSH, m.c.l.	P, kW	Rendimiento, %
<b>Bomba diseñada</b>	2,18	31,66	29,62	---	---
<b>Bomba elegida</b>	2,18	35,80	1,00	0,75	35

Se comprueba que no existe cavitación.

Figura 5. Selección de la bomba B-AMP-2-CE.



El modelo seleccionado será el NM-20/160-A.

**1.3.3.3. Bomba B-AMP-35-CE**

Tabla 9. Tramos de tubería relacionados con la bomba B-AMP-35-CE.

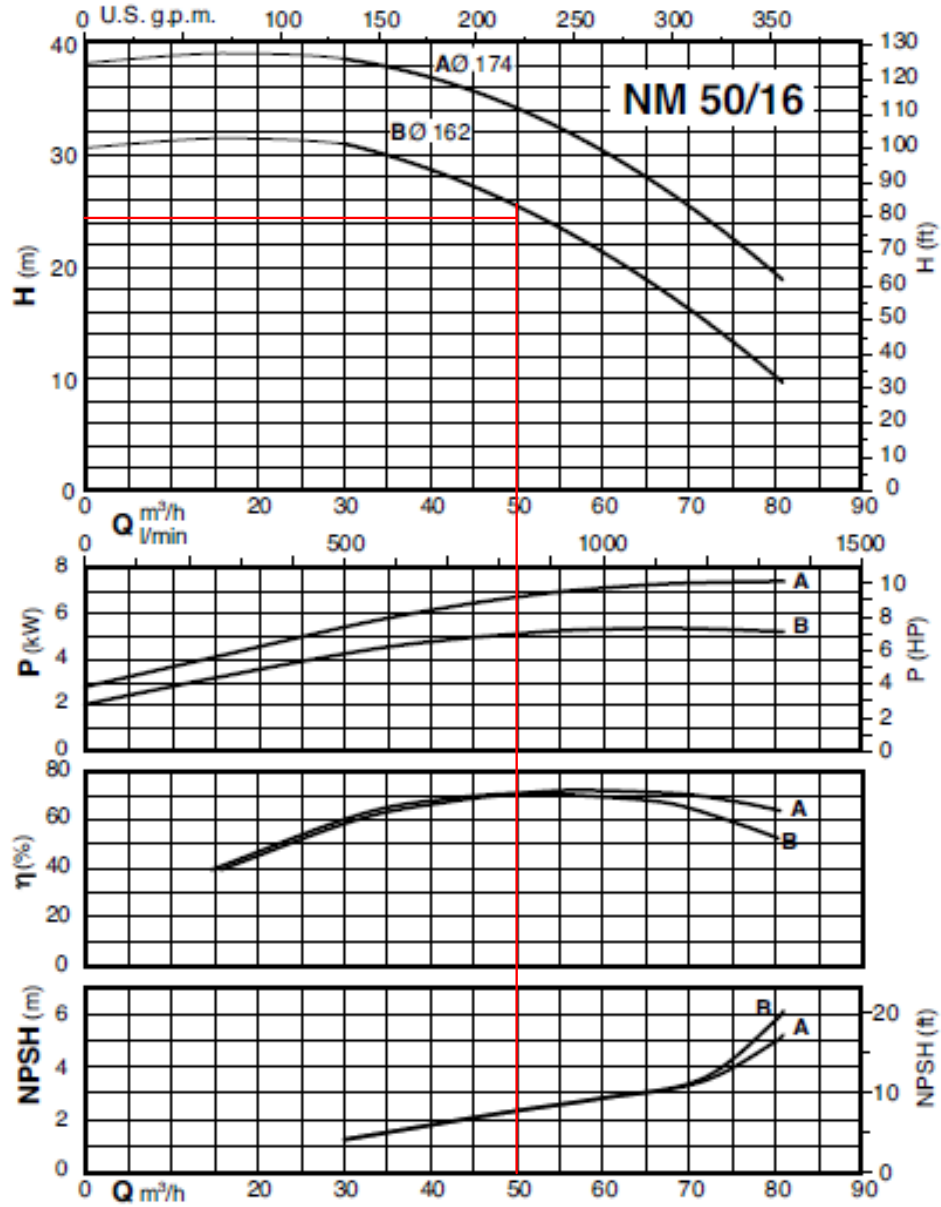
	Tramo de tubería	Z inicial, m	Z final, m	Presión inicial, Pa	Presión final, Pa	Pérdidas de carga, m.c.l.
<b>Zona de aspiración</b>	72-35-AMP	0	0	202650,00	202628,94	0,0021
	73-35-AMP	0	8,50	202628,94	---	4,94
<b>Zona de impulsión</b>	74-35-AMP	8,50	8,23	---	303975,00	0,60
	75-35-AMP	8,50	8,23	---	303975,00	0,60
	76-35-AMP	8,50	8,23	---	303975,00	0,60
	77-35-AMP	8,50	8,23	---	303975,00	0,60
	78-35-AMP	8,50	8,23	---	303975,00	0,60
	79-35-AMP	8,50	8,23	---	303975,00	0,60
	80-35-AMP	8,50	8,23	---	303975,00	0,60
	81-35-AMP	8,50	8,23	---	303975,00	0,60
	82-35-AMP	8,50	8,23	---	303975,00	0,60
	83-35-AMP	8,50	8,23	---	303975,00	0,60
	84-35-AMP	8,50	8,23	---	303975,00	0,60
	85-35-AMP	8,50	8,23	---	303975,00	0,60
	<i>TOTAL</i>	0	8,50	202628,94	303975,00	5,53

Tabla 10. Resultados de los cálculos y selección de la bomba B-AMP-35-CE.

	Caudal, m <sup>3</sup> /h	$\Delta h$ , m.c.l.	NPSH, m.c.l.	P, kW	Rendimiento, %
<b>Bomba diseñada</b>	50	24,36	20,42	---	---
<b>Bomba elegida</b>	50	25,70	2,30	5.05	71

Se comprueba que no existe cavitación.

Figura 6. Selección de la bomba B-AMP-35-CE.



El modelo seleccionado será el NM-50/16-B.



**1.3.3.4. Bomba B-AMP-36-CE**

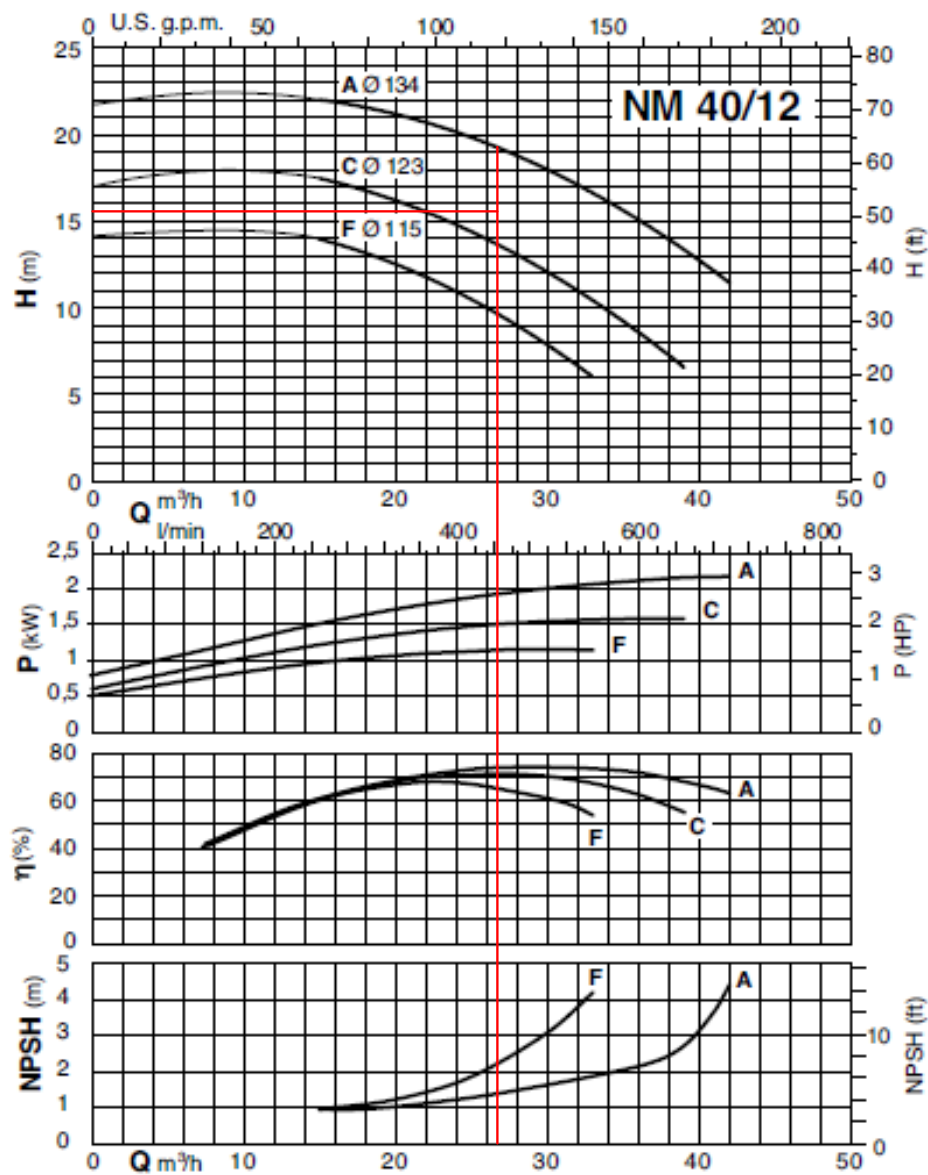
Tabla 11. Tramos de tubería relacionados con la bomba B-AMP-36-CE.

	Tramo de tubería	Z inicial, m	Z final, m	Presión inicial, Pa	Presión final, Pa	Pérdidas de carga, m.c.l.
<b>Zona de aspiración</b>	86-36-AMP	0	0	202650,00	202387,28	0,03
	87-36-AMP	0	0	202650,00	202387,28	0,03
	88-36-AMP	0	0	202650,00	202387,28	0,03
	89-36-AMP	0	0	202650,00	202387,28	0,03
	90-36-AMP	0	0	202650,00	202387,28	0,03
	91-36-AMP	0	0	202650,00	202387,28	0,03
	92-36-AMP	0	0	202650,00	202387,28	0,03
	93-36-AMP	0	0	202650,00	202387,28	0,03
	94-36-AMP	0	0	202650,00	202387,28	0,03
	95-36-AMP	0	0	202650,00	202387,28	0,03
	96-36-AMP	0	0	202650,00	202387,28	0,03
	97-36-AMP	0	0	202650,00	202387,28	0,03
	98-36-PR	0	0	202387,28	198397,45	0,41
<i>TOTAL</i>	0	0	202650,00	198397,45	0,43	
<b>Zona de impulsión</b>	99-36-PR	0	0	198397,45	---	1,25
	100-37-SE	0	1,75	---	202650,00	12,04
	101-38-PR	0	0	---	---	1,10
	<i>TOTAL</i>	0	1,75	198397,45	202650,00	13,29

Tabla 12. Resultados de los cálculos y selección de la bomba B-AMP-36-CE.

	Caudal, m <sup>3</sup> /h	$\Delta h$ , m.c.l.	NPSH, m.c.l.	P, kW	Rendimiento, %
<b>Bomba diseñada</b>	27	15,47	19,99	---	---
<b>Bomba elegida</b>	27	19,20	1,40	1.90	75

Figura 7. Selección de la bomba B-AMP-36-CE.



El modelo seleccionado será el NM-40/12-A.

**1.3.3.5. Bomba B-AMP-45-CE**

Tabla 13. Tramos de tubería relacionados con la bomba B-AMP-45-CE.

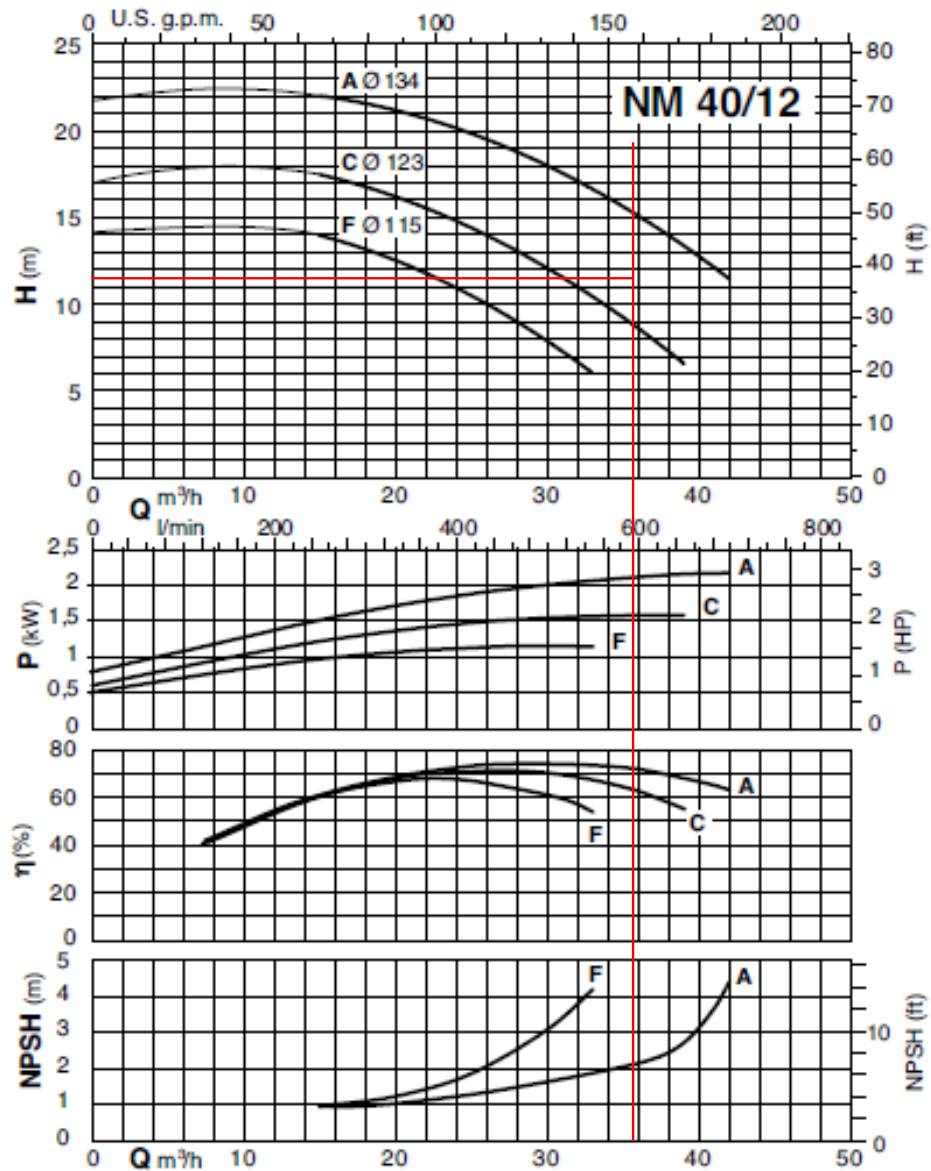
	Tramo de tubería	Z inicial, m	Z final, m	Presión inicial, Pa	Presión final, Pa	Pérdidas de carga, m.c.l.
<b>Zona de aspiración</b>	110-45-AMP	0	0	202650,00	202555,42	0,01
	111-45-AMP	0	4,00	202555,42	---	1,75
<b>Zona de impulsión</b>	112-45-AMP	4,00	3,83	---	253312,50	0,53
	113-45-AMP	4,00	3,83	---	253312,50	0,53
	<i>TOTAL</i>	0	4,00	202555,42	253312,50	2,28

Tabla 14. Resultados de los cálculos y selección de la bomba B-AMP-45-CE.

	Caudal, m <sup>3</sup> /h	$\Delta h$ , m.c.l.	NPSH, m.c.l.	P, kW	Rendimiento, %
<b>Bomba diseñada</b>	36	11,46	20,07	---	---
<b>Bomba elegida</b>	36	15,00	2,15	2,10	72

Se comprueba que no existe cavitación.

Figura 8. Selección de la bomba B-AMP-45-CE.



El modelo seleccionado será el NM-40/12-A.

**1.3.3.6. Bomba B-AMP-46-CE**

Tabla 15. Tramos de tubería relacionados con la bomba B-AMP-46-CE.

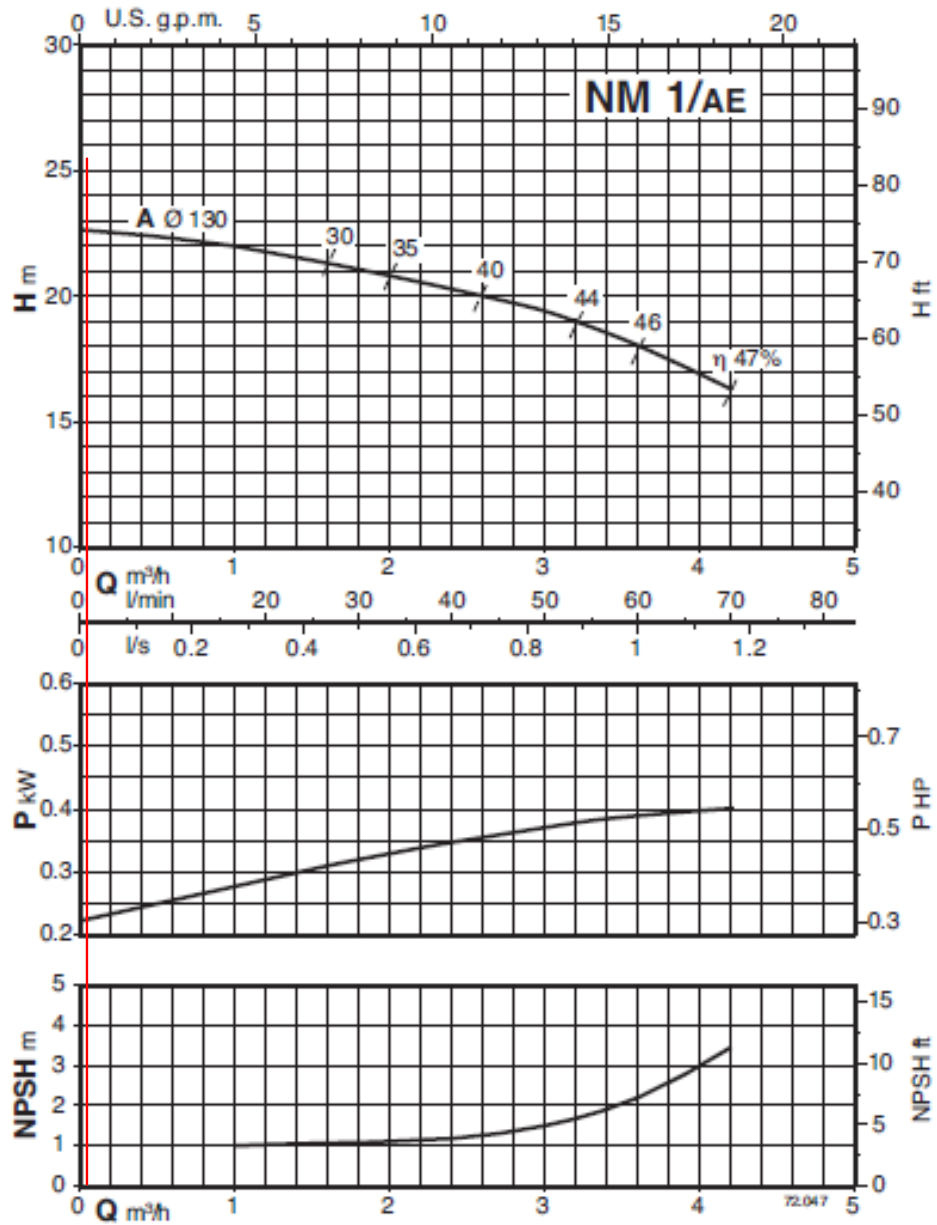
	Tramo de tubería	Z inicial, m	Z final, m	Presión inicial, Pa	Presión final, Pa	Pérdidas de carga, m.c.l.
<b>Zona de aspiración</b>	114-46-AMP	0	0	202650,00	202573,03	0,01
	115-46-AMP	0	0	202650,00	202573,03	0,01
	116-46-AMP	0	0	202573,03	201883,04	0,07
	<i>TOTAL</i>	0	0	202650,00	201883,04	0,08
<b>Zona de impulsión</b>	117-46-SE	0	0	201883,04	---	0,01
	118-47-SE	0	10,50	---	156040,50	1,61
	<i>TOTAL</i>	0	10,50	201883,04	156040,50	1,61

Tabla 16. Resultados de los cálculos y selección de la bomba B-AMP-46-CE.

	Caudal, m <sup>3</sup> /h	$\Delta h$ , m.c.l.	NPSH, m.c.l.	P, kW	Rendimiento, %
<b>Bomba diseñada</b>	0,01	7,44	20,01	---	---
<b>Bomba elegida</b>	0,01	22,60	1,00	0,23	10

Se comprueba que no existe cavitación.

Figura 9. Selección de la bomba B-AMP-46-CE.



El modelo seleccionado será el NM-1/AE.

**1.3.3.7. Bomba B-PR-28-DP**

Esta bomba es de desplazamiento positivo rotativa.

Tabla 17. Tramos de tubería relacionados con la bomba B-PR-28-DP.

	Tramo de tubería	Z inicial, m	Z final, m	Presión inicial, Pa	Presión final, Pa	Pérdidas de carga, m.c.l.
<b>Zona de aspiración</b>	62-28-PR	0,40	0,40	3039750,00	3039691,59	0,0046
	63-28-PR	0,40	0,40	3039691,59	---	0,08
<b>Zona de impulsión</b>	I-210	---	---	---	3090412,50	10,33
	<b>TOTAL</b>	0,40	0,40	3039691,59	3090412,50	10,41

Tabla 18. Resultados de los cálculos y selección de la bomba B-PR-28-DP.

	Caudal, m <sup>3</sup> /h	$\Delta h$ , m.c.l.	NPSH, m.c.l.	P, kW	Rendimiento, %
<b>Bomba diseñada</b>	37	14,39	38.43	---	---
<b>Bomba elegida</b>	37	22,79	---	1,50	67

El modelo seleccionado es el IRR-25/4E. Para este tipo de bombas no se dispone de curva característica.

**1.3.3.8. Bomba B-PR-29-DP**

Esta bomba es de desplazamiento positivo rotativa.

Tabla 19. Tramos de tubería relacionados con la bomba B-PR-29-DP.

	Tramo de tubería	Z inicial, m	Z final, m	Presión inicial, Pa	Presión final, Pa	Pérdidas de carga, m.c.l.
<b>Zona de aspiración</b>	64-29-PR	0,40	0,40	3090412,50	3090401,17	0,0009
	65-29-PR	0,40	0,40	3090401,17	---	0,07
<b>Zona de impulsión</b>	I-211	---	---	---	3191737,50	10,33
	<b>TOTAL</b>	0,40	0,40	3090401,17	3191737,50	10,40

Tabla 20. Resultados de los cálculos y selección de la bomba B-PR-29-DP.

	Caudal, m <sup>3</sup> /h	$\Delta h$ , m.c.l.	NPSH, m.c.l.	P, kW	Rendimiento, %
<b>Bomba diseñada</b>	36	18,34	42,41	---	---
<b>Bomba elegida</b>	36	22,79	---	1,50	67

El modelo seleccionado es el IRR-25/4E. Para este tipo de bombas no se dispone de curva característica.



**1.3.3.9. Bomba B-PR-30-DP**

Esta bomba es de desplazamiento positivo rotativa.

Tabla 21. Tramos de tubería relacionados con la bomba B-PR-30-DP.

	Tramo de tubería	Z inicial, m	Z final, m	Presión inicial, Pa	Presión final, Pa	Pérdidas de carga, m.c.l.
<b>Zona de aspiración</b>	66-30-PR	0,40	0,40	3191737,50	3191683,03	0,0043
<b>Zona de impulsión</b>	67-30-PR	0,40	3,80	3191683,03	3343725,00	0,44

Tabla 22. Resultados de los cálculos y selección de la bomba B-PR-30-DP.

	Caudal, m <sup>3</sup> /h	$\Delta h$ , m.c.l.	NPSH, m.c.l.	P, kW	Rendimiento, %
<b>Bomba diseñada</b>	36	15,76	50,35	---	---
<b>Bomba elegida</b>	36	22,79	---	1,50	67

El modelo seleccionado es el IRR-25/4E. Para este tipo de bombas no se dispone de curva característica.

**1.3.3.10. Bomba B-PR-39-CE**

Tabla 23. Tramos de tubería relacionados con la bomba B-PR-39-CE.

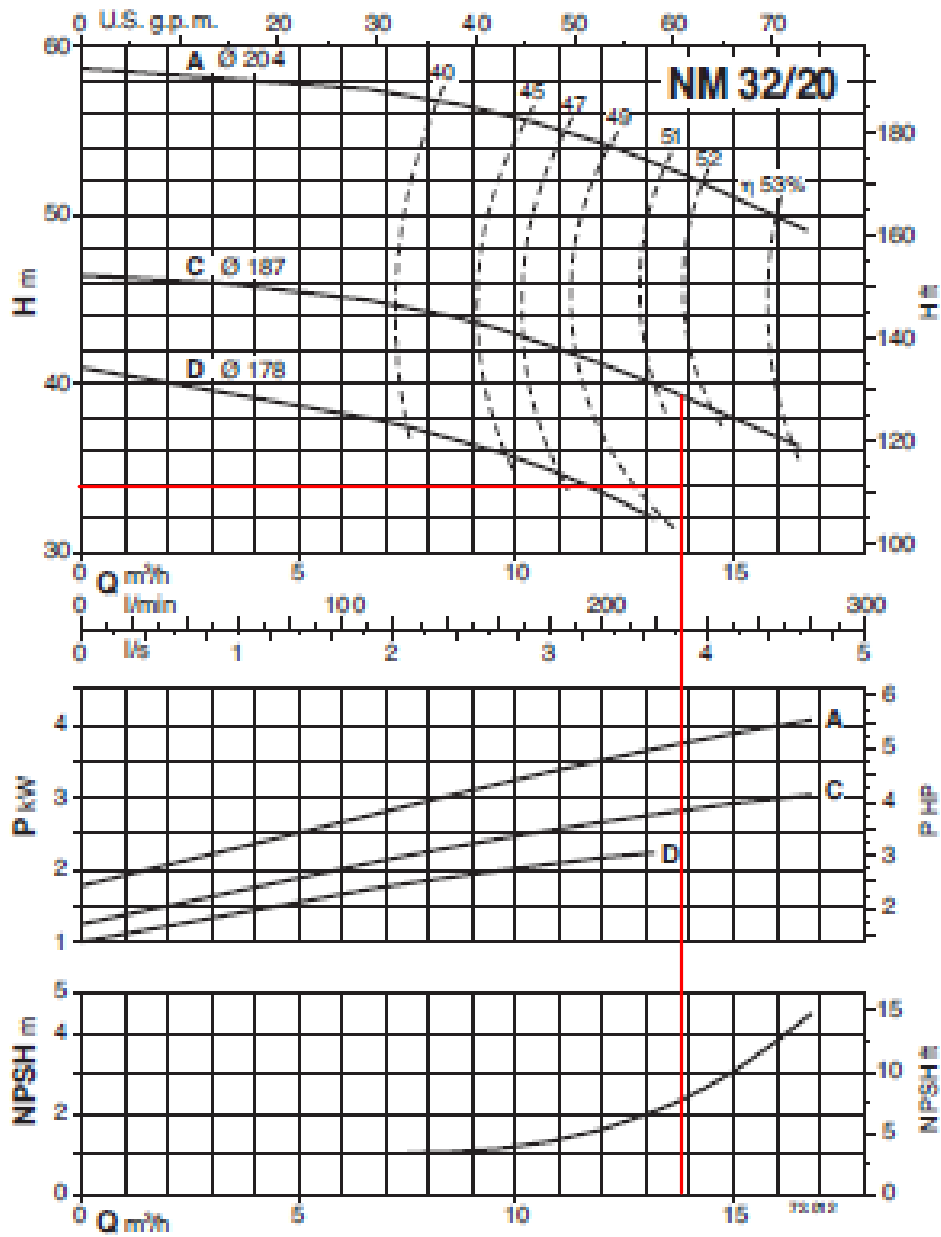
	Tramo de tubería	Z inicial, m	Z final, m	Presión inicial, Pa	Presión final, Pa	Pérdidas de carga, m.c.l.
<b>Zona de aspiración</b>	102-39-PR	0	0	202650,00	202288,53	0,04
<b>Zona de impulsión</b>	103-39-PR	0	0,75	202288,53	506625,00	2,11

Tabla 24. Resultados de los cálculos y selección de la bomba B-PR-39-CE.

	Caudal, m <sup>3</sup> /h	$\Delta h$ , m.c.l.	NPSH, m.c.l.	P, kW	Rendimiento, %
<b>Bomba diseñada</b>	14	33,89	20,38	---	---
<b>Bomba elegida</b>	14	39,30	2,40	2,80	51,6

Se comprueba que no existe cavitación.

Figura 10. Selección de la bomba B-PR-39-CE.



El modelo seleccionado será el NM-32/20-C.

**1.3.3.11. Bomba B-PR-40-CE**

Tabla 25. Tramos de tubería relacionados con la bomba B-PR-40-CE.

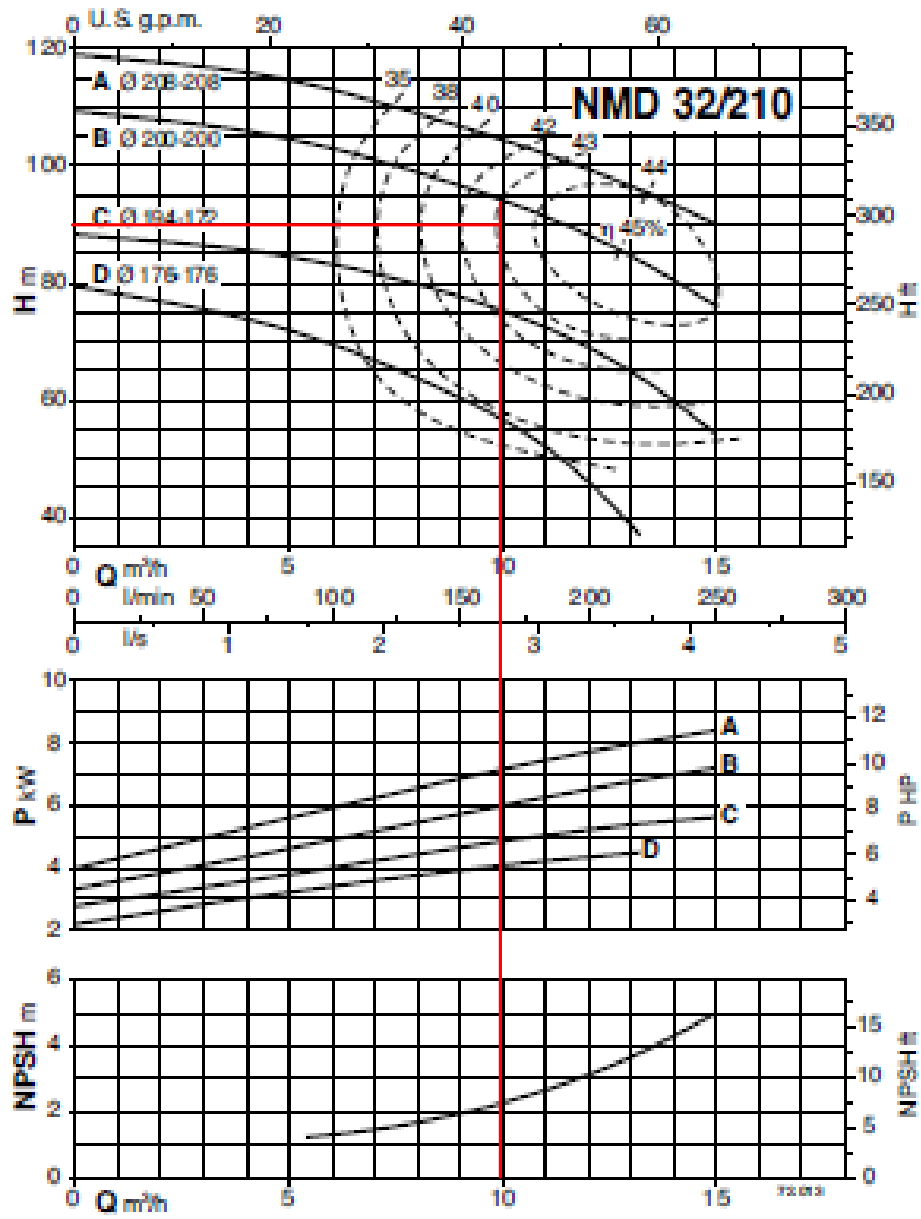
	Tramo de tubería	Z inicial, m	Z final, m	Presión inicial, Pa	Presión final, Pa	Pérdidas de carga, m.c.l.
<b>Zona de aspiración</b>	104-40-PR	0	0	202650,00	201940,41	0,07
<b>Zona de impulsión</b>	105-40-PR	0	0,80	201940,41	2026500,00	3,00

Tabla 26. Resultados de los cálculos y selección de la bomba B-PR-40-CE.

	Caudal, m <sup>3</sup> /h	$\Delta h$ , m.c.l.	NPSH, m.c.l.	P, kW	Rendimiento, %
<b>Bomba diseñada</b>	10	89,79	20,35	---	---
<b>Bomba elegida</b>	10	94,00	2,25	6	43

Se comprueba que no existe cavitación.

Figura 11. Selección de la bomba B-PR-40-CE.



El modelo seleccionado será el NMD-32/210-B.

**1.3.3.12. Bomba B-SE-12-CE**

Tabla 27. Tramos de tubería relacionados con la bomba B-SE-12-CE.

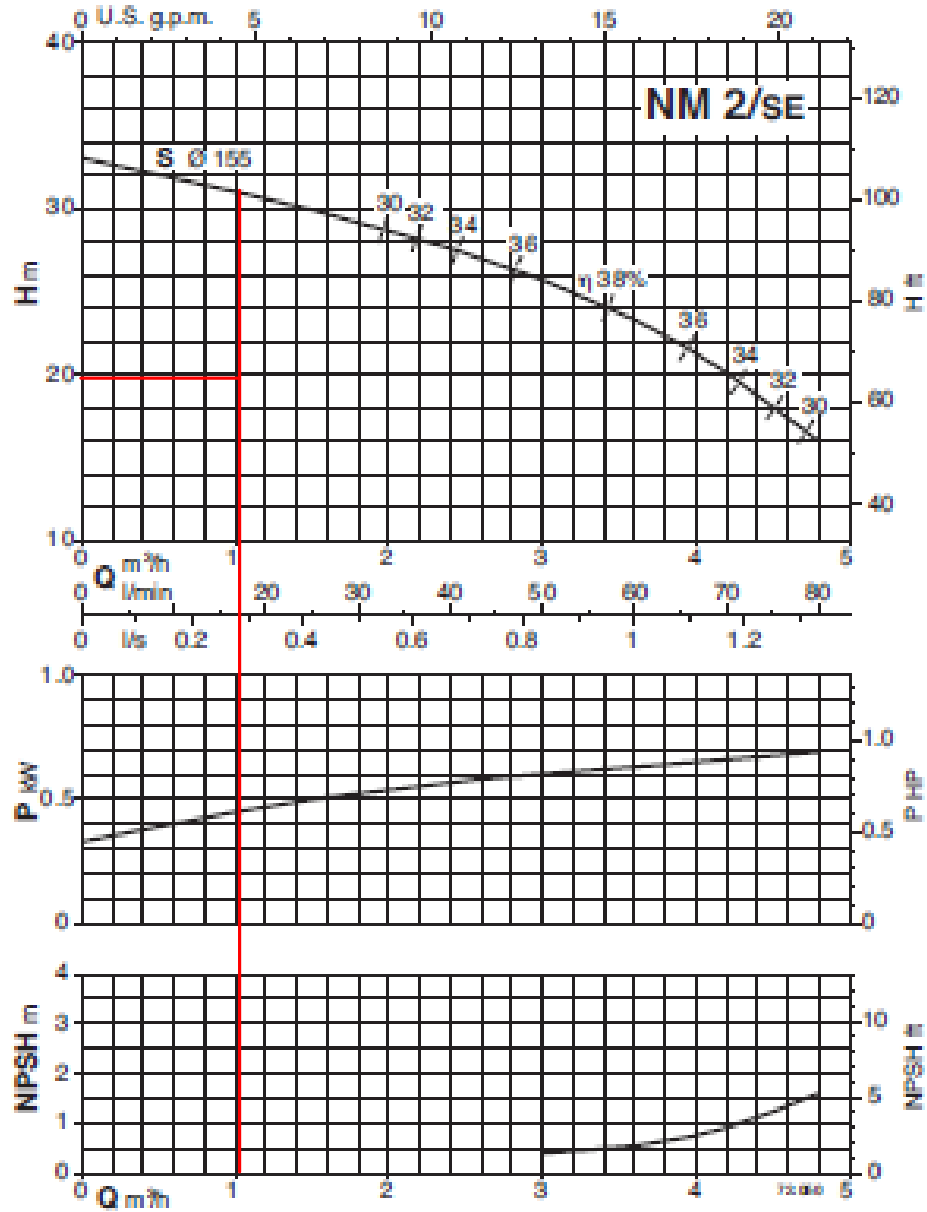
	Tramo de tubería	Z inicial, m	Z final, m	Presión inicial, Pa	Presión final, Pa	Pérdidas de carga, m.c.l.
<b>Zona de aspiración</b>	34-12-SE	3,00	2,70	6586,13	6531,37	0,3056
<b>Zona de impulsión</b>	35-12-PU	2,70	2,70	6531,37	146921,25	5,61

Tabla 28. Resultados de los cálculos y selección de la bomba B-SE-12-CE.

	Caudal, m <sup>3</sup> /h	$\Delta h$ , m.c.l.	NPSH, m.c.l.	P, kW	Rendimiento, %
<b>Bomba diseñada</b>	1,04	19,92	0,60	---	---
<b>Bomba elegida</b>	1,04	30,90	0,45	0,45	20

Se comprueba que no existe cavitación.

Figura 12. Selección de la bomba B-SE-12-CE.



El modelo seleccionado será el NM-2/SE-S.

**1.3.3.13. Bomba B-SE-17-CE**

Tabla 29. Tramos de tubería relacionados con la bomba B-SE-17-CE.

	Tramo de tubería	Z inicial, m	Z final, m	Presión inicial, Pa	Presión final, Pa	Pérdidas de carga, m.c.l.
<b>Zona de aspiración</b>	46-17-SE	0	0	6586,13	6427,89	0,0161
<b>Zona de impulsión</b>	47-17-SE	0	0,875	6427,89	303975,00	0,80

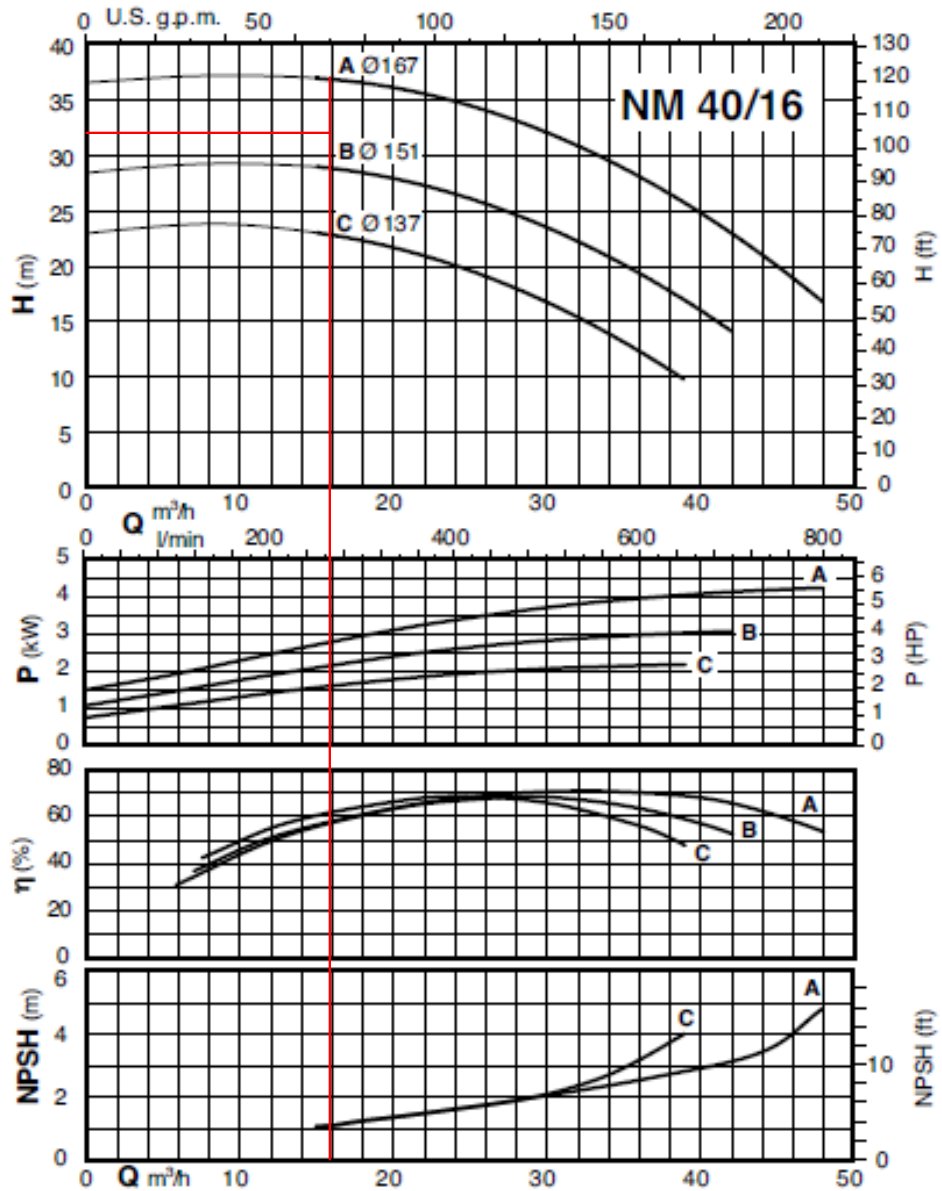
Tabla 30. Resultados de los cálculos y selección de la bomba B-SE-17-CE.

	Caudal, m <sup>3</sup> /h	$\Delta h$ , m.c.l.	NPSH, m.c.l.	P, kW	Rendimiento, %
<b>Bomba diseñada</b>	16	32,00	5,90	---	---
<b>Bomba elegida</b>	16	37,00	1,10	2,85	58

Se comprueba que no existe cavitación.



Figura 13. Selección de la bomba B-SE-17-CE.



El modelo seleccionado será el NM-40/16-A.

**1.3.3.14. Bomba B-APT-51-CE**

Tabla 31. Tramos de tubería relacionados con la bomba B-APT-51-CE.

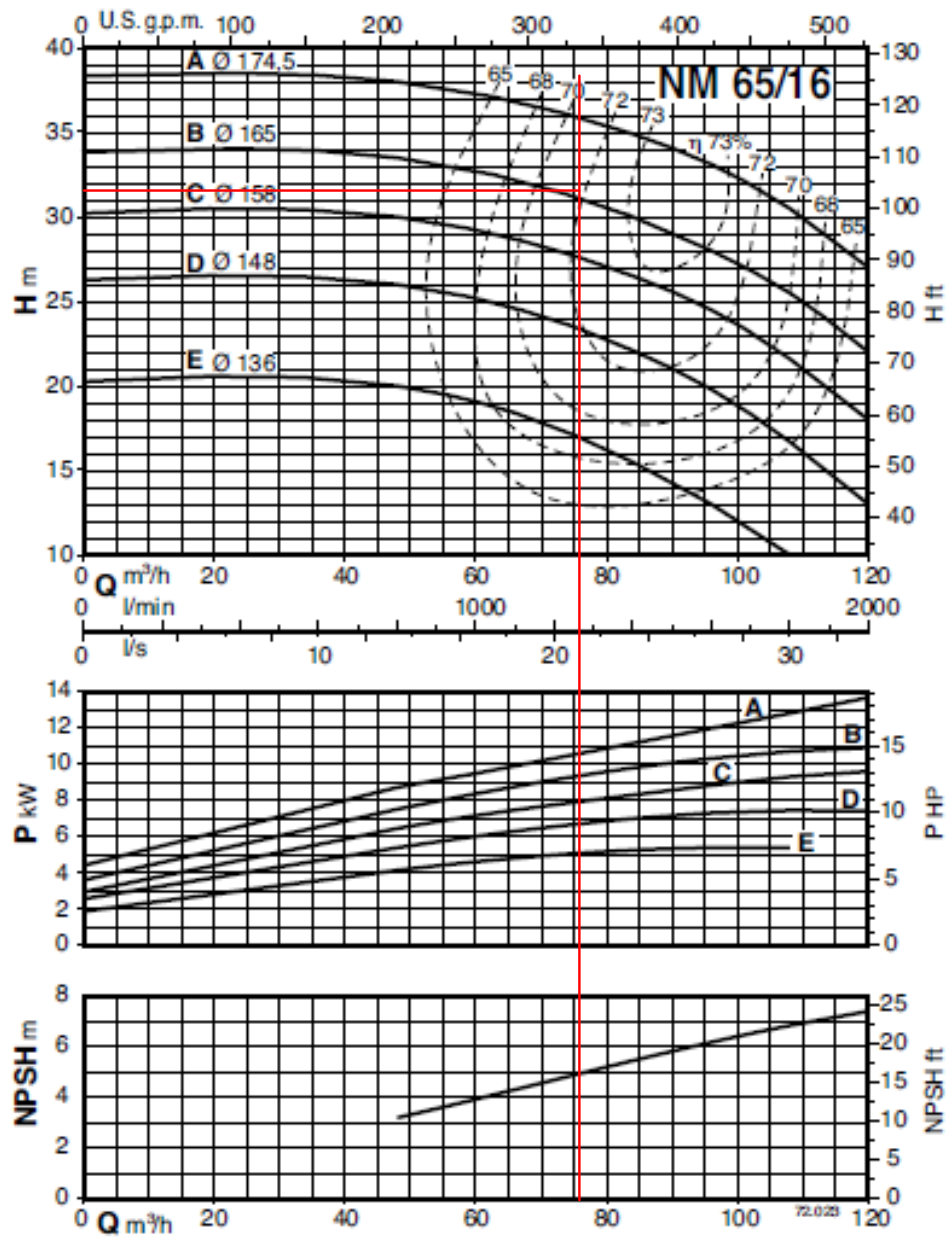
	Tramo de tubería	Z inicial, m	Z final, m	Presión inicial, Pa	Presión final, Pa	Pérdidas de carga, m.c.l.
<b>Zona de aspiración</b>	123-51-APT	0	0	202650,00	202322,20	0,03
	124-51-APT	0	0	202650,00	202322,20	0,03
	125-51-APT	0	0	202650,00	202322,20	0,03
	126-51-APT	0	0	202650,00	202322,20	0,03
	127-51-APT	0	0	202650,00	202322,20	0,03
	128-51-APT	0	0	202650,00	202322,20	0,03
	129-51-APT	0	0	202322,20	199711,50	0,27
	<i>TOTAL</i>	0	0	202650,00	199711,50	0,30
<b>Zona de impulsión</b>	130-51-APT	0	0	199711,50	506625,00	0,28

Tabla 32. Resultados de los cálculos y selección de la bomba B-APT-51-CE.

	Caudal, m <sup>3</sup> /h	$\Delta h$ , m.c.l.	NPSH, m.c.l.	P, kW	Rendimiento, %
<b>Bomba diseñada</b>	76	31,56	18,33	---	---
<b>Bomba elegida</b>	76	35,90	5,00	10,75	72

Se comprueba que no existe cavitación.

Figura 14. Selección de la bomba B-APT-51-CE.



El modelo seleccionado será el NM-65/16-A.

**1.3.3.15. Bomba B-APT-50-CE**

Tabla 33. Tramos de tubería relacionados con la bomba B-APT-50-CE.

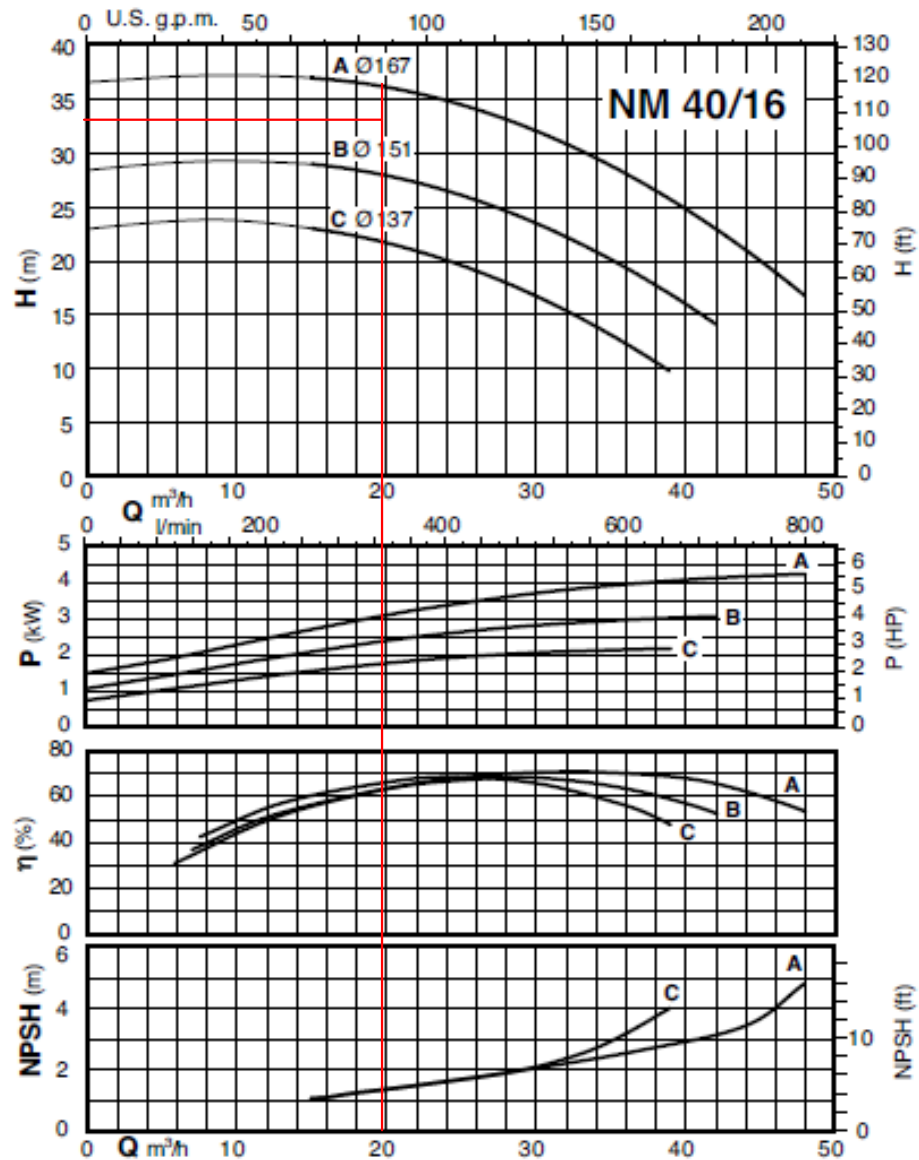
	Tramo de tubería	Z inicial, m	Z final, m	Presión inicial, Pa	Presión final, Pa	Pérdidas de carga, m.c.l.
<b>Zona de aspiración</b>	121-50-APT	0	0	202650,00	202013,05	0,0649
<b>Zona de impulsión</b>	122-50-APT	0	0	202013,05	506625,00	1,56

Tabla 34. Resultados de los cálculos y selección de la bomba B-APT-50-CE.

	Caudal, m <sup>3</sup> /h	$\Delta h$ , m.c.l.	NPSH, m.c.l.	P, kW	Rendimiento, %
<b>Bomba diseñada</b>	20	32,61	5,49	---	---
<b>Bomba elegida</b>	20	36,80	1,35	3,10	62

Se comprueba que no existe cavitación.

Figura 15. Selección de la bomba B-APT-50-CE.



El modelo seleccionado será el NM-40/16-A.

**1.3.3.16. Bomba B-APT-23-CE**

Tabla 35. Tramos de tubería relacionados con la bomba B-APT-23-CE.

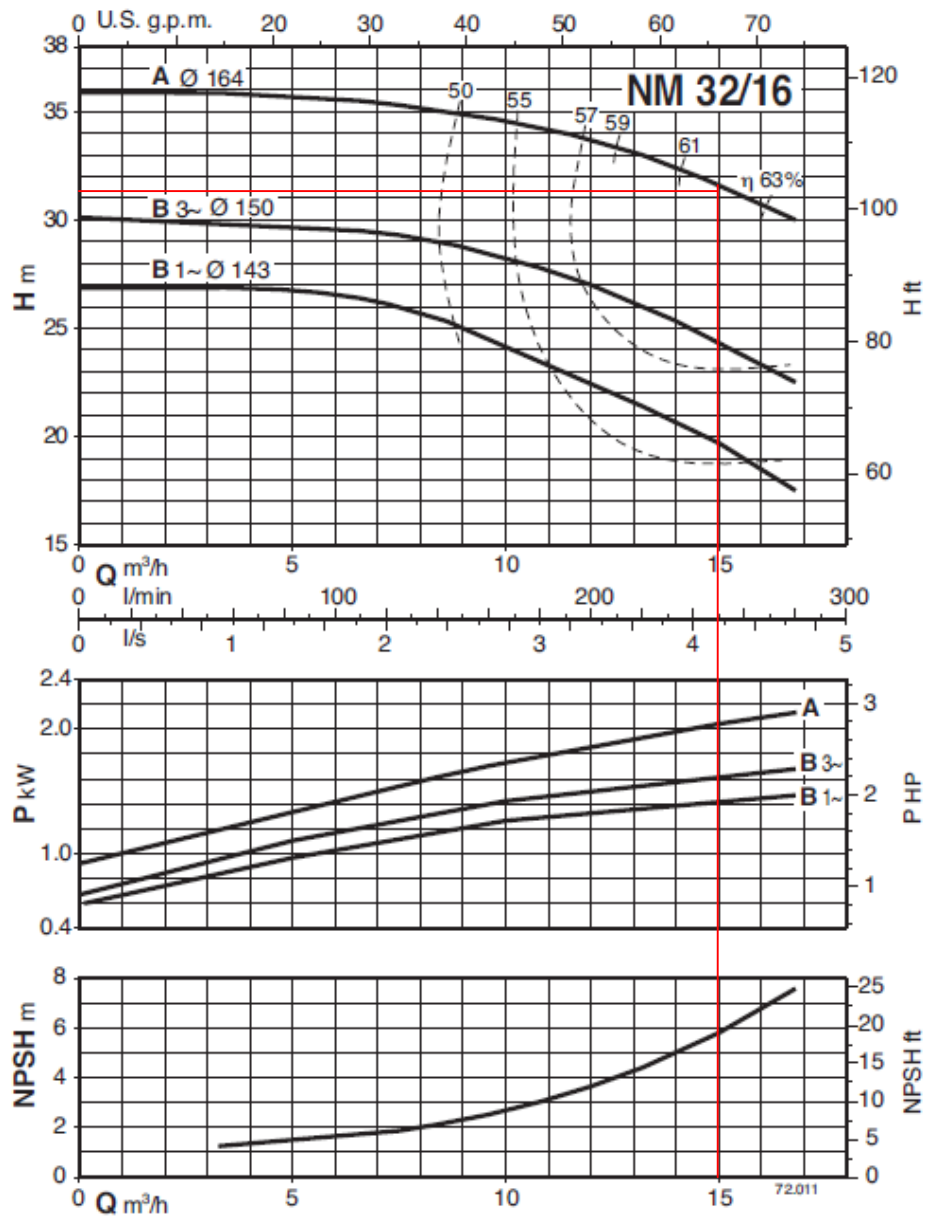
	Tramo de tubería	Z inicial, m	Z final, m	Presión inicial, Pa	Presión final, Pa	Pérdidas de carga, m.c.l.
<b>Zona de aspiración</b>	56-23-APT	0	0	202650,00	201475,35	0,1197
<b>Zona de impulsión</b>	57-23-APT	0	0	201475,35	506625,00	0,12

Tabla 36. Resultados de los cálculos y selección de la bomba B-APT-23-CE.

	Caudal, m <sup>3</sup> /h	$\Delta h$ , m.c.l.	NPSH, m.c.l.	P, kW	Rendimiento, %
<b>Bomba diseñada</b>	15	31,23	19,79	---	---
<b>Bomba elegida</b>	15	31,50	5,80	2,05	62

Se comprueba que no existe cavitación.

Figura 16. Selección de la bomba B-APT-23-CE.



El modelo seleccionado será el NM-32/16-A.

### 1.3.4. Cálculo de las soplantes

Tanto el aire como los gases producto de la reacción son fluidos compresibles, por lo que no se puede aplicar la ecuación de Bernoulli de la misma forma que se ha aplicado para las bombas.

Se necesita conocer cómo varía la densidad del gas en función de la presión. Suponiendo que éste se comporta como un gas ideal:

$$\rho = \frac{M_m \cdot P}{R \cdot T}$$

donde:

- $\rho$  es la densidad del fluido, kg/m<sup>3</sup>
- $M_m$  es la masa molar del fluido, g/mol.
- $P$  es la presión del fluido, Pa
- $R$  es la constante universal de los gases ideales, 8,314 J/(mol·K)
- $T$  es la temperatura del fluido, K

Sustituyendo en la ecuación de Bernoulli e integrando entre los puntos inicial y final se tiene que:

$$\frac{M_m}{R \cdot T} \cdot \frac{P_1^2 - P_2^2}{2} = \frac{G^2}{\alpha} \cdot \ln \frac{P_1}{P_2} + g \cdot h_{fs}$$

donde:

- $M_m$  es la masa molar del fluido, g/mol.
- $R$  es la constante universal de los gases ideales, 8,314 J/(mol·K)
- $T$  es la temperatura del fluido, K
- $P_1$  es la presión del fluido a la salida de la soplante, Pa
- $P_2$  es la presión del fluido en el extremo de la conducción, Pa
- $G$  es la velocidad másica del fluido, kg/(m<sup>2</sup>·s)
- $\alpha$  es un término que depende del tipo de flujo que se produzca. Es igual a 1/2 si el flujo es laminar ( $Re \leq 2000$ ) y vale 1 para flujo turbulento ( $Re \geq 4000$ )
- $g$  es la aceleración de la gravedad, 9.81 m/s<sup>2</sup>
- $h_{fs}$  son las pérdidas de presión por rozamiento en la conducción, m.c.l.

Aplicando esta ecuación se puede calcular  $P_1$ , la presión a la salida de la soplante, parámetro que se utilizará para seleccionar el equipo adecuado del catálogo.

También se puede calcular la carga que debe suministrar dicha soplante utilizando, al igual que hicimos para las bombas, la ecuación de Bernoulli:

$$\Delta h = \frac{P_1 - P_2}{\rho \cdot g} + \frac{v_2^2}{2 \cdot g} - \frac{v_1^2}{2 \cdot g} + h_{fs}$$



A continuación mostramos los cálculos realizados para las dos soplantes de nuestro proceso:

#### 1.3.4.1. Soplante B-PR-8-SO

Para su cálculo conocemos los siguientes datos:

$$M_m = 0.02868 \text{ kg/mol}$$

$$R = 8.314 \text{ J/(K}\cdot\text{mol)}$$

$$T = 550 \text{ K}$$

$$P_2 = 111457.5 \text{ Pa}$$

$$G = 23.331 \text{ kg/(m}^2\cdot\text{s)}$$

$$\alpha = 1$$

$$g = 9.81 \text{ m/s}^2$$

$$h_{fs} = 168.98 \text{ m.c.l.}$$

En primer lugar calculamos la presión a la salida de la soplante,  $P_1$ , aplicando la ecuación de Bernouilli para fluidos compresibles:

$$\frac{0.02868}{8.314 \cdot 550} \cdot \frac{P_1^2 - 111457.5}{2} = \frac{23.331^2}{1} \cdot \ln \frac{P_1}{111457.5} + 9.81 \cdot 168.98; P_1 = 238114 \text{ Pa}$$

Y a continuación calculamos la carga que se debe suministrar a dicha soplante mediante la ecuación de Bernouilli:

$$\Delta h = \frac{238114 - 111457.5}{1.096 \cdot 9.81} + \frac{27.37^2}{2 \cdot 9.81} - \frac{27.65^2}{2 \cdot 9.81} + 168.98 = 11948.27 \text{ m.c.l.}$$

Para la utilización de la ecuación anterior se ha tomado una densidad media en toda la conducción.

#### 1.3.4.2. Soplante B-SE-10-SO

Para su cálculo conocemos los siguientes datos:

$$M_m = 0.02868 \text{ kg/mol}$$

$$R = 8.314 \text{ J/(K}\cdot\text{mol)}$$

$$T = 373 \text{ K}$$

$$P_2 = 146921.25 \text{ Pa}$$

$$G = 36.569 \text{ kg/(m}^2\cdot\text{s)}$$

$$\alpha = 1$$

$$g = 9.81 \text{ m/s}^2$$

$$h_{fs} = 84.25 \text{ m.c.l.}$$

En primer lugar calculamos la presión a la salida de la soplante,  $P_1$ , aplicando la ecuación de Bernouilli para fluidos compresibles:

$$\frac{0.02868}{8.314 \cdot 373} \cdot \frac{P_1^2 - 146921.25}{2} = \frac{36.569^2}{1} \cdot \ln \frac{P_1}{146921.25} + 9.81 \cdot 84.25; P_1 = 262025 \text{ Pa}$$

Y a continuación calculamos la carga que se debe suministrar a dicha soplante mediante la ecuación de Bernouilli:

$$\Delta h = \frac{262025 - 146921.25}{1.891 \cdot 9.81} + \frac{27.37^2}{2 \cdot 9.81} - \frac{22.25^2}{2 \cdot 9.81} + 84.25 = 6302 \text{ m.c.l.}$$

Para la utilización de la ecuación anterior se ha tomado una densidad media en toda la conducción.

## 1.4. Red de abastecimiento de agua potable

### 1.4.1. Dimensionamiento de las redes de distribución

El dimensionado de la red se hará a partir del dimensionado de cada tramo, y para ello se partirá del circuito considerado como más desfavorable que será aquel que cuente con la mayor pérdida de presión debida tanto al rozamiento como a su altura geométrica. El dimensionado de los tramos se hará de acuerdo al procedimiento que se presenta a continuación.

Para dimensionar los tramos, en primer lugar, se determina el caudal máximo de cada uno. Este caudal máximo de cada tramo será igual a la suma de los caudales de los puntos de consumo alimentados por el mismo de acuerdo con la tabla 57 de la memoria.

En la tabla 37 se detallan los caudales de cada tramo, teniendo en cuenta los caudales instantáneos mínimos especificados en el Documento Básico sobre Salubridad HS 4.

Tabla 37. Caudal instantáneo mínimo en cada tramo.

Ubicación	Tramo	Caudal de agua fría, L/s	Caudal de ACS, L/s
Almacén AL2	AL2-1/G'-1	18,00	0,00
	AL2-2/G-8	0,20	0,00
Almacén AL3	AL3-1/G-8	0,20	0,00
Almacén AL1	AL1-1/AL1-2	0,20	0,00
	AL1-1/AL1-3	0,20	0,00
Almacén AL4	AL4-1/G-9	0,20	0,00
Edificio PR	PR-1/PR-2	0,20	0,00
	PR-1/PR-3	0,20	0,00
Edificio S	S-1/S-2	0,20	0,00
	S-1/S-3	0,20	0,00
Edificio PU	PU-1/PU-2	0,20	0,00
	PU-1/PU-3	0,20	0,00
Edificio AP	AP-3/AP-19	0,15	0,10
	AP-4/AP-18	0,85	0,13

Edificio AP	AP-5/AP-17	0,20	0,065
	AP-6/AP-16	0,40	0,13
	AP-10/AP-11	0,15	0,10
	AP-10/AP-12	0,85	0,13
	AP-9/AP-13	0,20	0,065
	AP-8/AP-14	0,40	0,13
	AP-7/AP-15	0,20	0,10
	AP-9/AP-10	1,00	0,23
	AP-8/AP-9	1,20	0,295
	AP-7/AP-8	1,60	0,425
	AP-6/AP-7	1,80	0,525
	AP-5/AP-6	2,20	0,655
	AP-4/AP-5	2,40	0,72
	AP-3/AP-4	3,25	0,85
	AP-1/AP-3	3,40	0,00
	AP-2/AP-3	0,00	0,95
AP-1/AP-2	0,95	0,00	
Edificio VS	VS-3/VS-7	1,90	0,80
	VS-4/VS-5	1,70	0,70
	VS-4/VS-6	0,05	0,03
	VS-4/VS-3	1,75	0,73
	VS-1/VS-3	1,75	0,00
	VS-2/VS-3	0,00	0,73
	VS-1/VS-2	0,73	0,00
Edificio CL	CL-1/CL-3	0,30	0,00
	CL-2/CL-4	0,30	0,00

Edificio CL	CL-2/CL-5	0,30	0,00
	CL-1/CL-6	0,30	0,00
	CL-1/CL-2	0,60	0,00
Edificio MT	MT-1/MT-3	0,35	0,00
	MT-1/MT-2	0,20	0,00
Derivaciones colectivas	AL2-2/G-8	0,20	0,00
	AL3-1/G-8	0,20	0,00
	S-1/G-7	0,40	0,00
	VS-1/G-6	2,48	0,00
	AP-1/G-5	4,35	0,00
	CL-1/G-4	1,20	0,00
	MT-1/G-3	0,55	0,00
	PR-1/G-10	0,40	0,00
	AL1-1/G-10	0,40	0,00
	AL4-1/G-9	0,20	0,00
	PU-1/G-2	0,40	0,00
Distribuidor general	G-8/G-7	0,40	0,00
	G-7/G-6	0,80	0,00
	G-6/G-5	3,28	0,00
	G-5/G-4	7,63	0,00
	G-4/G-3	8,83	0,00
	G-3/G-2	9,38	0,00
	G-10/G-9	0,80	0,00
	G-9/G-2	1,00	0,00
	G-2/G-1	10,78	0,00
	AL2-1/G'-1	18,00	0,00

Las redes de abastecimiento de agua fría y de agua caliente sanitaria se van a dimensionar por separado.

#### 1.4.1.1. Red de abastecimiento de agua fría

En los tramos en los que haya más de un punto de consumo se deben establecer los coeficientes de simultaneidad de cada tramo de acuerdo con un criterio adecuado y se debe determinar el caudal de cálculo en cada tramo como producto del caudal máximo por el coeficiente de simultaneidad correspondiente.

Se pueden aplicar diferentes expresiones para calcular el coeficiente de simultaneidad. Una de las más utilizadas es la siguiente:

$$k_v = \frac{0.8}{\sqrt{n-1}}$$

donde  $k_v$  es el coeficiente de simultaneidad y  $n$  es el número de grifos instalados. Si el coeficiente de simultaneidad es inferior a 0.3 se toma siempre como mínimo el valor de 0.3.

Este coeficiente se multiplicará por la suma de todos los caudales máximos necesarios, obteniéndose el caudal de cálculo a partir del cual se dimensionará la red. Como todos los caudales son menores de 20 L/s se va a usar la siguiente ecuación:

$$Q_C = 0.682 \cdot Q_P^{0.45} - 0.14, \quad L/s$$

donde:

- $Q_C$  es el caudal de cálculo a partir del cual se dimensionará la red, L/s
- $Q_P$  es el caudal máximo de cada tramo, L/s

Posteriormente se elige una velocidad de cálculo comprendida, para tuberías metálicas, entre 0.50 y 2.00 m/s. Se va a tomar una velocidad de 1.25 m/s.

A continuación se obtiene el diámetro correspondiente a cada tramo en función del caudal y de la velocidad. Los diámetros calculados han de tener unos valores mínimos establecidos en el Documento Básico sobre Salubridad HS 4 del CTE.

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_C}{\pi \cdot v}} = \sqrt{\frac{4 \cdot M}{\pi \cdot G}}$$

donde:

- $D$  es el diámetro interno de la tubería, m
- $Q_C$  es el caudal de fluido, m<sup>3</sup>/s
- $v$  es la velocidad del fluido, m/s

Se elegirá del catálogo el diámetro inmediatamente superior al mínimo.

Se comprobará que la presión disponible en el punto de consumo más desfavorable supera los valores mínimos (100 kPa) y que en todos los puntos de consumo no se supera el valor máximo (500 kPa), de acuerdo con lo siguiente:

En primer lugar se determina la pérdida de presión del circuito sumando las pérdidas de presión total de cada tramo. Las pérdidas de carga localizadas se evaluarán a partir de los elementos de la instalación.

$$h_f = \frac{F}{g} = \frac{2 \cdot f \cdot L_T \cdot v^2}{D \cdot g}$$

donde:

- $h_f$  es la pérdida de carga por rozamiento, m
- $F$  es la pérdida de carga por rozamiento,  $m^2/s^2$
- $g$  es la aceleración de la gravedad,  $9.81 \text{ m/s}^2$ .
- $f$  es el factor de rozamiento, adimensional.
- $L_T$  es la longitud total de la tubería, m. Engloba la longitud efectiva del tramo recto más la longitud equivalente de los accesorios que se encuentran en el mismo.
- $v$  es la velocidad de flujo del fluido, m/s.
- $D$  es el diámetro interno de la tubería, m.

Las pérdidas de carga localizadas se van a estimar como un 25 % de la producida sobre la longitud del tramo, de esta manera:

$$L = 1.25 \cdot \text{Longitud efectiva del tramo recto, m}$$

En cada tramo se tendrá en cuenta su velocidad, diámetro y factor de fricción correspondiente ( $\varepsilon = 0.000024 \text{ m}$  para el acero galvanizado). Se van a considerar la densidad y la viscosidad iguales a  $1000 \text{ kg/m}^3$  y  $0.001 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ .

Los resultados de todos estos cálculos se muestran en la tabla 38:

Tabla 38. Cálculo de la red de abastecimiento de agua fría.

Ubicación	Tramo	Caudal de cálculo, L/s	Velocidad de diseño, m/s	D interno mínimo, cm	DN, pulg.	D externo final, cm	Espesor, cm	D interno final, cm	Velocidad, m/s	f	L total, m	H, m.c.l.
Edificio AL2	AL2-1/G'-1	18,00	1,25	13,54	5	14,13	0,277	13,58	1,24	0,004390	306,21	3,12
	AL2-2/G-8	0,20	1,25	1,43	1/2	2,13	0,165	1,80	0,78	0,007640	76,71	4,06
Edificio AL3	AL3-1/G-8	0,20	1,25	1,43	1/2	2,13	0,165	1,80	0,78	0,007640	19,21	1,02
Edificio AL1	AL1-1/AL1-2	0,20	1,25	1,43	1/2	2,13	0,165	1,80	0,78	0,007640	1,44	0,08
	AL1-1/AL1-3	0,20	1,25	1,43	1/2	2,13	0,165	1,80	0,78	0,007640	18,75	0,99
Edificio AL4	AL4-1/G-9	0,20	1,25	1,43	1/2	2,13	0,165	1,80	0,78	0,007640	28,34	1,50
Edificio PR	PR-1/PR-2	0,20	1,25	1,43	1/2	2,13	0,165	1,80	0,78	0,007640	1,44	0,08
	PR-1/PR-3	0,20	1,25	1,43	1/2	2,13	0,165	1,80	0,78	0,007640	74,68	3,95
Edificio S	S-1/S-2	0,20	1,25	1,43	1/2	2,13	0,165	1,80	0,78	0,007640	1,44	0,08
	S-1/S-3	0,20	1,25	1,43	1/2	2,13	0,165	1,80	0,78	0,007640	56,41	2,99
Edificio PU	PU-1/PU-2	0,20	1,25	1,43	1/2	2,13	0,165	1,80	0,78	0,007640	1,44	0,08
	PU-1/PU-3	0,20	1,25	1,43	1/2	2,13	0,165	1,80	0,78	0,007640	69,23	3,67
Edificio AP	AP-3/AP-19	0,15	1,25	1,24	3/8	1,71	0,165	1,38	1,00	0,007838	3,89	0,45
	AP-4/AP-18	0,49	1,25	2,24	3/4	2,67	0,165	2,34	1,15	0,006634	12,68	0,97
	AP-5/AP-17	0,19	1,25	1,39	1/2	2,13	0,165	1,80	0,75	0,007715	8,56	0,42
	AP-6/AP-16	0,31	1,25	1,78	1/2	2,13	0,165	1,80	1,22	0,007030	11,60	1,37
	AP-10/AP-11	0,15	1,25	1,24	3/8	1,71	0,165	1,38	1,00	0,007838	4,75	0,54
	AP-10/AP-12	0,49	1,25	2,24	3/4	2,67	0,165	2,34	1,15	0,006634	12,68	0,97
	AP-9/AP-13	0,19	1,25	1,39	1/2	2,13	0,165	1,80	0,75	0,007715	8,56	0,42
	AP-8/AP-14	0,31	1,25	1,78	1/2	2,13	0,165	1,80	1,22	0,007030	11,60	1,37
	AP-7/AP-15	0,20	1,25	1,43	1/2	2,13	0,165	1,80	0,78	0,007640	15,16	0,80
	AP-9/AP-10	0,64	1,25	2,56	1 1/4	4,22	0,165	3,89	0,54	0,006727	2,28	0,02
AP-8/AP-9	0,83	1,25	2,92	1 1/4	4,22	0,165	3,89	0,70	0,006386	0,75	0,01	



<b>Edificio AP</b>	AP-7/AP-8	1,15	1,25	3,42	1 1/4	4,22	0,165	3,89	0,97	0,006021	2,04	0,06
	AP-6/AP-7	1,35	1,25	3,70	2	6,03	0,165	5,70	0,53	0,006145	5,79	0,04
	AP-5/AP-6	1,66	1,25	4,11	2	6,03	0,165	5,70	0,65	0,005898	0,75	0,01
	AP-4/AP-5	1,85	1,25	4,34	2	6,03	0,165	5,70	0,72	0,005777	2,28	0,02
	AP-3/AP-4	2,34	1,25	4,88	2	6,03	0,165	5,70	0,92	0,005534	2,03	0,03
	AP-1/AP-3	2,49	1,25	5,04	2	6,03	0,165	5,70	0,98	0,005475	1,49	0,03
	AP-2/AP-3	0,00	1,25	0,00	---	---	---	---	---	---	---	---
	AP-1/AP-2	0,95	1,25	3,11	1 1/4	4,22	0,165	3,89	0,80	0,006230	0,65	0,01
<b>Edificio VS</b>	VS-3/VS-7	0,77	1,25	2,80	1	3,34	0,165	3,01	1,08	0,006303	21,50	1,08
	VS-4/VS-5	0,73	1,25	2,72	1	3,34	0,165	3,01	1,02	0,006369	20,33	0,91
	VS-4/VS-6	0,05	1,25	0,71	1/8	1,03	0,124	0,78	1,05	0,009179	11,65	3,06
	VS-4/VS-3	0,78	1,25	2,81	1	3,34	0,165	3,01	1,09	0,006295	7,58	0,38
	VS-1/VS-3	0,78	1,25	2,81	1	3,34	0,165	3,01	1,09	0,006295	5,35	0,27
	VS-2/VS-3	0,00	1,25	0,00	---	---	---	---	---	---	---	---
	VS-1/VS-2	0,73	1,25	2,72	1	3,34	0,165	3,01	1,02	0,006370	2,50	0,11
<b>Edificio CL</b>	CL-1/CL-3	0,30	1,25	1,75	1/2	2,13	0,165	1,80	1,17	0,007077	8,75	0,97
	CL-2/CL-4	0,30	1,25	1,75	1/2	2,13	0,165	1,80	1,17	0,007077	1,44	0,16
	CL-2/CL-5	0,30	1,25	1,75	1/2	2,13	0,165	1,80	1,17	0,007077	1,44	0,16
	CL-1/CL-6	0,30	1,25	1,75	1/2	2,13	0,165	1,80	1,17	0,007077	8,75	0,97
	CL-1/CL-2	0,60	1,25	2,47	1	3,34	0,165	3,01	0,84	0,006593	1,20	0,04
<b>Edificio MT</b>	MT-1/MT-3	0,29	1,25	1,70	1/2	2,13	0,165	1,80	1,12	0,007141	15,78	1,59
	MT-1/MT-2	0,20	1,25	1,43	1/2	2,13	0,165	1,80	0,78	0,007640	1,44	0,08
<b>Derivación colectiva</b>	AL2-2/G-8	0,20	1,25	1,43	1/2	2,13	0,165	1,80	0,78	0,007640	76,71	4,06
	AL3-1/G-8	0,20	1,25	1,43	1/2	2,13	0,165	1,80	0,78	0,007640	19,21	1,02
	S-1/G-7	0,40	1,25	2,02	3/4	2,67	0,165	2,34	0,93	0,006892	14,66	0,77
	VS-1/G-6	1,50	1,25	3,91	1 1/2	4,83	0,165	4,50	0,95	0,005820	16,34	0,39

<b>Derivación colectiva</b>	AP-1/G-5	3,44	1,25	5,92	2 1/2	7,30	0,211	6,88	0,93	0,005259	48,39	0,65
	CL-1/G-4	1,20	1,25	3,50	1 1/4	4,22	0,165	3,89	1,01	0,005972	2,03	0,06
	MT-1/G-3	0,49	1,25	2,22	3/4	2,67	0,165	2,34	1,13	0,006655	8,06	0,60
	PR-1/G-10	0,40	1,25	2,02	3/4	2,67	0,165	2,34	0,93	0,006892	114,15	5,97
	AL1-1/G-10	0,40	1,25	2,02	3/4	2,67	0,165	2,34	0,93	0,006892	19,93	1,04
	AL4-1/G-9	0,20	1,25	1,43	1/2	2,13	0,211	1,71	0,87	0,007603	28,34	1,94
	PU-1/G-2	0,40	1,25	2,02	3/4	2,67	0,165	2,34	0,93	0,006892	37,43	1,96
<b>Distribuidor general</b>	G-8/G-7	0,40	1,25	2,02	3 1/3	10,16	0,211	9,74	0,05	0,009269	20,05	0,00
	G-7/G-6	0,80	1,25	2,85	3 1/3	10,16	0,211	9,74	0,11	0,007709	31,09	0,01
	G-6/G-5	2,30	1,25	4,84	3 1/3	10,16	0,211	9,74	0,31	0,006011	24,38	0,03
	G-5/G-4	5,74	1,25	7,65	3 1/3	10,16	0,211	9,74	0,77	0,005009	20,88	0,13
	G-4/G-3	6,94	1,25	8,41	3 1/3	10,16	0,211	9,74	0,93	0,004844	20,05	0,18
	G-3/G-2	7,43	1,25	8,70	3 1/3	10,16	0,211	9,74	1,00	0,004788	20,04	0,20
	G-10/G-9	0,80	1,25	2,85	1 1/4	4,22	0,165	3,89	0,67	0,006439	63,96	0,98
	G-9/G-2	1,00	1,25	3,19	1 1/4	4,22	0,165	3,89	0,84	0,006171	7,98	0,18
	G-2/G-1	8,83	1,25	9,48	3 1/3	10,16	0,211	9,74	1,19	0,004653	109,40	1,50
	AL2-1/G'-1	18,00	1,25	13,54	5	14,13	0,277	13,58	1,24	0,004390	306,21	3,12

Finalmente, debemos comprobar la suficiencia de la presión disponible: una vez obtenidos los valores de las pérdidas de presión del circuito, que se muestran en la tabla 38, se comprueba si son sensiblemente iguales a la presión disponible que queda después de descontar a la presión total, la altura geométrica y la residual del punto de consumo más desfavorable. En el caso de que la presión disponible en el punto de consumo fuera inferior a la presión mínima exigida sería necesaria la instalación de un grupo de presión.

Tabla 39. Cálculo de las pérdidas de carga en los puntos de consumo más desfavorables.

Ubicación	Punto más desfavorable	Pérdida de carga, m.c.l.	Presión final, kPa	Necesidad de grupo de presión	Supera la presión máxima
Almacén AL2	AL2-1	3,12	263,65	No	No
Almacén AL2	AL2-2	7,10	224,60	No	No
Almacén AL3	AL3-1	4,06	254,47	No	No
Almacén AL1	AL1-3	5,70	238,37	No	No
Almacén AL4	AL4-1	4,62	248,97	No	No
Edificio PR	PR-3	13,59	160,98	No	No
Edificio S	S-3	6,79	227,64	No	No
Edificio PU	PU-3	8,12	214,62	No	No
Edificio AP	AP-12	8,85	207,49	No	No
Edificio VS	VS-6	7,14	224,24	No	No
Edificio CL	CL-3	3,90	255,97	No	No
Edificio MT	MT-3	4,88	246,36	No	No

La presión final se calcula teniendo en cuenta que la presión en la acometida es de 30 m.c.l.

#### 1.4.1.2. Red de abastecimiento de agua caliente sanitaria (ACS)

Sólo se instalará una red de agua caliente sanitaria en los edificios de administración y personal y de vestuarios y servicios sanitarios. Se va a dimensionar de igual manera que la red de abastecimiento de agua fría. Las características de cada uno de los tramos de la red son las siguientes:

Tabla 40. Cálculo de la red de abastecimiento de agua caliente sanitaria (ACS).

Ubicación	Tramo	Caudal de cálculo, L/s	Velocidad de diseño, m/s	D interno mínimo, cm	DN, pulg.	D externo final, cm	Espesor, cm	D interno final, cm	Velocidad, m/s	f	L total, m	H, m.c.l.
Edificio AP	AP-3/AP-19	0,10	1,25	1,01	1/4	1,37	0,165	1,04	1,17	0,008248	3,46	0,77
	AP-4/AP-18	0,13	1,25	1,16	1/2	2,13	0,165	1,80	0,52	0,008342	8,81	0,22
	AP-5/AP-17	0,06	1,25	0,78	1/2	2,13	0,165	1,80	0,23	0,010160	4,64	0,03
	AP-6/AP-16	0,13	1,25	1,16	1/2	2,13	0,165	1,80	0,52	0,008342	8,81	0,22
	AP-10/AP-11	0,10	1,25	1,01	1/4	1,37	0,165	1,04	1,17	0,008248	6,28	1,40
	AP-10/AP-12	0,13	1,25	1,16	1/2	2,13	0,165	1,80	0,52	0,008342	8,81	0,22
	AP-9/AP-13	0,06	1,25	0,78	1/2	2,13	0,165	1,80	0,23	0,010160	4,64	0,03
	AP-8/AP-14	0,13	1,25	1,16	1/2	2,13	0,165	1,80	0,52	0,008342	8,81	0,22
	AP-7/AP-15	0,10	1,25	1,01	1/4	1,37	0,165	1,04	1,17	0,008248	14,94	3,32
	AP-9/AP-10	0,23	1,25	1,54	3/4	2,67	0,165	2,34	0,54	0,007691	2,28	0,04
	AP-8/AP-9	0,292	1,25	1,72	3/4	2,67	0,165	2,34	0,68	0,007331	0,75	0,02
	AP-7/AP-8	0,424	1,25	2,08	3/4	2,67	0,165	2,34	0,99	0,006818	2,04	0,12
	AP-6/AP-7	0,524	1,25	2,31	1 1/4	4,22	0,165	3,89	0,44	0,007027	5,79	0,04
	AP-5/AP-6	0,656	1,25	2,59	1 1/4	4,22	0,165	3,89	0,55	0,006701	0,75	0,01
	AP-4/AP-5	0,72	1,25	2,70	1 1/4	4,22	0,165	3,89	0,60	0,006583	2,28	0,03
	AP-3/AP-4	0,85	1,25	2,94	1 1/4	4,22	0,165	3,89	0,71	0,006366	2,81	0,05
AP-2/AP-3	0,95	1,25	3,11	1 1/4	4,22	0,165	3,89	0,80	0,006233	0,93	0,02	
Edificio VS	VS-3/VS-7	0,48	1,25	2,20	3/4	2,67	0,165	2,34	1,11	0,006679	17,29	1,24
	VS-4/VS-5	0,44	1,25	2,11	3/4	2,67	0,165	2,34	1,02	0,006775	17,80	1,10
	VS-4/VS-6	0,03	1,25	0,55	1/8	1,03	0,124	0,78	0,63	0,010231	11,65	1,23
	VS-4/VS-3	0,47	1,25	2,19	3/4	2,67	0,165	2,34	1,09	0,006695	7,58	0,53
	VS-2/VS-3	0,47	1,25	2,19	3/4	2,67	0,165	2,34	1,09	0,006695	6,51	0,45

En la tabla 41 mostramos la presión en los puntos de consumo más desfavorables de esta red:

Tabla 41. Cálculo de las pérdidas de carga en los puntos de consumo más desfavorables.

Ubicación	Punto más desfavorable	Pérdida de carga, m.c.l.	Presión final, kPa	Necesidad de grupo de presión	Supera la presión máxima
Edificio AP	AP-11	7,86	217,15	No	No
Edificio VS	VS-6	4,88	246,36	No	No

Para el cálculo del espesor de aislante se va a usar la tabla y la ecuación facilitadas en el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios:

Tabla 42. Espesores mínimos de aislamiento (mm) de tuberías y accesorios que transportan fluidos calientes que discurren por el interior de edificios.

Diámetro exterior (mm)	Temperatura máxima del fluido ( °C)		
	40...60	> 60...100	> 100...180
$D \leq 35$	25	25	30
$35 < D \leq 60$	30	30	40
$60 < D \leq 90$	30	30	40
$90 < D \leq 140$	30	40	50
$140 < D$	35	40	50

$$d = \frac{D}{2} \cdot \left[ \exp \left( \frac{\lambda}{\lambda_{ref}} \cdot \ln \frac{D + 2 \cdot d_{ref}}{D} \right) - 1 \right]$$

donde:

- $d$  es el espesor mínimo del material empleado, mm
- $D$  es el diámetro interior del material aislante, coincidente con el diámetro exterior de la tubería, mm.
- $\lambda$  es la conductividad térmica del material empleado, 0.035 W/(m·K)
- $\lambda_{ref}$  es la conductividad térmica de referencia, 0.04 W/(m·K) a 10 °C
- $d_{ref}$  es el espesor mínimo de referencia, 30 ó 35 mm según el tramo (se le suma 5 mm al indicado en la tabla por ser una red de ACS)

Aplicando la ecuación se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 43. Espesores de aislamiento de la red de ACS.

Tramo	D interno aislante, mm	d <sub>ref</sub> , mm	Espesor aislante, mm
AP-3/AP-19	13,72	30	23,01
AP-4/AP-18	21,34	30	23,74
AP-5/AP-17	21,34	30	23,74
AP-6/AP-16	21,34	30	23,74
AP-10/AP-11	13,72	30	23,01
AP-10/AP-12	21,34	30	23,74
AP-9/AP-13	21,34	30	23,74
AP-8/AP-14	21,34	30	23,74
AP-7/AP-15	13,72	30	23,01
AP-9/AP-10	26,67	30	24,06
AP-8/AP-9	26,67	30	24,06
AP-7/AP-8	26,67	30	24,06
AP-6/AP-7	42,16	35	28,54
AP-5/AP-6	42,16	35	28,54
AP-4/AP-5	42,16	35	28,54
AP-3/AP-4	42,16	35	28,54
AP-2/AP-3	42,16	35	28,54
VS-3/VS-7	26,67	30	24,06
VS-4/VS-5	26,67	30	24,06
VS-4/VS-6	10,29	30	22,50
VS-4/VS-3	26,67	30	24,06
VS-2/VS-3	26,67	30	24,06
Retorno	28,70	30	24,17

Finalmente se realiza el dimensionamiento de los acumuladores de calor del edificio de administración y personal y del edificio de vestuarios y servicios sanitarios calculando el calor necesario para elevar la temperatura del agua a 60 °C:

- Edificio de administración y personal:

$$Q = m \cdot c_p \cdot (T_f - T_i) = 0.95 \cdot 4.18 \cdot (60 - 20) = 158.84 \text{ kW}$$

- Edificio de vestuarios y servicios sanitarios:

$$Q = m \cdot c_p \cdot (T_f - T_i) = 0.47 \cdot 4.18 \cdot (60 - 20) = 78.58 \text{ kW}$$

## 1.5. Iluminación

### 1.5.1. Iluminación natural

Para iluminar las diferentes zonas interiores de la planta mediante luz natural se utilizarán ventanales en las naves de proceso y almacenamiento, y ventanas en los edificios de oficinas, control, vestuarios y taller.

El cálculo del número de lucernarios (ventanales o ventanas) necesarios se realiza mediante la siguiente expresión:

$$S = \mu \cdot \alpha \cdot \frac{E}{E_a} \cdot S_l$$

donde:

- $S$  = superficie necesaria de lucernario,  $m^2$ .
- $\mu$  = factor de corrección, función del factor de luz de día. Dicho factor depende de la inclinación de la cubierta y de la relación longitud-altura del local. Este valor oscila entre 1 y 3, tomándose un valor de 1.5.
- $\alpha$  = factor de corrección que es función de la transmisión del material del lucernario y del grado de limpieza del mismo. Puede variar entre 1.2 y 5, eligiendo para el diseño un valor de 2.
- $E$  = iluminación deseada, lux. Se tomarán los valores recomendados en la Enciclopedia de Salud y Seguridad en el Trabajo.
- $E_a$  = iluminación proporcionada por el exterior, se tomará como 10000 lux.
- $S_l$  = Superficie en planta del edificio a iluminar,  $m^2$ .

En caso de que no se puedan instalar la cantidad necesaria de lucernarios por limitaciones constructivas o de espacio, habrá que reducir el número de éstos. En tal caso, se recurrirá parcialmente a la iluminación artificial durante el día.

Los cálculos realizados se resumen en la tabla 44:



Tabla 44. Iluminación natural.

Zona	Iluminación deseada, lux	Superficie a iluminar, m <sup>2</sup>	Superficie ventanales necesaria, m <sup>2</sup>	Superficie ventanales instalada, m <sup>2</sup>	Iluminación por fuentes artificiales, lux
Almacén de materias primas (agua)	150	795	35,8	36,0	---
Sección de producción	750	2179	490,3	144,0	530
Sección de separación	750	1689	380,0	108,0	537
Sección de purificación	750	1677	377,3	180,0	392
Recepción	300	43	3,9	6,0	---
Salón de usos múltiples	300	64	5,8	7,2	---
Oficinas	750	163	36,7	33,6	63
Aseos	300	65	5,9	4,8	54
Sala de limpieza	150	17	0,8	2,4	---
Comedor	300	215	19,4	9,6	151
Pasillos	300	190	17,1	24,0	---
Vestuarios	300	127	11,4	4,8	174
Servicios sanitarios	750	44	9,9	2,4	568
Sala de control	750	50	11,3	1,2	670
Laboratorios	2000	75	45,0	4,8	1787
Edificio de distribución eléctrica	150	94	4,2	4,8	---
Sala de calderas	150	105	4,7	3,6	36
Taller	750	145	32,6	7,2	584
Almacén del taller	300	41	3,7	2,4	105

Las ventanas en el edificio de administración y personal tendrán unas dimensiones de 1 m x 1.2 m, mientras que en el resto de edificios serán de 2 m x 3 m.

### 1.5.2. Iluminación artificial

El cálculo del alumbrado de interiores se realiza mediante las siguientes ecuaciones:

$$\phi_t = \frac{E \cdot S}{f_c \cdot h}$$

donde:

- $\phi_t$  = flujo luminoso, lumen.
- E = nivel de iluminación requerido, lux. Se tomarán los valores recomendados en la Enciclopedia de Salud y Seguridad en el Trabajo.
- S = superficie en planta de la zona que se pretende iluminar, m<sup>2</sup>.
- $f_c$  = factor de conservación, que depende del grado de suciedad ambiental y de la frecuencia de la limpieza del local. Se toma un valor medio de 0.8.
- h = factor de utilización, que depende de la eficacia y distribución de las luminarias, de su altura de montaje, de las dimensiones del local y de los factores de reflexión de paredes, techos y suelos. La influencia de las dimensiones del local se determina mediante el índice del local, IL, que se define mediante la siguiente expresión:

$$IL = \frac{a \cdot b}{l \cdot (a + b)}$$

donde:

- a = longitud de la superficie a iluminar, m.
- b = anchura de la superficie a iluminar, m.
- l = distancia entre la luminaria y el plano de trabajo, m. El plano de trabajo se sitúa a 0.85 m del suelo.

Los factores de reflexión de paredes, techos y suelos varían en función de su color y el material de su superficie.

Tabla 45. Factores de reflexión de paredes, techos y suelos.

Superficie	Muy bueno	Medio	Mediocre	Débil
Techo	0.8	0.5	0.3	---
Pared	0.8	0.5	0.3	---
Suelo	---	---	---	0.1

Conociendo el índice del local y los índices de reflexión, se puede hallar el factor de utilización usando la siguiente tabla:

Tabla 46. Factor de utilización.

<b>IL</b>	1	1.2	1.5	2	2.5	3	4	5	6	8	10
<b>h</b>	0.22	0.27	0.33	0.40	0.46	0.50	0.56	0.60	0.63	0.67	0.70

Una vez calculado el flujo luminoso, el número de puntos de luz necesario se halla mediante la siguiente expresión:

$$N = \frac{\phi_t}{\phi_l}$$

donde:

- N = número de puntos de luz.
- $\phi_l$  = flujo luminoso emitido por la luminaria, lumen.

Se tomará el número de puntos de luz como el entero inmediatamente superior a N.

Para conseguir una distribución uniforme de la iluminación sobre una zona en concreto se deben seguir los siguientes consejos:

- La altura aconsejable de la luminaria sobre el plano de trabajo ha de ser igual a  $\frac{3}{4}$  de la distancia entre el plano de trabajo y el techo.
- La separación entre las luminarias no debe ser mayor de 1.5 veces su altura sobre el plano de trabajo.

Los cálculos realizados se resumen a continuación:

Tabla 47. Iluminación artificial.

Zona	Nivel de iluminación, lux	Longitud, m	Anchura, m	Altura del plano de trabajo, m	Altura del techo, m	Índice del local	Factor de utilización	Flujo luminoso, lumen	Número de puntos de luz
Almacén de materias primas (agua)	150	37	27	1,75	12	2,03	0,40	372656,25	7
Sección de producción	750	57	37	1,75	12	2,92	0,50	4085625,00	46
Sección de separación	750	40	37	1,75	12	2,50	0,46	3442255,43	39
Sección de purificación	750	57	29	1,75	12	2,50	0,46	3417798,91	38
Recepción	300	8	5	1,75	3	3,28	0,50	32250,00	7
Salón de usos múltiples	300	8	8	0,85	3	2,48	0,46	52173,91	11
Oficinas	750	16	10	0,85	3	3,82	0,56	272879,46	53
Aseos	300	5	4	1,75	3	2,37	0,46	52989,13	11
Sala de limpieza	150	3	3	1,75	3	1,60	0,33	9659,09	2
Comedor	300	23	11	0,85	3	4,61	0,60	134375,00	26
Pasillos	300	13	8	1,75	3	5,28	0,60	118750,00	23
Vestuarios	300	17	10	1,75	3	6,72	0,63	75595,24	15
Servicios sanitarios	750	9	5	0,85	3	1,99	0,40	103125,00	20
Sala de control	750	10	5	0,85	3	2,07	0,40	117187,50	23
Laboratorios	2000	10	7	0,85	3	2,55	0,46	407608,70	8
Edificio de distribución eléctrica	150	12	7	1,75	3	4,72	0,60	29375,00	6
Sala de calderas	150	15	7	1,75	3	5,09	0,60	32812,50	7
Taller	750	12	11	1,75	6	1,80	0,40	339843,75	7
Almacén del taller	300	12	4	1,75	6	0,94	0,22	69886,36	2

### 1.5.3. Iluminación exterior

El número de luminarias necesarias para conseguir un nivel de iluminación determinado,  $E_m$ , se halla mediante la expresión:

$$N = \frac{E_m \cdot S}{\phi_p \cdot h \cdot f_c}$$

donde:

- $N$  = número de proyectores necesarios.
- $E_m$  = iluminación media necesaria, lux.
- $S$  = Superficie en planta de la zona a iluminar,  $m^2$ .
- $\phi_p$  = flujo luminoso de cada proyector, lumen.
- $h$  = coeficiente de utilización. Se define como la relación entre los lúmenes que llegan a la superficie iluminada y los lúmenes del haz. Su valor oscila entre 0.6 y 0.9. En este caso tomaremos un valor de 0.6.
- $f_c$  = factor de conservación, que depende del grado de suciedad ambiental y de la frecuencia de la limpieza. Se toma un valor medio de 0.8.

Tabla 48. Iluminación exterior.

Zona	Iluminación, lux	Superficie, $m^2$	Flujo luminoso, lumen	Número de puntos de luz
Almacén de materias primas ( <i>n</i> -butano)	50	976	101667	6
Almacén de producto terminado (AM)	50	364	37917	3
Edificio de proceso	50	1941	202188	12
Edificio de administración y personal	50	496	51667	3
Acceso a la fábrica	50	628	65417	4
Aparcamientos	50	2604	271250	5
Zonas de circulación	50	6233	649271	38

### 1.5.4. Alumbrado de emergencia

El alumbrado de emergencia es una instalación que se diseña para entrar en funcionamiento si se produce una avería en el alumbrado normal. Esta instalación debe cumplir con lo dispuesto en el Real Decreto 842/2002, de 2 de agosto, por el que se aprueba el Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión, y más concretamente, con la Instrucción Técnica Complementaria ITC-BT-28, “Instalaciones en locales de pública concurrencia”. Este alumbrado se divide a su vez en:

- **Alumbrado de evacuación:** es la parte del alumbrado de emergencia prevista para garantizar el reconocimiento y la utilización de los medios o rutas de evacuación. En este caso tendrá, como mínimo, un nivel de iluminación de 5 lux.

- **Alumbrado ambiente o antipánico:** es la parte del alumbrado de emergencia prevista para evitar todo riesgo de pánico y proporcionar una iluminación ambiente adecuada que permita a los ocupantes identificar y acceder a las rutas de evacuación e identificar los obstáculos. Su nivel de iluminación será, como mínimo, de 0.5 lux.

Se usará también la ecuación empleada para calcular el flujo luminoso en la iluminación artificial, utilizando los mismos valores para el factor de conservación y el de utilización que los obtenidos en aquel momento. Se obtienen los siguientes valores de flujo luminoso:

Tabla 49. Alumbrado de emergencia.

Zona	Nivel de iluminación, lux	Superficie a iluminar, m <sup>2</sup>	Factor de utilización	Flujo luminoso, lumen	Número de puntos de luz
Almacén de materias primas (agua)	5	795	0,40	12421,88	4
Sección de producción	5	2179	0,50	27237,50	9
Sección de separación	5	1689	0,46	22948,37	7
Sección de purificación	0,5	1677	0,46	2278,53	1
Recepción	0,5	43	0,50	53,75	1
Salón de usos múltiples	0,5	64	0,46	86,96	1
Oficinas	0,5	163	0,56	181,92	1
Aseos	0,5	65	0,46	88,32	1
Sala de limpieza	0,5	17	0,33	32,20	1
Comedor	0,5	215	0,60	223,96	1
Pasillos	5	190	0,60	1979,17	2
Vestuarios	0,5	127	0,63	125,99	1
Servicios sanitarios	0,5	44	0,40	68,75	1
Sala de control	0,5	50	0,40	78,13	1
Laboratorios	0,5	75	0,46	101,90	1
Edificio de distribución eléctrica	0,5	94	0,60	97,92	1
Sala de calderas	0,5	105	0,60	109,38	1
Taller	0,5	145	0,40	226,56	1
Almacén del taller	0,5	41	0,22	116,48	1

## 1.6. Instalación eléctrica

En este apartado se va a diseñar y dimensionar la red eléctrica de la instalación. Se realizará un estudio de las necesidades de energía eléctrica con el objetivo de dimensionar los circuitos de la red de distribución de baja tensión. También se indicarán las protecciones necesarias y el punto de la instalación donde se encontrarán. Además se incluirá una descripción del centro de transformación.

### 1.6.1. Dimensionamiento de la instalación eléctrica

El procedimiento a seguir está definido por el Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión (REBT), el cual exige que la sección de los conductores se calcule mediante dos métodos:

- a) Intensidad máxima admisible de la conducción.
- b) Comprobación de la caída de tensión.

Por tanto, el procedimiento a seguir es el siguiente:

#### 1. Cálculo de la intensidad de corriente circulante:

Inicialmente hay que calcular la intensidad que circula por cada uno de los conductores. Para ello se parte de la potencia consumida por cada elemento perteneciente a la red eléctrica:

- ◆ Para una línea monofásica (fase-neutro):

$$I = \frac{P}{U \cdot \cos \varphi}$$

- ◆ Para una línea trifásica (tres fases más el neutro):

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \varphi}$$

donde:

- $I$  = intensidad que circula por la red, A.
- $P$  = potencia mayorada, W. Para las instalaciones de alumbrado la potencia se mayorará un 80 %. En las instalaciones de motores se mayorará un 25 % el de mayor potencia. En el caso de que todos los motores de la línea tengan la misma potencia se mayorará el más lejano a la conexión con el cuadro de distribución.
- $U$  = tensión de alimentación, V. Para la línea monofásica será de 230 V y para la línea trifásica será de 400 V.
- $\cos \varphi$  = factor de potencia, adimensional. Depende del elemento conectado a la red. Será igual a 0.8 para motores, 1 para el alumbrado y 0.9 para otros usos.



Estas ecuaciones proporcionan el módulo de la intensidad. Para las tomas de corriente se tomará la mitad de la intensidad máxima admisible en cada caso. Puesto que las tomas de corriente monofásicas son de 16 A y las de corriente trifásicas de 32 A, la intensidad de diseño será de 8 A para las primeras y 16 A para las segundas.

## 2. Cálculo de la sección del conductor:

Una vez se conoce la intensidad se puede calcular la sección usando las siguientes ecuaciones:

- ◆ Para una línea monofásica (fase-neutro):

$$S = \frac{2 \cdot \sum I_k \cdot d_k \cdot \cos \varphi_k}{c \cdot \Delta U}$$

- ◆ Para una línea trifásica (tres fases más el neutro):

$$S = \frac{\sqrt{3} \cdot \sum I_k \cdot d_k \cdot \cos \varphi_k}{c \cdot \Delta U}$$

donde:

- S = sección del conductor, mm<sup>2</sup>.
- d = longitud del conductor, m.
- c = conductividad eléctrica del conductor, m/(Ω·mm<sup>2</sup>). Se podrá utilizar cobre (c = 56 m/(Ω·mm<sup>2</sup>)) o aluminio (c = 36 m/(Ω·mm<sup>2</sup>)).
- ΔU = caída de tensión máxima admisible en el elemento más lejano, V. Respecto a la caída de tensión el REBT establece lo siguiente: “Para instalaciones industriales que se alimenten directamente en alta tensión mediante un transformador de distribución propio, se considerará que la instalación interior de baja tensión tiene su origen en la salida del transformador. En este caso las caídas de tensión máximas admisibles serán del 4.5 % para alumbrado y del 6.5 % para los demás usos.”

Por tanto, la caída de tensión admisible para los diferentes usos será la siguiente:

- Alumbrado (230 V): 10.35 V
- Motores (400 V): 26 V
- Tomas de corriente monofásicas (230 V): 14.95 V
- Tomas de corriente trifásicas (400 V): 26 V

Cuando aparezca un conjunto de cargas homogéneamente distribuidas (por ejemplo, una línea de iluminación) se sustituirá por una carga igual a la suma de todas ellas situada en el centro geométrico del segmento cargado.

La sección del conductor neutro será la especificada en la instrucción ITC-BT-07, en función de la sección de los conductores de fase o polares de la instalación. En nuestro caso, por simplicidad, los tramos que conduzcan corriente trifásica dispondrán de un neutro con la misma sección que las fases.

3. Por último, se toma la sección de conductor normalizada inmediatamente superior a la calculada y se comprueba si admite la intensidad calculada. Si no es así, se toma la sección de conductor normalizada cuya intensidad máxima admisible sea inmediatamente superior a la calculada. La sección de los conductores de distribución a los cuadros secundarios será como mínimo de  $6 \text{ mm}^2$  y a los puntos de consumo de  $1.5 \text{ mm}^2$ .

### 1.6.1.1. Cuadros de distribución

Se va a seguir el mismo procedimiento para todos los cuadros de distribución. Inicialmente se calcularán las intensidades que circulan por todas sus derivaciones, que sumadas equivalen a la intensidad que circula por la derivación que va desde el cuadro de distribución general hasta el cuadro de distribución en cuestión. Todos estos tramos irán enterrados, y serán de cobre con aislamiento de polietileno reticulado.

Según el reglamento, la máxima caída de tensión es del 6.5 % para usos generales y del 4.5 % para alumbrado. Se va a tomar una caída de tensión máxima del 2 % entre el cuadro general y el de distribución para tener margen entre estos últimos y el punto de consumo. Por tanto, para todas estas derivaciones la máxima caída de tensión será del 2 %.

#### ◆ C1:

Este cuadro de distribución suministra la electricidad necesaria para las bombas del almacén de materias primas (*n*-butano). A él están conectadas las siguientes cargas:

Tabla 50. Cargas que derivan de C1.

C1				
Carga	Potencia mayorada, kW	Factor de potencia	Tensión nominal, V	Intensidad, A
B-AMP-1-CE	21,88	0,80	400	$31,57 \cdot \vec{i} + 23,68 \cdot \vec{j}$
B-AMP-2-CE	0,94	0,80	400	$1,35 \cdot \vec{i} + 1,01 \cdot \vec{j}$

Las intensidades se han calculado utilizando la ecuación correspondiente que se indicó anteriormente y considerando la potencia consumida por cada carga.

Sumando las intensidades de todas las derivaciones de C1 se obtiene:

$$I_{C1} = 32.93 \cdot \vec{i} + 24.70 \cdot \vec{j}, \text{ A}$$

El valor del módulo de la intensidad que circula por la derivación CDG-C1 es de 41.16 A, con un factor de potencia de 0.80. Al consumirse corriente trifásica en esta

zona de la instalación esta derivación se hará con un cable tetrapolar de cobre, enterrado y con aislamiento de polietileno reticulado.

La máxima caída de tensión será del 2 % de la alimentación:

$$\Delta U = 400 \cdot 0.02 = 8 \text{ V}$$



La longitud de la línea eléctrica que une el CDG y el C1 es de 136.5 m.

Con estos datos ya se puede aplicar la ecuación para el cálculo de la sección de la línea, que en este caso será la correspondiente a la de corriente trifásica:

$$S = \frac{\sqrt{3} \cdot 41.16 \cdot 136.5 \cdot 0.80}{56 \cdot 8} = 17.38 \text{ mm}^2$$

Se selecciona el cable con un espesor inmediatamente superior, en este caso 25 mm<sup>2</sup>.

Tabla 51. Intensidad máxima admisible, en amperios, para cables con conductores de cobre en instalación enterrada (servicio permanente). ITC-BT-07

SECCIÓN NOMINAL mm <sup>2</sup>	Tema de cables unipolares (1) (2)			1 cable tripolar o tetrapolar (3)		
						
	TIPO DE AISLAMIENTO					
	XLPE	EPR	PVC	XLPE	EPR	PVC
6	72	70	63	66	64	56
10	96	94	85	88	85	75
16	125	120	110	115	110	97
25	160	155	140	150	140	125
35	190	185	170	180	175	150
50	230	225	200	215	205	180
70	280	270	245	260	250	220
95	335	325	290	310	305	265
120	380	375	335	355	350	305
150	425	415	370	400	390	340
185	480	470	420	450	440	385
240	550	540	485	520	505	445
300	620	610	550	590	565	505
400	705	690	615	665	645	570
500	790	775	685	-	-	-
630	885	870	770	-	-	-

Posteriormente se debe comprobar que la intensidad que circula por esta línea no excede la máxima admisible para el espesor seleccionado. La intensidad máxima admisible es de 150 A, valor que no es superado por la intensidad calculada.

La caída de tensión real con el espesor seleccionado se calcula despejando de la ecuación anterior:

$$\Delta U = \frac{\sqrt{3} \cdot \sum I_k \cdot d_k \cdot \cos \phi_k}{c \cdot S} = \frac{\sqrt{3} \cdot 41.16 \cdot 136.5 \cdot 0.80}{56 \cdot 25} = 5.56 \text{ V}$$

## ♦ C2:

De este cuadro de distribución parten todas las derivaciones hacia las bombas del almacén de materias primas (agua). Las cargas y sus características son las siguientes:

Tabla 52. Cargas que derivan de C2.

C2				
Carga	Potencia mayorada, kW	Factor de potencia	Tensión nominal, V	Intensidad, A
B-AMP-35-CE	6,31	0,80	400	$9,11 \cdot \vec{i} + 6,83 \cdot \vec{j}$
B-AMP-36-CE	2,38	0,80	400	$3,43 \cdot \vec{i} + 2,57 \cdot \vec{j}$

Sumando los valores de todas las intensidades se obtiene:

$$I_{C2} = 12.54 \cdot \vec{i} + 9.40 \cdot \vec{j}, A$$

El valor del módulo de la intensidad que circula por la derivación CDG-C2 es de 15.67 A, con un factor de potencia de 0.80. Al consumirse corriente trifásica en esta zona de la instalación esta derivación se hará con un cable tetrapolar de cobre, enterrado y con aislamiento de polietileno reticulado.

La máxima caída de tensión será del 2 % de la alimentación:

$$\Delta U = 400 \cdot 0.02 = 8 \text{ V}$$

La longitud de la línea eléctrica que une el CDG y el C2 es de 200 m.

Con estos datos ya se puede aplicar la ecuación para el cálculo de la sección de la línea, que en este caso será la correspondiente a la de corriente trifásica:

$$S = \frac{\sqrt{3} \cdot 15.67 \cdot 200 \cdot 0.80}{56 \cdot 8} = 9.69 \text{ mm}^2$$

Se selecciona el cable con un espesor inmediatamente superior, en este caso 10 mm<sup>2</sup>.

La intensidad máxima admisible es de 88 A, valor que no es superado por la intensidad calculada.

La caída de tensión real con el espesor seleccionado se calcula despejando de la ecuación anterior:

$$\Delta U = \frac{\sqrt{3} \cdot \sum I_k \cdot d_k \cdot \cos \varphi_k}{c \cdot S} = \frac{\sqrt{3} \cdot 15.67 \cdot 200 \cdot 0.80}{56 \cdot 10} = 7.75 \text{ V}$$

## ◆ C3:

Este cuadro de distribución suministra electricidad a la iluminación y a las tomas de corriente del almacén de materias primas (agua). Las potencias e intensidades de las cargas son las siguientes:

Tabla 53. Cargas que derivan de C3.

C3				
Carga	Potencia mayorada, kW	Factor de potencia	Tensión nominal, V	Intensidad, A
Iluminación interior	5.04	1,00	230	$21,91 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$
Tomas de corriente	---	1,00	230	$24,00 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$

Sumando los valores de todas las intensidades se obtiene:

$$I_{C3} = 45.91 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}, A$$

El valor del módulo de la intensidad que circula por la derivación CDG-C3 es de 45.91 A, con un factor de potencia de 1.00. Al ser todas las cargas que parten de este cuadro de distribución monofásicas, por esta derivación circulará electricidad monofásica, por lo que esta derivación se hará con un cable bipolar de cobre, enterrado y con aislamiento de polietileno reticulado.

La máxima caída de tensión será del 2 % de la alimentación:

$$\Delta U = 230 \cdot 0.02 = 4.6 V$$

La longitud de la línea eléctrica que une el CDG y el C3 es de 216 m.

Con estos datos ya se puede aplicar la ecuación para el cálculo de la sección de la línea, que en este caso será la correspondiente a la de corriente monofásica:

$$S = \frac{2 \cdot 45.91 \cdot 216 \cdot 1.00}{56 \cdot 4.6} = 76.99 \text{ mm}^2$$

Se selecciona el cable con un espesor inmediatamente superior, en este caso 95 mm<sup>2</sup>.

La intensidad máxima admisible es de 310 A, valor que no es superado por la intensidad calculada.

La caída de tensión real con el espesor seleccionado se calcula despejando de la ecuación anterior:

$$\Delta U = \frac{2 \cdot \sum I_k \cdot d_k \cdot \cos \varphi_k}{c \cdot S} = \frac{2 \cdot 45.91 \cdot 216 \cdot 1.00}{56 \cdot 95} = 3.73 V$$

## ◆ C4:

De este cuadro de distribución parten todas las derivaciones hacia las bombas del almacén de materias primas (ftalato de dibutilo). Las cargas y sus características son las siguientes:

Tabla 54. Cargas que derivan de C4.

C4				
Carga	Potencia mayorada, kW	Factor de potencia	Tensión nominal, V	Intensidad, A
B-AMP-45-CE	2,63	0,80	400	$3,79 \cdot \vec{i} + 2,84 \cdot \vec{j}$
B-AMP-46-CE	0,29	0,80	400	$0,41 \cdot \vec{i} + 0,31 \cdot \vec{j}$

Sumando los valores de todas las intensidades se obtiene:

$$I_{C4} = 4.20 \cdot \vec{i} + 3.15 \cdot \vec{j}, A$$

El valor del módulo de la intensidad que circula por la derivación CDG-C4 es de 5.25 A, con un factor de potencia de 0.80. Al consumirse corriente trifásica en esta zona de la instalación esta derivación se hará con un cable tetrapolar de cobre, enterrado y con aislamiento de polietileno reticulado.

La máxima caída de tensión será del 2 % de la alimentación:

$$\Delta U = 400 \cdot 0.02 = 8 \text{ V}$$

La longitud de la línea eléctrica que une el CDG y el C4 es de 155.5 m.

Con estos datos ya se puede aplicar la ecuación para el cálculo de la sección de la línea, que en este caso será la correspondiente a la de corriente trifásica:

$$S = \frac{\sqrt{3} \cdot 5.25 \cdot 155.5 \cdot 0.80}{56 \cdot 8} = 2.53 \text{ mm}^2$$

Se selecciona el cable con un espesor inmediatamente superior, en este caso 6 mm<sup>2</sup>.

La intensidad máxima admisible es de 66 A, valor que no es superado por la intensidad calculada.

La caída de tensión real con el espesor seleccionado se calcula despejando de la ecuación anterior:

$$\Delta U = \frac{\sqrt{3} \cdot \sum I_k \cdot d_k \cdot \cos \varphi_k}{c \cdot S} = \frac{\sqrt{3} \cdot 5.25 \cdot 155.5 \cdot 0.80}{56 \cdot 6} = 3.37 \text{ V}$$

## ◆ C5:

De este cuadro de distribución parten todas las derivaciones hacia los equipos, las bombas y las tomas de fuerza de la sección de producción. A continuación se muestran las intensidades y potencias consumidas por cada carga:

Tabla 55. Cargas que derivan de C5.

C5				
Carga	Potencia mayorada, kW	Factor de potencia	Tensión nominal, V	Intensidad, A
Compresor de aire	125,00	0,80	400	$180,42 \cdot \vec{i} + 135,32 \cdot \vec{j}$
Agitador del reactor	61,25	0,80	400	$88,41 \cdot \vec{i} + 66,31 \cdot \vec{j}$
B-PR-8-SO	125,00	0,80	400	$180,42 \cdot \vec{i} + 135,32 \cdot \vec{j}$
B-PR-28-DP	1,88	0,80	400	$2,71 \cdot \vec{i} + 2,03 \cdot \vec{j}$
B-PR-29-DP	1,88	0,80	400	$2,71 \cdot \vec{i} + 2,03 \cdot \vec{j}$
B-PR-30-DP	1,88	0,80	400	$2,71 \cdot \vec{i} + 2,03 \cdot \vec{j}$
B-PR-39-CE	3,50	0,80	400	$5,05 \cdot \vec{i} + 3,79 \cdot \vec{j}$
B-PR-40-CE	7,50	0,80	400	$10,83 \cdot \vec{i} + 8,12 \cdot \vec{j}$
Tomas de corriente	---	1,00	400	$32,00 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$

Sumando los valores de todas las intensidades se obtiene:

$$I_{C5} = 505,25 \cdot \vec{i} + 354,94 \cdot \vec{j}, A$$

El valor del módulo de la intensidad que circula por la derivación CDG-C5 es de 617.46 A, con un factor de potencia de 0.82. Al consumirse corriente trifásica en esta zona de la instalación esta derivación se hará con un cable tetrapolar de cobre, enterrado y con aislamiento de polietileno reticulado.

La máxima caída de tensión será del 2 % de la alimentación:

$$\Delta U = 400 \cdot 0.02 = 8 V$$

La longitud de la línea eléctrica que une el CDG y el C5 es de 126 m.

Con estos datos ya se puede aplicar la ecuación para el cálculo de la sección de la línea, que en este caso será la correspondiente a la de corriente trifásica:

$$S = \frac{\sqrt{3} \cdot 617.46 \cdot 126 \cdot 0.82}{56 \cdot 8} = 246.65 \text{ mm}^2$$

Se selecciona el cable con un espesor inmediatamente superior, en este caso 300 mm<sup>2</sup>.

La intensidad máxima admisible es de 590 A. La intensidad calculada es superior a este valor, por lo que se debe seleccionar un cable con una sección superior. El siguiente tamaño normalizado es de 400 mm<sup>2</sup>, que admite 665 A y es válido para esta derivación.

La caída de tensión real con el espesor seleccionado se calcula despejando de la ecuación anterior:

$$\Delta U = \frac{\sqrt{3} \cdot \sum I_k \cdot d_k \cdot \cos \varphi_k}{c \cdot S} = \frac{\sqrt{3} \cdot 617.46 \cdot 126 \cdot 0.82}{56 \cdot 400} = 4.93 \text{ V}$$

◆ **C6:**

Este cuadro de distribución suministra electricidad a la iluminación de la sección de producción. Las potencias e intensidades de las cargas son las siguientes:

*Tabla 56. Cargas que derivan de C6.*

<b>C6</b>				
<b>Carga</b>	<b>Potencia mayorada, kW</b>	<b>Factor de potencia</b>	<b>Tensión nominal, V</b>	<b>Intensidad, A</b>
Iluminación interior	49,68	1,00	230	$216,00 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$

Sumando los valores de todas las intensidades se obtiene:

$$I_{C6} = 216,00 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}, \text{ A}$$

El valor del módulo de la intensidad que circula por la derivación CDG-C6 es de 216,00 A, con un factor de potencia de 1.00. Al ser todas las cargas que parten de este cuadro de distribución monofásicas, por esta derivación circulará electricidad monofásica, por lo que esta derivación se hará con un cable bipolar de cobre, enterrado y con aislamiento de polietileno reticulado.

La máxima caída de tensión será del 2 % de la alimentación:

$$\Delta U = 230 \cdot 0.02 = 4.6 \text{ V}$$

La longitud de la línea eléctrica que une el CDG y el C6 es de 112.5 m.

Con estos datos ya se puede aplicar la ecuación para el cálculo de la sección de la línea, que en este caso será la correspondiente a la de corriente monofásica:

$$S = \frac{2 \cdot 216.00 \cdot 112.5 \cdot 1.00}{56 \cdot 4.6} = 188.66 \text{ mm}^2$$



Se selecciona el cable con un espesor inmediatamente superior, en este caso 240 mm<sup>2</sup>.

La intensidad máxima admisible es de 520 A, valor que no es superado por la intensidad calculada.

La caída de tensión real con el espesor seleccionado se calcula despejando de la ecuación anterior:

$$\Delta U = \frac{2 \cdot \sum I_k \cdot d_k \cdot \cos \varphi_k}{c \cdot S} = \frac{2 \cdot 216.00 \cdot 112.5 \cdot 1.00}{56 \cdot 240} = 3.62 \text{ V}$$

◆ **C7:**

De este cuadro de distribución parten todas las derivaciones hacia las bombas y las tomas de fuerza de la sección de separación. A continuación se muestran las intensidades y potencias consumidas por cada carga:

Tabla 57. Cargas que derivan de C7.

<b>C7</b>				
Carga	Potencia mayorada, kW	Factor de potencia	Tensión nominal, V	Intensidad, A
B-SE-10-SO	125,00	0,80	400	$180,42 \cdot \vec{i} + 135,32 \cdot \vec{j}$
B-SE-12-CE	0,56	0,80	400	$0,81 \cdot \vec{i} + 0,61 \cdot \vec{j}$
B-SE-17-CE	3,56	0,80	400	$5,14 \cdot \vec{i} + 3,86 \cdot \vec{j}$
Tomas de corriente	---	1,00	400	$32,00 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$

Sumando los valores de todas las intensidades se obtiene:

$$I_{C7} = 218.38 \cdot \vec{i} + 139.78 \cdot \vec{j}, \text{ A}$$

El valor del módulo de la intensidad que circula por la derivación CDG-C7 es de 259.28 A, con un factor de potencia de 0.84. Al consumirse corriente trifásica en esta zona de la instalación esta derivación se hará con un cable tetrapolar de cobre, enterrado y con aislamiento de polietileno reticulado.

La máxima caída de tensión será del 2 % de la alimentación:

$$\Delta U = 400 \cdot 0.02 = 8 \text{ V}$$

La longitud de la línea eléctrica que une el CDG y el C7 es de 78 m.

Con estos datos ya se puede aplicar la ecuación para el cálculo de la sección de la línea, que en este caso será la correspondiente a la de corriente trifásica:

$$S = \frac{\sqrt{3} \cdot 259.28 \cdot 78 \cdot 0.84}{56 \cdot 8} = 65.68 \text{ mm}^2$$

Se selecciona el cable con un espesor inmediatamente superior, en este caso 70 mm<sup>2</sup>.

La intensidad máxima admisible es de 260 A, valor que no es superado por la intensidad calculada.

La caída de tensión real con el espesor seleccionado se calcula despejando de la ecuación anterior:

$$\Delta U = \frac{\sqrt{3} \cdot \sum I_k \cdot d_k \cdot \cos \varphi_k}{c \cdot S} = \frac{\sqrt{3} \cdot 259.28 \cdot 78 \cdot 0.84}{56 \cdot 70} = 7.51 \text{ V}$$

◆ **C8:**

Este cuadro de distribución suministra electricidad a la iluminación de la sección de separación. Las potencias e intensidades de las cargas son las siguientes:

Tabla 58. Cargas que derivan de C8.

<b>C8</b>				
Carga	Potencia mayorada, kW	Factor de potencia	Tensión nominal, V	Intensidad, A
Iluminación interior	42,12	1,00	230	$183,13 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$

Sumando los valores de todas las intensidades se obtiene:

$$I_{C8} = 183.13 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}, \text{ A}$$

El valor del módulo de la intensidad que circula por la derivación CDG-C8 es de 183.13 A, con un factor de potencia de 1.00. Al ser todas las cargas que parten de este cuadro de distribución monofásicas, por esta derivación circulará electricidad monofásica, por lo que esta derivación se hará con un cable bipolar de cobre, enterrado y con aislamiento de polietileno reticulado.

La máxima caída de tensión será del 2 % de la alimentación:

$$\Delta U = 230 \cdot 0.02 = 4.6 \text{ V}$$

La longitud de la línea eléctrica que une el CDG y el C8 es de 121 m.

Con estos datos ya se puede aplicar la ecuación para el cálculo de la sección de la línea, que en este caso será la correspondiente a la de corriente monofásica:

$$S = \frac{2 \cdot 183.13 \cdot 121 \cdot 1.00}{56 \cdot 4.6} = 172.04 \text{ mm}^2$$

Se selecciona el cable con un espesor inmediatamente superior, en este caso 185 mm<sup>2</sup>.

La intensidad máxima admisible es de 450 A, valor que no es superado por la intensidad calculada.

La caída de tensión real con el espesor seleccionado se calcula despejando de la ecuación anterior:

$$\Delta U = \frac{2 \cdot \sum I_k \cdot d_k \cdot \cos \varphi_k}{c \cdot S} = \frac{2 \cdot 183.13 \cdot 121 \cdot 1.00}{56 \cdot 185} = 4.28 \text{ V}$$

◆ **C9:**

De este cuadro de distribución parten todas las derivaciones hacia las tomas de fuerza de la sección de purificación. A continuación se muestran las intensidades y potencias consumidas por cada carga:

Tabla 59. Cargas que derivan de C9.

<b>C9</b>				
Carga	Potencia mayorada, kW	Factor de potencia	Tensión nominal, V	Intensidad, A
Tomas de corriente	---	1,00	400	$32,00 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$

Sumando los valores de todas las intensidades se obtiene:

$$I_{C9} = 32.00 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}, \text{ A}$$

El valor del módulo de la intensidad que circula por la derivación CDG-C9 es de 32.00 A, con un factor de potencia de 1.00. Al consumirse corriente trifásica en esta zona de la instalación esta derivación se hará con un cable tetrapolar de cobre, enterrado y con aislamiento de polietileno reticulado.

La máxima caída de tensión será del 2 % de la alimentación:

$$\Delta U = 400 \cdot 0.02 = 8 \text{ V}$$

La longitud de la línea eléctrica que une el CDG y el C9 es de 64 m.

Con estos datos ya se puede aplicar la ecuación para el cálculo de la sección de la línea, que en este caso será la correspondiente a la de corriente trifásica:

$$S = \frac{\sqrt{3} \cdot 32.00 \cdot 64 \cdot 1.00}{56 \cdot 8} = 7.92 \text{ mm}^2$$

Se selecciona el cable con un espesor inmediatamente superior, en este caso 10 mm<sup>2</sup>.

La intensidad máxima admisible es de 88 A, valor que no es superado por la intensidad calculada.

La caída de tensión real con el espesor seleccionado se calcula despejando de la ecuación anterior:

$$\Delta U = \frac{\sqrt{3} \cdot \sum I_k \cdot d_k \cdot \cos \varphi_k}{c \cdot S} = \frac{\sqrt{3} \cdot 32.00 \cdot 64 \cdot 1.00}{56 \cdot 10} = 6.33 \text{ V}$$

◆ **C10:**

Este cuadro de distribución suministra electricidad a la iluminación de la sección de purificación. Las potencias e intensidades de las cargas son las siguientes:

Tabla 60. Cargas que derivan de C10.

<b>C10</b>				
Carga	Potencia mayorada, kW	Factor de potencia	Tensión nominal, V	Intensidad, A
Iluminación interior	41,04	1,00	230	$178,43 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$

Sumando los valores de todas las intensidades se obtiene:

$$I_{C10} = 178.43 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}, \text{ A}$$

El valor del módulo de la intensidad que circula por la derivación CDG-C10 es de 178.43 A, con un factor de potencia de 1.00. Al ser todas las cargas que parten de este cuadro de distribución monofásicas, por esta derivación circulará electricidad monofásica, por lo que esta derivación se hará con un cable bipolar de cobre, enterrado y con aislamiento de polietileno reticulado.

La máxima caída de tensión será del 2 % de la alimentación:

$$\Delta U = 230 \cdot 0.02 = 4.6 \text{ V}$$

La longitud de la línea eléctrica que une el CDG y el C10 es de 56.5 m.

Con estos datos ya se puede aplicar la ecuación para el cálculo de la sección de la línea, que en este caso será la correspondiente a la de corriente monofásica:

$$S = \frac{2 \cdot 178.43 \cdot 56.5 \cdot 1.00}{56 \cdot 4.6} = 78.27 \text{ mm}^2$$

Se selecciona el cable con un espesor inmediatamente superior, en este caso 95 mm<sup>2</sup>.

La intensidad máxima admisible es de 310 A, valor que no es superado por la intensidad calculada.

La caída de tensión real con el espesor seleccionado se calcula despejando de la ecuación anterior:

$$\Delta U = \frac{2 \cdot \sum I_k \cdot d_k \cdot \cos \varphi_k}{c \cdot S} = \frac{2 \cdot 178.43 \cdot 56.5 \cdot 1.00}{56 \cdot 95} = 3.79 \text{ V}$$

## ♦ C11:

De este cuadro de distribución parten todas las derivaciones hacia las bombas del almacén de producto terminado (anhídrido maleico). Las cargas y sus características son las siguientes:

Tabla 61. Cargas que derivan de C11.

C11				
Carga	Potencia mayorada, kW	Factor de potencia	Tensión nominal, V	Intensidad, A
B-APT-51-CE	13,44	0,80	400	$19,40 \cdot \vec{i} + 14,55 \cdot \vec{j}$

Sumando los valores de todas las intensidades se obtiene:

$$I_{C11} = 19,40 \cdot \vec{i} + 14,55 \cdot \vec{j}, A$$

El valor del módulo de la intensidad que circula por la derivación CDG-C11 es de 24.24 A, con un factor de potencia de 0.80. Al consumirse corriente trifásica en esta zona de la instalación esta derivación se hará con un cable tetrapolar de cobre, enterrado y con aislamiento de polietileno reticulado.

La máxima caída de tensión será del 2 % de la alimentación:

$$\Delta U = 400 \cdot 0.02 = 8 \text{ V}$$

La longitud de la línea eléctrica que une el CDG y el C11 es de 84.5 m.

Con estos datos ya se puede aplicar la ecuación para el cálculo de la sección de la línea, que en este caso será la correspondiente a la de corriente trifásica:

$$S = \frac{\sqrt{3} \cdot 24,24 \cdot 84,5 \cdot 0,80}{56 \cdot 8} = 6,34 \text{ mm}^2$$

Se selecciona el cable con un espesor inmediatamente superior, en este caso 10 mm<sup>2</sup>.

La intensidad máxima admisible es de 88 A, valor que no es superado por la intensidad calculada.

La caída de tensión real con el espesor seleccionado se calcula despejando de la ecuación anterior:

$$\Delta U = \frac{\sqrt{3} \cdot \sum I_k \cdot d_k \cdot \cos \varphi_k}{c \cdot S} = \frac{\sqrt{3} \cdot 24,24 \cdot 84,5 \cdot 0,80}{56 \cdot 10} = 5,07 \text{ V}$$

## ♦ C12:

De este cuadro de distribución parten todas las derivaciones hacia las bombas del almacén de residuos. Las cargas y sus características son las siguientes:

Tabla 62. Cargas que derivan de C12.

C12				
Carga	Potencia mayorada, kW	Factor de potencia	Tensión nominal, V	Intensidad, A
B-APT-50-CE	3,88	0,80	400	$5,59 \cdot \vec{i} + 4,19 \cdot \vec{j}$
B-APT-23-CE	2,56	0,80	400	$3,70 \cdot \vec{i} + 2,77 \cdot \vec{j}$

Sumando los valores de todas las intensidades se obtiene:

$$I_{C12} = 9,29 \cdot \vec{i} + 6,97 \cdot \vec{j}, A$$

El valor del módulo de la intensidad que circula por la derivación CDG-C12 es de 11.61 A, con un factor de potencia de 0.80. Al consumirse corriente trifásica en esta zona de la instalación esta derivación se hará con un cable tetrapolar de cobre, enterrado y con aislamiento de polietileno reticulado.

La máxima caída de tensión será del 2 % de la alimentación:

$$\Delta U = 400 \cdot 0.02 = 8 V$$

La longitud de la línea eléctrica que une el CDG y el C12 es de 40 m.

Con estos datos ya se puede aplicar la ecuación para el cálculo de la sección de la línea, que en este caso será la correspondiente a la de corriente trifásica:

$$S = \frac{\sqrt{3} \cdot 11.61 \cdot 40 \cdot 0.80}{56 \cdot 8} = 1.44 \text{ mm}^2$$

Se selecciona el cable con un espesor inmediatamente superior, en este caso 6 mm<sup>2</sup>.

La intensidad máxima admisible es de 66 A, valor que no es superado por la intensidad calculada.

La caída de tensión real con el espesor seleccionado se calcula despejando de la ecuación anterior:

$$\Delta U = \frac{\sqrt{3} \cdot \sum I_k \cdot d_k \cdot \cos \varphi_k}{c \cdot S} = \frac{\sqrt{3} \cdot 11.61 \cdot 40 \cdot 0.80}{56 \cdot 6} = 1.92 V$$

## ♦ C13:

Este cuadro de distribución suministra electricidad a la iluminación, tanto interior como exterior, y a las tomas de corriente del edificio de administración y personal. Las potencias e intensidades de las cargas son las siguientes:

Tabla 63. Cargas que derivan de C13.

C13				
Carga	Potencia mayorada, kW	Factor de potencia	Tensión nominal, V	Intensidad, A
Iluminación interior	13,89	1,00	230	$60,37 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$
Iluminación exterior	0,81	1,00	230	$3,52 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$
Tomas de corriente	---	1,00	230	$264,00 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$

Sumando los valores de todas las intensidades se obtiene:

$$I_{C13} = 327.89 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}, A$$

El valor del módulo de la intensidad que circula por la derivación CDG-C13 es de 327.89 A, con un factor de potencia de 1.00. Al ser todas las cargas que parten de este cuadro de distribución monofásicas, por esta derivación circulará electricidad monofásica, por lo que esta derivación se hará con un cable bipolar de cobre, enterrado y con aislamiento de polietileno reticulado.

La máxima caída de tensión será del 2 % de la alimentación:

$$\Delta U = 230 \cdot 0.02 = 4.6 V$$

La longitud de la línea eléctrica que une el CDG y el C13 es de 65 m.

Con estos datos ya se puede aplicar la ecuación para el cálculo de la sección de la línea, que en este caso será la correspondiente a la de corriente monofásica:

$$S = \frac{2 \cdot 327.89 \cdot 65 \cdot 1.00}{56 \cdot 4.6} = 165.47 \text{ mm}^2$$

Se selecciona el cable con un espesor inmediatamente superior, en este caso 185 mm<sup>2</sup>.

La intensidad máxima admisible es de 450 A, valor que no es superado por la intensidad calculada.

La caída de tensión real con el espesor seleccionado se calcula despejando de la ecuación anterior:

$$\Delta U = \frac{2 \cdot \sum I_k \cdot d_k \cdot \cos \varphi_k}{c \cdot S} = \frac{2 \cdot 327.89 \cdot 65 \cdot 1.00}{56 \cdot 185} = 4.11 V$$

## ♦ C14:

Este cuadro de distribución suministra electricidad a la iluminación y a las tomas de corriente de los vestuarios y servicios sanitarios. Las potencias e intensidades de las cargas son las siguientes:

Tabla 64. Cargas que derivan de C14.

C14				
Carga	Potencia mayorada, kW	Factor de potencia	Tensión nominal, V	Intensidad, A
Iluminación interior	3,65	1,00	230	$15,89 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$
Tomas de corriente	---	1,00	230	$80,00 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$

Sumando los valores de todas las intensidades se obtiene:

$$I_{C14} = 95.89 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}, A$$

El valor del módulo de la intensidad que circula por la derivación CDG-C14 es de 95.89 A, con un factor de potencia de 1.00. Al ser todas las cargas que parten de este cuadro de distribución monofásicas, por esta derivación circulará electricidad monofásica, por lo que esta derivación se hará con un cable bipolar de cobre, enterrado y con aislamiento de polietileno reticulado.

La máxima caída de tensión será del 2 % de la alimentación:

$$\Delta U = 230 \cdot 0.02 = 4.6 V$$

La longitud de la línea eléctrica que une el CDG y el C14 es de 120 m.

Con estos datos ya se puede aplicar la ecuación para el cálculo de la sección de la línea, que en este caso será la correspondiente a la de corriente monofásica:

$$S = \frac{2 \cdot 95.89 \cdot 120 \cdot 1.00}{56 \cdot 4.6} = 89.34 \text{ mm}^2$$

Se selecciona el cable con un espesor inmediatamente superior, en este caso 95 mm<sup>2</sup>.

La intensidad máxima admisible es de 310 A, valor que no es superado por la intensidad calculada.

La caída de tensión real con el espesor seleccionado se calcula despejando de la ecuación anterior:

$$\Delta U = \frac{2 \cdot \sum I_k \cdot d_k \cdot \cos \varphi_k}{c \cdot S} = \frac{2 \cdot 95.89 \cdot 120 \cdot 1.00}{56 \cdot 95} = 4.33 V$$



## ♦ C15:

Este cuadro de distribución suministra electricidad a la iluminación y a las tomas de corriente del edificio de control. Las potencias e intensidades de las cargas son las siguientes:

Tabla 65. Cargas que derivan de C15.

C15				
Carga	Potencia mayorada, kW	Factor de potencia	Tensión nominal, V	Intensidad, A
Iluminación interior	8,16	1,00	230	$35,48 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$
Tomas de corriente	---	1,00	230	$96,00 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$

Sumando los valores de todas las intensidades se obtiene:

$$I_{C15} = 131,48 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}, A$$

El valor del módulo de la intensidad que circula por la derivación CDG-C15 es de 131.48 A, con un factor de potencia de 1.00. Al ser todas las cargas que parten de este cuadro de distribución monofásicas, por esta derivación circulará electricidad monofásica, por lo que esta derivación se hará con un cable bipolar de cobre, enterrado y con aislamiento de polietileno reticulado.

La máxima caída de tensión será del 2 % de la alimentación:

$$\Delta U = 230 \cdot 0.02 = 4.6 V$$

La longitud de la línea eléctrica que une el CDG y el C15 es de 88.5 m.

Con estos datos ya se puede aplicar la ecuación para el cálculo de la sección de la línea, que en este caso será la correspondiente a la de corriente monofásica:

$$S = \frac{2 \cdot 131,48 \cdot 88,5 \cdot 1,00}{56 \cdot 4,6} = 90,34 \text{ mm}^2$$

Se selecciona el cable con un espesor inmediatamente superior, en este caso 95 mm<sup>2</sup>.

La intensidad máxima admisible es de 310 A, valor que no es superado por la intensidad calculada.

La caída de tensión real con el espesor seleccionado se calcula despejando de la ecuación anterior:

$$\Delta U = \frac{2 \cdot \sum I_k \cdot d_k \cdot \cos \varphi_k}{c \cdot S} = \frac{2 \cdot 131,48 \cdot 88,5 \cdot 1,00}{56 \cdot 95} = 4,37 V$$

## ♦ C16:

Este cuadro de distribución suministra electricidad a la iluminación y a las tomas de corriente del edificio de mantenimiento y taller. Las potencias e intensidades de las cargas son las siguientes:

Tabla 66. Cargas que derivan de C16.

C16				
Carga	Potencia mayorada, kW	Factor de potencia	Tensión nominal, V	Intensidad, A
Iluminación interior	6,48	1,00	230	$28,17 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$
Tomas de corriente	---	1,00	230	$72,00 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$

Sumando los valores de todas las intensidades se obtiene:

$$I_{C16} = 100,17 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}, \text{ A}$$

El valor del módulo de la intensidad que circula por la derivación CDG-C16 es de 100.17 A, con un factor de potencia de 1.00. Al ser todas las cargas que parten de este cuadro de distribución monofásicas, por esta derivación circulará electricidad monofásica, por lo que esta derivación se hará con un cable bipolar de cobre, enterrado y con aislamiento de polietileno reticulado.

La máxima caída de tensión será del 2 % de la alimentación:

$$\Delta U = 230 \cdot 0.02 = 4.6 \text{ V}$$

La longitud de la línea eléctrica que une el CDG y el C16 es de 82 m.

Con estos datos ya se puede aplicar la ecuación para el cálculo de la sección de la línea, que en este caso será la correspondiente a la de corriente monofásica:

$$S = \frac{2 \cdot 100,17 \cdot 82 \cdot 1,00}{56 \cdot 4,6} = 63,77 \text{ mm}^2$$

Se selecciona el cable con un espesor inmediatamente superior, en este caso 70 mm<sup>2</sup>.

La intensidad máxima admisible es de 260 A, valor que no es superado por la intensidad calculada.

La caída de tensión real con el espesor seleccionado se calcula despejando de la ecuación anterior:

$$\Delta U = \frac{2 \cdot \sum I_k \cdot d_k \cdot \cos \varphi_k}{c \cdot S} = \frac{2 \cdot 100,17 \cdot 82 \cdot 1,00}{56 \cdot 70} = 4,19 \text{ V}$$

## ♦ C17:

Este cuadro de distribución suministra electricidad a la iluminación y a las tomas de corriente del edificio de distribución eléctrica. Las potencias e intensidades de las cargas son las siguientes:

Tabla 67. Cargas que derivan de C17.

C17				
Carga	Potencia mayorada, kW	Factor de potencia	Tensión nominal, V	Intensidad, A
Iluminación interior	0.63	1,00	230	$2,72 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$
Tomas de corriente	---	1,00	230	$8,00 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$

Sumando los valores de todas las intensidades se obtiene:

$$I_{C17} = 10.72 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}, A$$

El valor del módulo de la intensidad que circula por la derivación CDG-C17 es de 10.72 A, con un factor de potencia de 1.00. Al ser todas las cargas que parten de este cuadro de distribución monofásicas, por esta derivación circulará electricidad monofásica, por lo que esta derivación se hará con un cable bipolar de cobre, enterrado y con aislamiento de polietileno reticulado.

La máxima caída de tensión será del 2 % de la alimentación:

$$\Delta U = 230 \cdot 0.02 = 4.6 V$$

La longitud de la línea eléctrica que une el CDG y el C17 es de 2 m.

Con estos datos ya se puede aplicar la ecuación para el cálculo de la sección de la línea, que en este caso será la correspondiente a la de corriente monofásica:

$$S = \frac{2 \cdot 10.72 \cdot 2 \cdot 1.00}{56 \cdot 4.6} = 0.17 \text{ mm}^2$$

Se selecciona el cable con un espesor inmediatamente superior, en este caso 6 mm<sup>2</sup>.

La intensidad máxima admisible es de 66 A, valor que no es superado por la intensidad calculada.

La caída de tensión real con el espesor seleccionado se calcula despejando de la ecuación anterior:

$$\Delta U = \frac{2 \cdot \sum I_k \cdot d_k \cdot \cos \varphi_k}{c \cdot S} = \frac{2 \cdot 10.72 \cdot 2 \cdot 1.00}{56 \cdot 6} = 0.16 V$$

## ♦ C18:

Este cuadro de distribución suministra electricidad a la iluminación y a las tomas de corriente de la sala de calderas. Las potencias e intensidades de las cargas son las siguientes:

Tabla 68. Cargas que derivan de C18.

C18				
Carga	Potencia mayorada, kW	Factor de potencia	Tensión nominal, V	Intensidad, A
Iluminación interior	0.73	1,00	230	$3,18 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$
Tomas de corriente	---	1,00	230	$8,00 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$

Sumando los valores de todas las intensidades se obtiene:

$$I_{C18} = 11.18 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}, A$$

El valor del módulo de la intensidad que circula por la derivación CDG-C18 es de 11.18 A, con un factor de potencia de 1.00. Al ser todas las cargas que parten de este cuadro de distribución monofásicas, por esta derivación circulará electricidad monofásica, por lo que esta derivación se hará con un cable bipolar de cobre, enterrado y con aislamiento de polietileno reticulado.

La máxima caída de tensión será del 2 % de la alimentación:

$$\Delta U = 230 \cdot 0.02 = 4.6 V$$

La longitud de la línea eléctrica que une el CDG y el C18 es de 192.5 m.

Con estos datos ya se puede aplicar la ecuación para el cálculo de la sección de la línea, que en este caso será la correspondiente a la de corriente monofásica:

$$S = \frac{2 \cdot 11.18 \cdot 192.5 \cdot 1.00}{56 \cdot 4.6} = 16.7 \text{ mm}^2$$

Se selecciona el cable con un espesor inmediatamente superior, en este caso 25 mm<sup>2</sup>.

La intensidad máxima admisible es de 150 A, valor que no es superado por la intensidad calculada.

La caída de tensión real con el espesor seleccionado se calcula despejando de la ecuación anterior:

$$\Delta U = \frac{2 \cdot \sum I_k \cdot d_k \cdot \cos \varphi_k}{c \cdot S} = \frac{2 \cdot 11.18 \cdot 192.5 \cdot 1.00}{56 \cdot 25} = 3.07 V$$

## ♦ C19:

Este cuadro de distribución suministra electricidad a la iluminación exterior del almacén de materias primas (*n*-butano), del almacén de producto terminado (anhídrido maleico), del edificio de proceso, del acceso a la fábrica, de los aparcamientos y de las zonas de circulación de la planta. Las potencias e intensidades de las cargas son las siguientes:

Tabla 69. Cargas que derivan de C19.

<b>C19</b>				
Carga	Potencia mayorada, kW	Factor de potencia	Tensión nominal, V	Intensidad, A
Iluminación exterior	20,16	1,00	230	$87,65 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$

Sumando los valores de todas las intensidades se obtiene:

$$I_{C19} = 87.65 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}, A$$

El valor del módulo de la intensidad que circula por la derivación CDG-C19 es de 87.65 A, con un factor de potencia de 1.00. Al ser todas las cargas que parten de este cuadro de distribución monofásicas, por esta derivación circulará electricidad monofásica, por lo que esta derivación se hará con un cable bipolar de cobre, enterrado y con aislamiento de polietileno reticulado.

La máxima caída de tensión será del 2 % de la alimentación:

$$\Delta U = 230 \cdot 0.02 = 4.6 V$$

La longitud de la línea eléctrica que une el CDG y el C19 es de 121 m.

Con estos datos ya se puede aplicar la ecuación para el cálculo de la sección de la línea, que en este caso será la correspondiente a la de corriente monofásica:

$$S = \frac{2 \cdot 87.65 \cdot 121 \cdot 1.00}{56 \cdot 4.6} = 82.34 \text{ mm}^2$$

Se selecciona el cable con un espesor inmediatamente superior, en este caso 95 mm<sup>2</sup>.

La intensidad máxima admisible es de 310 A, valor que no es superado por la intensidad calculada.

La caída de tensión real con el espesor seleccionado se calcula despejando de la ecuación anterior:

$$\Delta U = \frac{2 \cdot \sum I_k \cdot d_k \cdot \cos \phi_k}{c \cdot S} = \frac{2 \cdot 87.65 \cdot 121 \cdot 1.00}{56 \cdot 95} = 3.99 V$$

**1.6.1.2. Derivaciones individuales**

Se va a dimensionar a continuación la sección necesaria para cada derivación individual.

Para esta parte de la instalación se emplearán cables de cobre multiconductores (bipolares o tetrapolares, en función de que el suministro sea en trifásica o en monofásica) aislados en tubos en montaje superficial con aislamiento de polietileno reticulado. Las secciones para cables de estas características se muestran en la tabla 70:

*Tabla 70. Intensidades admisibles (A) al aire 40 °C. Número de conductores con carga y naturaleza del aislamiento. ITC-BT-19*

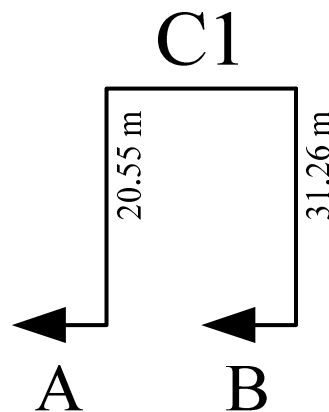
<b>A</b>		Conductores aislados en tubos empotrados en paredes aislantes		3x PVC	2x PVC		3x XLPE o EPR	2x XLPE o EPR					
<b>A2</b>		Cables multiconductores en tubos empotrados en paredes aislantes.	3x PVC	2x PVC		3x XLPE o EPR	2x XLPE o EPR						
<b>B</b>		Conductores aislados en tubos en montaje superficial o empotrados en obra.				3x PVC	2x PVC		3x XLPE o EPR	2x XLPE o EPR			
<b>B2</b>		Cables multiconductores en tubos en montaje superficial y empotrados en obra.		3x PVC	2x PVC		3x XLPE o EPR	2x XLPE o EPR					
<b>C</b>		Cables multiconductores directamente sobre la pared					3x PVC	2x PVC	3x XLPE o EPR	2x XLPE o EPR			
<b>E</b>		Cables multiconductores al aire libre. Distancia a la pared no inferior a 0,3D					3x PVC	2x PVC	3x XLPE o EPR	2x XLPE o EPR			
<b>F</b>		Cables unipolares en contacto mutuo. Distancia a la pared no inferior a D.					3x PVC				3x XLPE o EPR		
<b>G</b>		Cables unipolares separados mínimo D.								3x PVC		3x XLPE o EPR	
		<b>mm<sup>2</sup></b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>
<b>Cobre</b>		1,5	11	11,5	13	13,5	15	16	-	18	21	24	-
		2,5	15	16	17,5	18,5	21	22	-	25	29	33	-
		4	20	21	23	24	27	30	-	34	38	45	-
		6	25	27	30	32	36	37	-	44	49	57	-
		10	34	37	40	44	50	52	-	60	68	76	-
		16	45	49	54	59	66	70	-	80	91	105	-
		25	59	64	70	77	84	88	96	106	116	123	166
		35		77	86	96	104	110	119	131	144	154	205
		50		94	103	117	125	133	145	159	175	188	250
		70				149	160	171	188	202	224	244	321
		95				180	194	207	230	245	271	296	391
		120				208	225	240	267	284	314	348	455
		150				236	260	278	310	338	363	404	525
	185				268	297	317	354	386	415	464	601	
	240				315	350	374	419	455	490	552	711	
	300				360	404	423	484	524	565	640	821	

Se va a seguir el mismo procedimiento de cálculo para todas las derivaciones individuales. Para completar la información referente a ellas se deberá consultar el plano de electricidad y el esquema unifilar, que se adjuntan en el libro de planos.

◆ **Derivaciones que parten desde C1:**

El esquema unifilar que parte desde este cuadro de distribución se muestra en la figura 17:

Figura 17. Diagrama unifilar de las derivaciones que parten desde C1.



Todas estas líneas son cables tetrapolares por los que circula corriente trifásica. La caída de tensión en la derivación desde el cuadro de distribución general hasta el cuadro de distribución C1 es de 5.56 V. Teniendo en cuenta que la caída de tensión máxima permitida por el reglamento para los equipos es del 6.5 % de la tensión nominal, la máxima caída de tensión para todas las derivaciones secundarias es de:

- 20.44 V para líneas trifásicas
- 9.39 V para líneas monofásicas

Los datos considerados para el cálculo de las secciones y los resultados para este grupo de derivaciones individuales aparecen en la tabla 71:

Tabla 71. Derivaciones que parten desde C1.

Tramo	Cargas	Potencia, kW	Factor de potencia	Módulo de la intensidad, A	Distancia a C1, m	Intensidad total, A	Sección calculada, mm <sup>2</sup>	Sección escogida, mm <sup>2</sup>	$\Delta U$ en el tramo, V	$\Delta U$ total, V
C1-A	B-AMP-1-CE	<b>21.88</b>	0.80	39.47	20.55	$31.57 \cdot \vec{i} + 23.68 \cdot \vec{j}$	0.98	10	2.01	7.57
C1-B	B-AMP-2-CE	<b>0.94</b>	0.80	1.69	31.26	$1.35 \cdot \vec{i} + 1.01 \cdot \vec{j}$	0.06	1.5	0.87	6.43

NOTA:

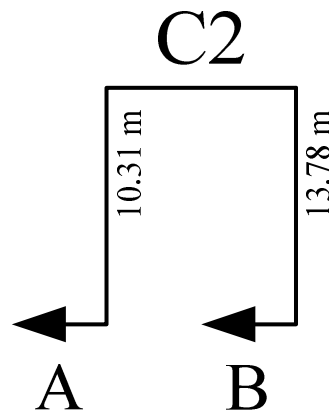
- Las potencias en negrita han sido mayoradas un 25 %.



◆ **Derivaciones que parten desde C2:**

El esquema unifilar que parte desde este cuadro de distribución se muestra en la figura 18:

Figura 18. Diagrama unifilar de las derivaciones que parten desde C2.



La caída de tensión en la derivación desde el cuadro de distribución general hasta el cuadro de distribución C2 es de 7.75 V. Teniendo en cuenta que la caída de tensión máxima permitida por el reglamento para los equipos es del 6.5 % de la tensión nominal, la máxima caída de tensión para todas las derivaciones secundarias es de:

- 18.25 V para líneas trifásicas
- 7.20 V para líneas monofásicas

Los datos considerados para el cálculo de las secciones y los resultados para este grupo de derivaciones individuales aparecen en la tabla 72:

Tabla 72. Derivaciones que parten desde C2.

Tramo	Cargas	Potencia, kW	Factor de potencia	Módulo de la intensidad, A	Distancia a C2, m	Intensidad total, A	Sección calculada, mm <sup>2</sup>	Sección escogida, mm <sup>2</sup>	$\Delta U$ en el tramo, V	$\Delta U$ total, V
C2-A	B-AMP-35-CE	<b>6.31</b>	0.80	11.39	10.31	$9.11 \cdot \vec{i} + 6.83 \cdot \vec{j}$	0.16	1.5	1.94	9.69
C2-B	B-AMP-36-CE	<b>2.38</b>	0.80	4.29	13.78	$3.43 \cdot \vec{i} + 2.57 \cdot \vec{j}$	0.08	1.5	0.97	8.72

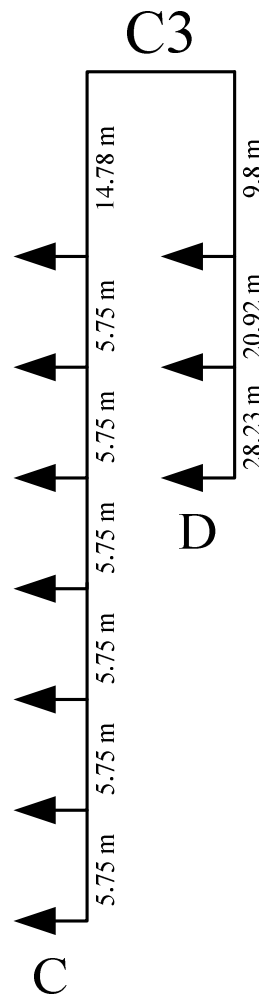
NOTA:

- Las potencias en negrita han sido mayoradas un 25 %.

◆ **Derivaciones que parten desde C3:**

El esquema unifilar que parte desde este cuadro de distribución se muestra en la figura 19:

Figura 19. Diagrama unifilar de las derivaciones que parten desde C3.



La caída de tensión en la derivación desde el cuadro de distribución general hasta el cuadro de distribución C3 es de 3.73 V. Teniendo en cuenta que la caída de tensión máxima permitida por el reglamento para el alumbrado es del 4.5 % de la tensión nominal y para las tomas de corriente es del 6.5 %, la máxima caída de tensión para todas las derivaciones secundarias es de:

- 6.62 V para las líneas de iluminación
- 11.22 V para las líneas de tomas de corriente

Los datos considerados para el cálculo de las secciones y los resultados para este grupo de derivaciones individuales aparecen en la tabla 73:

Tabla 73. Derivaciones que parten desde C3.

Tramo	Cargas	Potencia, kW	Factor de potencia	Módulo de la intensidad, A	Distancia a C3, m	Intensidad total, A	Sección calculada, mm <sup>2</sup>	Sección escogida, mm <sup>2</sup>	$\Delta U$ en el tramo, V	$\Delta U$ total, V
C3-C	7 lámparas de sodio, 400 W	<b>5.04</b>	1.00	21.91	49.28	$21.91 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$	5.83	6	6.43	10.16
C3-D	3 tomas de corriente	---	1.00	24.00	58.95	$24.00 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$	4.50	6	8.42	12.15

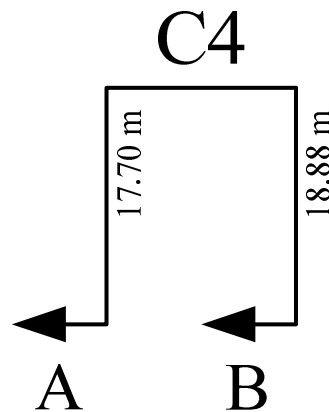
NOTA:

- La potencia en negrita ha sido mayorada un 80 %, ya que corresponde a iluminación.
- Se dimensiona el tramo de iluminación interior con mayor caída de tensión, todos los demás tendrán la misma sección.

◆ **Derivaciones que parten desde C4:**

El esquema unifilar que parte desde este cuadro de distribución se muestra en la figura 20:

Figura 20. Diagrama unifilar de las derivaciones que parten desde C4.



La caída de tensión en la derivación desde el cuadro de distribución general hasta el cuadro de distribución C4 es de 3.37 V. Teniendo en cuenta que la caída de tensión máxima permitida por el reglamento para los equipos es del 6.5 % de la tensión nominal, la máxima caída de tensión para todas las derivaciones secundarias es de:

- 22.63 V para líneas trifásicas
- 11.58 V para líneas monofásicas

Los datos considerados para el cálculo de las secciones y los resultados para este grupo de derivaciones individuales aparecen en la tabla 74:

Tabla 74. Derivaciones que parten desde C4.

Tramo	Cargas	Potencia, kW	Factor de potencia	Módulo de la intensidad, A	Distancia a C4, m	Intensidad total, A	Sección calculada, mm <sup>2</sup>	Sección escogida, mm <sup>2</sup>	$\Delta U$ en el tramo, V	$\Delta U$ total, V
C4-A	B-AMP-45-CE	<b>2.63</b>	0.80	4.74	17.70	$3.79 \cdot \vec{i} + 2.84 \cdot \vec{j}$	0.09	1.5	1.38	4.75
C4-B	B-AMP-46-CE	<b>0.29</b>	0.80	0.52	18.88	$0.41 \cdot \vec{i} + 0.31 \cdot \vec{j}$	0.01	1.5	0.16	3.53

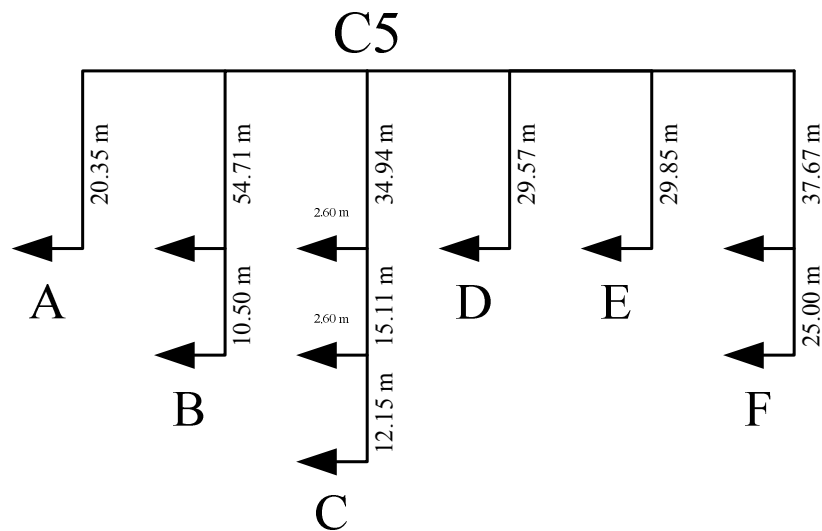
NOTA:

- Las potencias en negrita han sido mayoradas un 25 %.

◆ **Derivaciones que parten desde C5:**

El esquema unifilar que parte desde este cuadro de distribución se muestra en la figura 21:

Figura 21. Diagrama unifilar de las derivaciones que parten desde C5.



La caída de tensión en la derivación desde el cuadro de distribución general hasta el cuadro de distribución C5 es de 4.93 V. Teniendo en cuenta que la caída de tensión máxima permitida por el reglamento para los equipos es del 6.5 % de la tensión nominal, la máxima caída de tensión para todas las derivaciones secundarias es de:

- 21.07 V para líneas trifásicas
- 10.02 V para líneas monofásicas

Los datos considerados para el cálculo de las secciones y los resultados para este grupo de derivaciones individuales aparecen en la tabla 75:

Tabla 75. Derivaciones que parten desde C5.

Tramo	Cargas	Potencia, kW	Factor de potencia	Módulo de la intensidad, A	Distancia a C5, m	Intensidad total, A	Sección calculada, mm <sup>2</sup>	Sección escogida, mm <sup>2</sup>	$\Delta U$ en el tramo, V	$\Delta U$ total, V
C5-A	Compresor de aire	<b>125.00</b>	0.80	225.53	20.35	$180.42 \cdot \vec{i} + 135.32 \cdot \vec{j}$	5.39	150	0.76	5.69
C5-B	B-PR-40-CE	<b>7.50</b>	0.80	13.53	54.71	$14.87 \cdot \vec{i} + 11.15 \cdot \vec{j}$	1.26	2.5	10.59	15.52
	B-PR-39-CE	2.80	0.80	5.05	65.21					
C5-C	B-PR-28-DP	1.50	0.80	2.71	37.54	$7.04 \cdot \vec{i} + 5.28 \cdot \vec{j}$	0.53	1.5	7.50	12.43
	B-PR-29-DP	1.50	0.80	2.71	52.65					
	B-PR-30-DP	<b>1.88</b>	0.80	3.38	62.20					
C5-D	Agitador del reactor	<b>61.25</b>	0.80	110.51	29.57	$88.41 \cdot \vec{i} + 66.31 \cdot \vec{j}$	3.84	50	1.62	6.55
C5-E	B-PR-8-SO	<b>125.00</b>	0.80	225.53	29.85	$180.42 \cdot \vec{i} + 135.32 \cdot \vec{j}$	7.91	150	1.11	6.04
C5-F	2 tomas de corriente	---	1.00	32.00	62.67	$32.00 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$	2.94	6	10.34	15.27

NOTA:

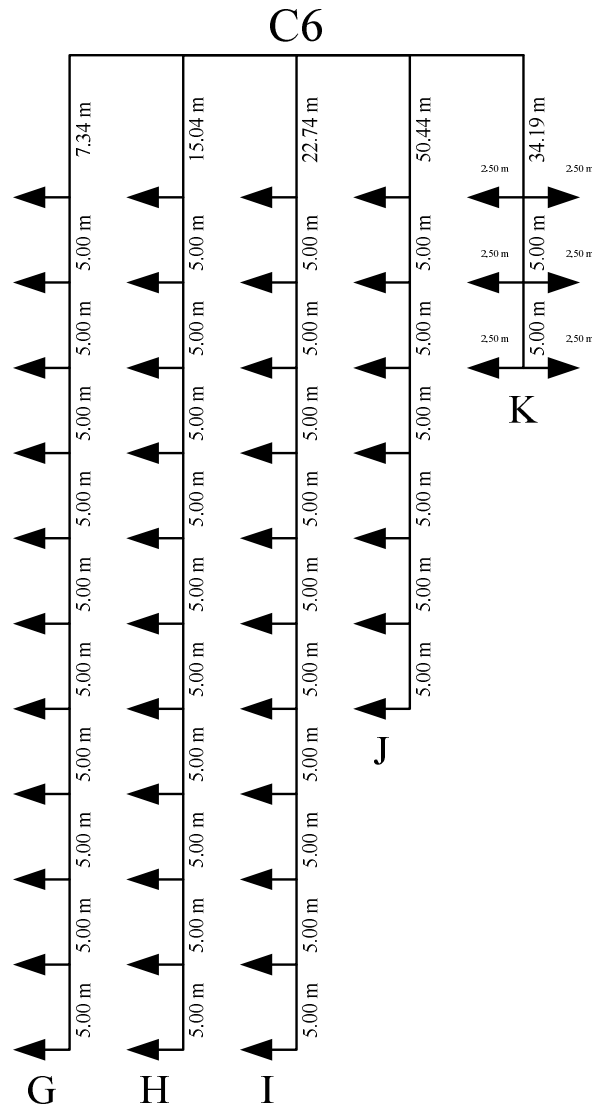
- Las potencias en negrita han sido mayoradas un 25 %.



♦ Derivaciones que parten desde C6:

El esquema unifilar que parte desde este cuadro de distribución se muestra en la figura 22:

Figura 22. Diagrama unifilar de las derivaciones que parten desde C6.



La caída de tensión en la derivación desde el cuadro de distribución general hasta el cuadro de distribución C6 es de 3.62 V. Teniendo en cuenta que la caída de tensión máxima permitida por el reglamento para el alumbrado es del 4.5 % de la tensión nominal, la máxima caída de tensión para todas las derivaciones secundarias que parten desde C6 es de 6.73 V.

Los datos considerados para el cálculo de las secciones y los resultados para este grupo de derivaciones individuales aparecen en la tabla 76:

Tabla 76. Derivaciones que parten desde C6.

Tramo	Cargas	Potencia, kW	Factor de potencia	Módulo de la intensidad, A	Distancia a C6, m	Intensidad total, A	Sección calculada, mm <sup>2</sup>	Sección escogida, mm <sup>2</sup>	$\Delta U$ en el tramo, V	$\Delta U$ total, V
C6-G	11 lámparas de sodio, 600 W	<b>11.88</b>	1.00	51.65	57.34	$51.65 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$	15.72	25	4.23	7.85
C6-H	11 lámparas de sodio, 600 W	<b>11.88</b>	1.00	51.65	65.04	$51.65 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$	17.83	25	4.80	8.42
C6-I	11 lámparas de sodio, 600 W	<b>11.88</b>	1.00	51.65	72.74	$51.65 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$	19.94	25	5.37	8.99
C6-J	7 lámparas de sodio, 600 W	<b>7.56</b>	1.00	32.87	80.44	$32.87 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$	14.03	25	3.78	7.40
C6-K	2 lámparas de sodio, 600 W	<b>2.16</b>	1.00	9.39	36.69	$28.17 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$	6.23	25	1.68	5.30
	2 lámparas de sodio, 600 W	<b>2.16</b>	1.00	9.39	41.69					
	2 lámparas de sodio, 600 W	<b>2.16</b>	1.00	9.39	46.69					

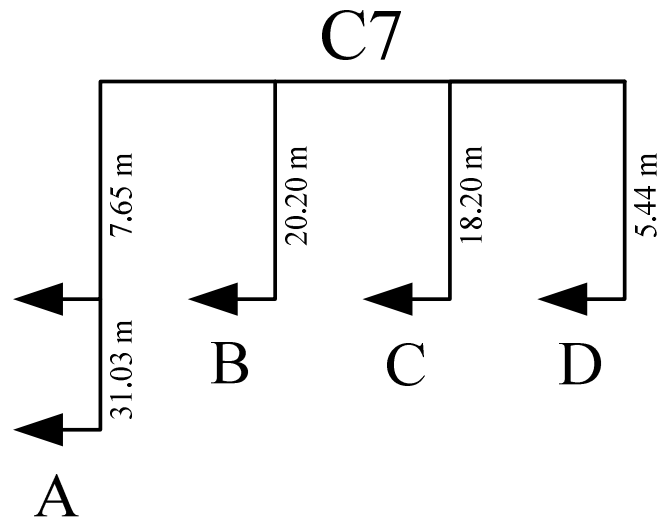
NOTA:

- Las potencias en negrita han sido mayoradas un 80 %, ya que corresponde a iluminación.
- Se dimensiona el tramo de iluminación interior con mayor caída de tensión, en este caso el tramo C6-I. Todos los demás tendrán la misma sección, 25 mm<sup>2</sup>.

◆ **Derivaciones que parten desde C7:**

El esquema unifilar que parte desde este cuadro de distribución se muestra en la figura 23:

Figura 23. Diagrama unifilar de las derivaciones que parten desde C7.



La caída de tensión en la derivación desde el cuadro de distribución general hasta el cuadro de distribución C7 es de 7.51 V. Teniendo en cuenta que la caída de tensión máxima permitida por el reglamento para los equipos es del 6.5 % de la tensión nominal, la máxima caída de tensión para todas las derivaciones secundarias es de:

- 18.49 V para líneas trifásicas
- 7.44 V para líneas monofásicas

Los datos considerados para el cálculo de las secciones y los resultados para este grupo de derivaciones individuales aparecen en la tabla 77:

Tabla 77. Derivaciones que parten desde C7.

Tramo	Cargas	Potencia, kW	Factor de potencia	Módulo de la intensidad, A	Distancia a C7, m	Intensidad total, A	Sección calculada, mm <sup>2</sup>	Sección escogida, mm <sup>2</sup>	$\Delta U$ en el tramo, V	$\Delta U$ total, V
C7-A	2 tomas de corriente	---	1.00	32.00	38.68	$32.00 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$	2.07	6	6.38	13.89
C7-B	B-SE-10-SO	<b>125.00</b>	0.80	225.53	20.20	$180.42 \cdot \vec{i} + 135.32 \cdot \vec{j}$	6.10	150	0.75	8.26
C7-C	B-SE-17-CE	<b>3.56</b>	0.80	6.43	18.20	$5.14 \cdot \vec{i} + 3.86 \cdot \vec{j}$	0.16	1.5	1.93	9.44
C7-D	B-SE-12-CE	<b>0.56</b>	0.80	1.01	5.44	$0.81 \cdot \vec{i} + 0.61 \cdot \vec{j}$	0.01	1.5	0.09	7.60

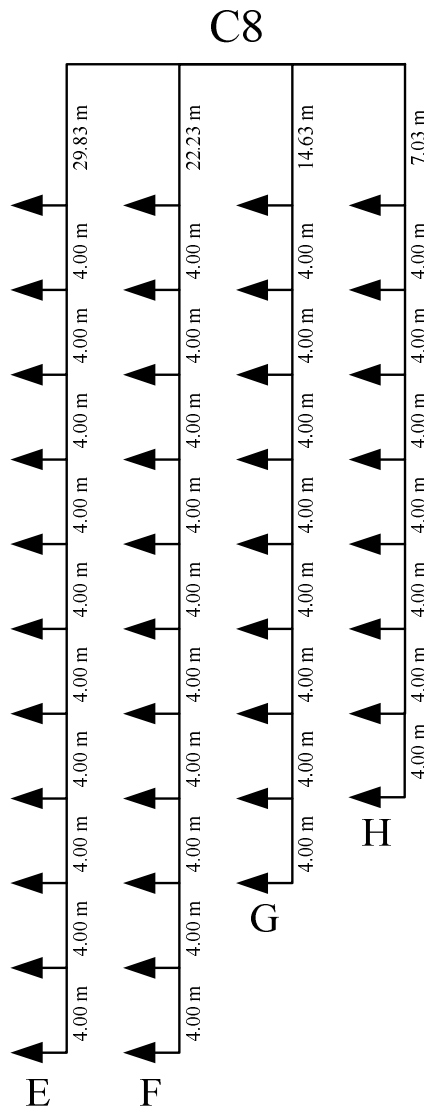
NOTA:

- Las potencias en negrita han sido mayoradas un 25 %.

◆ **Derivaciones que parten desde C8:**

El esquema unifilar que parte desde este cuadro de distribución se muestra en la figura 24:

Figura 24. Diagrama unifilar de las derivaciones que parten desde C8.



La caída de tensión en la derivación desde el cuadro de distribución general hasta el cuadro de distribución C8 es de 4.28 V. Teniendo en cuenta que la caída de tensión máxima permitida por el reglamento para el alumbrado es del 4.5 % de la tensión nominal, la máxima caída de tensión para todas las derivaciones secundarias que parten desde C8 es de 6.07 V.

Los datos considerados para el cálculo de las secciones y los resultados para este grupo de derivaciones individuales aparecen en la tabla 78:

Tabla 78. Derivaciones que parten desde C8.

Tramo	Cargas	Potencia, kW	Factor de potencia	Módulo de la intensidad, A	Distancia a C8, m	Intensidad total, A	Sección calculada, mm <sup>2</sup>	Sección escogida, mm <sup>2</sup>	$\Delta U$ en el tramo, V	$\Delta U$ total, V
C8-E	11 lámparas de sodio, 600 W	<b>11.88</b>	1.00	51.65	69.83	$51.65 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$	21.22	25	5.15	9.43
C8-F	11 lámparas de sodio, 600 W	<b>11.88</b>	1.00	51.65	62.23	$51.65 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$	18.91	25	4.59	8.87
C8-G	9 lámparas de sodio, 600 W	<b>9.72</b>	1.00	42.26	46.63	$42.26 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$	11.59	25	2.82	7.10
C8-H	8 lámparas de sodio, 600 W	<b>8.64</b>	1.00	37.57	35.03	$37.57 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$	7.74	25	1.88	6.16

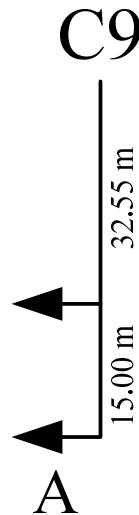
NOTA:

- Las potencias en negrita han sido mayoradas un 80 %, ya que corresponde a iluminación.
- Se dimensiona el tramo de iluminación interior con mayor caída de tensión, en este caso el tramo C8-E. Todos los demás tendrán la misma sección, 25 mm<sup>2</sup>.

◆ **Derivaciones que parten desde C9:**

El esquema unifilar que parte desde este cuadro de distribución se muestra en la figura 25:

Figura 25. Diagrama unifilar de las derivaciones que parten desde C9.



La caída de tensión en la derivación desde el cuadro de distribución general hasta el cuadro de distribución C9 es de 6.33 V. Teniendo en cuenta que la caída de tensión máxima permitida por el reglamento para los equipos es del 6.5 % de la tensión nominal, la máxima caída de tensión para todas las derivaciones secundarias es de:

- 19.67 V para líneas trifásicas
- 8.62 V para líneas monofásicas

Los datos considerados para el cálculo de las secciones y los resultados para este grupo de derivaciones individuales aparecen en la tabla 79:

Tabla 79. Derivaciones que parten desde C9.

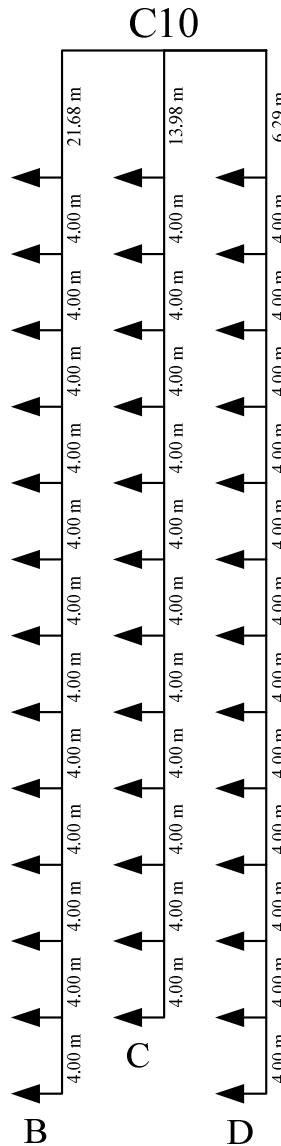
Tramo	Cargas	Potencia, kW	Factor de potencia	Módulo de la intensidad, A	Distancia a C9, m	Intensidad total, A	Sección calculada, mm <sup>2</sup>	Sección escogida, mm <sup>2</sup>	ΔU en el tramo, V	ΔU total, V
C9-A	2 tomas de corriente	---	1.00	32.00	47.55	$32.00 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$	2.39	6	7.84	14.17



◆ Derivaciones que parten desde C10:

El esquema unifilar que parte desde este cuadro de distribución se muestra en la figura 26:

Figura 26. Diagrama unifilar de las derivaciones que parten desde C10.



La caída de tensión en la derivación desde el cuadro de distribución general hasta el cuadro de distribución C10 es de 3.79 V. Teniendo en cuenta que la caída de tensión máxima permitida por el reglamento para el alumbrado es del 4.5 % de la tensión nominal, la máxima caída de tensión para todas las derivaciones secundarias que parten desde C10 es de 6.56 V.

Los datos considerados para el cálculo de las secciones y los resultados para este grupo de derivaciones individuales aparecen en la tabla 80:

Tabla 80. Derivaciones que parten desde C10.

Tramo	Cargas	Potencia, kW	Factor de potencia	Módulo de la intensidad, A	Distancia a C10, m	Intensidad total, A	Sección calculada, mm <sup>2</sup>	Sección escogida, mm <sup>2</sup>	$\Delta U$ en el tramo, V	$\Delta U$ total, V
C10-B	13 lámparas de sodio, 600 W	<b>14.04</b>	1.00	61.04	69.68	$61.04 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$	23.16	25	6.08	9.87
C10-C	12 lámparas de sodio, 600 W	<b>12.96</b>	1.00	56.35	57.98	$56.35 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$	17.79	25	4.67	8.46
C10-D	13 lámparas de sodio, 600 W	<b>14.04</b>	1.00	61.04	54.29	$61.04 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$	18.04	25	4.73	8.52

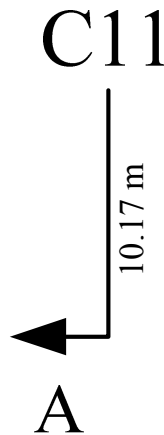
NOTA:

- Las potencias en negrita han sido mayoradas un 80 %, ya que corresponde a iluminación.
- Se dimensiona el tramo de iluminación interior con mayor caída de tensión, en este caso el tramo C10-B. Todos los demás tendrán la misma sección, 25 mm<sup>2</sup>.

◆ **Derivaciones que parten desde C11:**

El esquema unifilar que parte desde este cuadro de distribución se muestra en la figura 27:

Figura 27. Diagrama unifilar de las derivaciones que parten desde C11.



La caída de tensión en la derivación desde el cuadro de distribución general hasta el cuadro de distribución C11 es de 5.07 V. Teniendo en cuenta que la caída de tensión máxima permitida por el reglamento para los equipos es del 6.5 % de la tensión nominal, la máxima caída de tensión para todas las derivaciones secundarias es de:

- 20.93 V para líneas trifásicas
- 9.88 V para líneas monofásicas

Los datos considerados para el cálculo de las secciones y los resultados para este grupo de derivaciones individuales aparecen en la tabla 81:

Tabla 81. Derivaciones que parten desde C11.

Tramo	Cargas	Potencia, kW	Factor de potencia	Módulo de la intensidad, A	Distancia a C11, m	Intensidad total, A	Sección calculada, mm <sup>2</sup>	Sección escogida, mm <sup>2</sup>	$\Delta U$ en el tramo, V	$\Delta U$ total, V
C11-A	B-APT-51-CE	<b>13.44</b>	0.80	24.24	10.17	$19.40 \cdot \vec{i} + 14.55 \cdot \vec{j}$	0.29	4	1.53	6.60

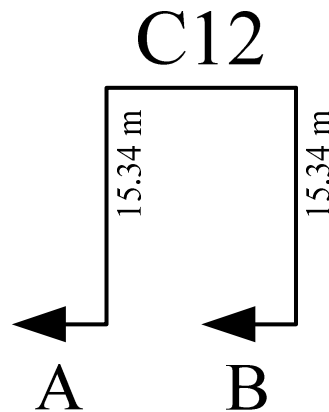
NOTA:

- La potencia en negrita ha sido mayorada un 25 %.

◆ **Derivaciones que parten desde C12:**

El esquema unifilar que parte desde este cuadro de distribución se muestra en la figura 28:

Figura 28. Diagrama unifilar de las derivaciones que parten desde C12.



La caída de tensión en la derivación desde el cuadro de distribución general hasta el cuadro de distribución C12 es de 1.92 V. Teniendo en cuenta que la caída de tensión máxima permitida por el reglamento para los equipos es del 6.5 % de la tensión nominal, la máxima caída de tensión para todas las derivaciones secundarias es de:

- 24.08 V para líneas trifásicas
- 13.03 V para líneas monofásicas

Los datos considerados para el cálculo de las secciones y los resultados para este grupo de derivaciones individuales aparecen en la tabla 82:

Tabla 82. Derivaciones que parten desde C12.

Tramo	Cargas	Potencia, kW	Factor de potencia	Módulo de la intensidad, A	Distancia a C12, m	Intensidad total, A	Sección calculada, mm <sup>2</sup>	Sección escogida, mm <sup>2</sup>	$\Delta U$ en el tramo, V	$\Delta U$ total, V
C12-A	B-APT-50-CE	<b>3.88</b>	0.80	6.99	15.34	$5.59 \cdot \vec{i} + 4.19 \cdot \vec{j}$	0.11	1.5	1.77	3.69
C12-B	B-APT-23-CE	<b>2.56</b>	0.80	4.62	15.34	$3.70 \cdot \vec{i} + 2.77 \cdot \vec{j}$	0.07	1.5	1.17	3.09

NOTA:

- Las potencias en negrita han sido mayoradas un 25 %.

◆ **Derivaciones que parten desde C13:**

La caída de tensión en la derivación desde el cuadro de distribución general hasta el cuadro de distribución C13 es de 4.11 V. Teniendo en cuenta que la caída de tensión máxima permitida por el reglamento para el alumbrado es del 4.5 % de la tensión nominal y para las tomas de corriente es del 6.5 %, la máxima caída de tensión para todas las derivaciones secundarias es de:

- 6.24 V para las líneas de iluminación
- 10.84 V para las líneas de tomas de corriente

Los datos considerados para el cálculo de las secciones y los resultados para este grupo de derivaciones individuales aparecen en la tabla 83:

Tabla 83. Derivaciones que parten desde C13.

Tramo	Cargas	Potencia, kW	Factor de potencia	Módulo de la intensidad, A	Distancia a C13, m	Intensidad total, A	Sección calculada, mm <sup>2</sup>	Sección escogida, mm <sup>2</sup>	$\Delta U$ en el tramo, V	$\Delta U$ total, V
C13-A	7 alumbrados y 2 enchufes	4.41	1.00	19.18	2.10	$19.18 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$	0.96	2.5	0.58	4.69
A-B	7 tubos fluoresc. 58 W	0.73	1.00	3.18	3.89	$3.18 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$	0.08	1.5	0.29	4.98
A-C	2 tomas de corriente	---	1.00	16.00	7.18	$16.00 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$	0.40	2.5	1.64	6.33
C13-D	11 alumbrados y 4 enchufes	8.51	1.00	36.99	4.87	$36.99 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$	4.29	10	0.64	4.75
D-E	11 tubos fluoresc. 58 W	1.15	1.00	4.99	8.85	$4.99 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$	0.28	1.5	1.05	5.81
D-F	3 tomas de corriente	---	1.00	24.00	13.74	$24.00 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$	1.16	4	2.94	7.70
C13-G	38 alumbrados y 7 enchufes	16.85	1.00	73.25	0.27	$73.25 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$	0.47	25	0.03	4.14
G-H	38 tubos fluoresc. 58 W	3.97	1.00	17.25	18.92	$17.25 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$	1.88	2.5	4.66	8.80
G-I	5 tomas de corriente	---	1.00	40.00	20.58	$40.00 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$	2.72	10	2.94	7.08



C13-J	26 alumbrados y 3 enchufes	8.23	1.00	35.80	3.98	$35.80 \cdot \bar{i} + 0 \cdot \bar{j}$	3.39	6	0.85	4.96
J-K	14 tubos fluoresc. 58 W	1.46	1.00	6.35	11.94	$6.35 \cdot \bar{i} + 0 \cdot \bar{j}$	0.50	1.5	1.81	8.88
J-L	3 tomas de corriente	---	1.00	24.00	18.92	$24.00 \cdot \bar{i} + 0 \cdot \bar{j}$	1.62	4	4.05	8.16
C13-M	14 alumbrados y 2 enchufes	5.14	1.00	22.35	5.15	$22.35 \cdot \bar{i} + 0 \cdot \bar{j}$	2.74	4	1.03	5.14
M-N	7 alumbrados y 1 enchufe	2.57	1.00	11.18	8.83	$11.18 \cdot \bar{i} + 0 \cdot \bar{j}$	2.35	2.5	1.41	6.55
N-O	7 tubos fluoresc. 58 W	0.73	1.00	3.18	3.73	$3.18 \cdot \bar{i} + 0 \cdot \bar{j}$	0.11	1.5	0.28	6.83
N-P	1 toma de corriente	---	1.00	8.00	4.74	$8.00 \cdot \bar{i} + 0 \cdot \bar{j}$	0.16	1.5	0.90	7.45
M-Q	7 alumbrados y 1 enchufe	2.57	1.00	11.18	11.83	$11.18 \cdot \bar{i} + 0 \cdot \bar{j}$	3.15	4	1.18	6.32
Q-R	7 tubos fluoresc. 58 W	0.73	1.00	3.18	3.73	$3.18 \cdot \bar{i} + 0 \cdot \bar{j}$	0.10	1.5	0.28	6.60
Q-S	1 toma de corriente	---	1.00	8.00	4.74	$8.00 \cdot \bar{i} + 0 \cdot \bar{j}$	0.16	1.5	0.90	7.22
C13-T	24 alumbrados y 4 enchufes	9.87	1.00	42.89	5.25	$42.89 \cdot \bar{i} + 0 \cdot \bar{j}$	5.36	10	0.80	4.91

T-U	12 alumbrados y 2 enchufes	4.93	1.00	21.45	3.00	$21.45 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$	1.53	4	0.57	5.49
T-V	12 tubos fluoresc. 58 W	1.25	1.00	5.45	13.43	$5.45 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$	0.48	1.5	1.74	6.66
T-W	2 tomas de corriente	---	1.00	16.00	13.05	$16.00 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$	0.74	2.5	2.98	7.90
U-X	12 tubos fluoresc. 58 W	1.25	1.00	5.45	13.43	$5.45 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$	0.54	1.5	1.74	7.23
U-Y	2 tomas de corriente	---	1.00	16.00	13.05	$16.00 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$	0.79	2.5	2.98	8.47
C13-Z	14 alumbrados y 10 enchufes	19.86	1.00	86.35	5.15	$86.35 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$	10.59	35	0.45	4.56
Z-a	7 alumbrados y 5 enchufes	9.93	1.00	43.18	3.00	$43.18 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$	3.08	10	0.46	5.03
Z-b	7 tubos fluoresc. 58 W	0.73	1.00	3.18	17.73	$3.18 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$	0.35	1.5	1.34	5.91
Z-c	5 tomas de corriente	---	1.00	40.00	19.41	$40.00 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$	2.67	10	2.77	7.34
a-d	7 tubos fluoresc. 58 W	0.73	1.00	3.18	17.73	$3.18 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$	0.38	1.5	1.34	6.37
a-e	5 tomas de corriente	---	1.00	40.00	19.41	$40.00 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$	2.79	10	2.77	7.80

---

C13-f	3 lámparas de sodio, 150 W	0.81	1.00	3.52	23.48	$3.52 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$	0.47	1.5	1.97	6.08
-------	----------------------------	------	------	------	-------	--	------	-----	------	------

---

NOTA:

- Las potencias han sido mayoradas un 80 %, ya que corresponden a iluminación.
- En todos los casos se ha dimensionado el tramo de iluminación interior y tomas de fuerza con mayor caída de tensión, considerando que el resto de líneas tendrán la misma sección.

◆ **Derivaciones que parten desde C14:**

La caída de tensión en la derivación desde el cuadro de distribución general hasta el cuadro de distribución C14 es de 4.33 V. Teniendo en cuenta que la caída de tensión máxima permitida por el reglamento para el alumbrado es del 4.5 % de la tensión nominal y para las tomas de corriente es del 6.5 %, la máxima caída de tensión para todas las derivaciones secundarias es de:

- 6.02 V para las líneas de iluminación
- 10.62 V para las líneas de tomas de corriente

Los datos considerados para el cálculo de las secciones y los resultados para este grupo de derivaciones individuales aparecen en la tabla 84:

Tabla 84. Derivaciones que parten desde C14.

Tramo	Cargas	Potencia, kW	Factor de potencia	Módulo de la intensidad, A	Distancia a C14, m	Intensidad total, A	Sección calculada, mm <sup>2</sup>	Sección escogida, mm <sup>2</sup>	$\Delta U$ en el tramo, V	$\Delta U$ total, V
C14-A	12 alumbrados y 8 enchufes	15.97	1.00	69.45	1.84	$69.45 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$	3.04	25	0.18	4.51
A-B	6 alumbrados y 4 enchufes	7.99	1.00	34.72	1.48	$34.72 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$	1.22	6	0.31	4.82
B-C	6 tubos fluoresc. 58 W	0.63	1.00	2.72	5.30	$2.72 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$	0.09	1.5	0.34	5.16
B-D	4 tomas de corriente	---	1.00	32.00	8.21	$32.00 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$	0.93	6	1.56	6.38
A-E	6 alumbrados y 4 enchufes	7.99	1.00	34.72	9.97	$34.72 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$	8.24	10	1.24	5.75
E-F	6 tubos fluoresc. 58 W	0.63	1.00	2.72	6.44	$2.72 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$	0.14	1.5	0.42	6.17
E-G	4 tomas de corriente	---	1.00	32.00	8.51	$32.00 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$	1.06	6	1.62	7.37
C14-H	20 alumbrados y 2 enchufes	5.77	1.00	25.08	7.42	$25.08 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$	4.43	6	1.11	5.44
H-I	20 tubos fluoresc. 58 W	2.09	1.00	9.08	7.87	$9.08 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$	0.52	1.5	1.70	7.14

H-J	2 tomas de corriente	---	1.00	16.00	13.14	$16.00 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$	0.79	2.5	3.00	8.44
C14-K	3 tubos fluoresc. 58 W	0.31	1.00	1.36	7.73	$1.36 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$	0.06	1.5	0.25	4.58

NOTA:

- Las potencias han sido mayoradas un 80 %, ya que corresponden a iluminación.
- En todos los casos se ha dimensionado el tramo de iluminación y tomas de fuerza con mayor caída de tensión, considerando que el resto de líneas tendrán la misma sección.

◆ **Derivaciones que parten desde C15:**

La caída de tensión en la derivación desde el cuadro de distribución general hasta el cuadro de distribución C15 es de 4.37 V. Teniendo en cuenta que la caída de tensión máxima permitida por el reglamento para el alumbrado es del 4.5 % de la tensión nominal y para las tomas de corriente es del 6.5 %, la máxima caída de tensión para todas las derivaciones secundarias es de:

- 5.98 V para las líneas de iluminación
- 10.58 V para las líneas de tomas de corriente

Los datos considerados para el cálculo de las secciones y los resultados para este grupo de derivaciones individuales aparecen en la tabla 85:

NOTA:

- Las potencias han sido mayoradas un 80 %, ya que corresponden a iluminación.
- En todos los casos se ha dimensionado el tramo de iluminación interior y tomas de fuerza con mayor caída de tensión, considerando que el resto de líneas tendrán la misma sección.

Tabla 85. Derivaciones que parten desde C15.

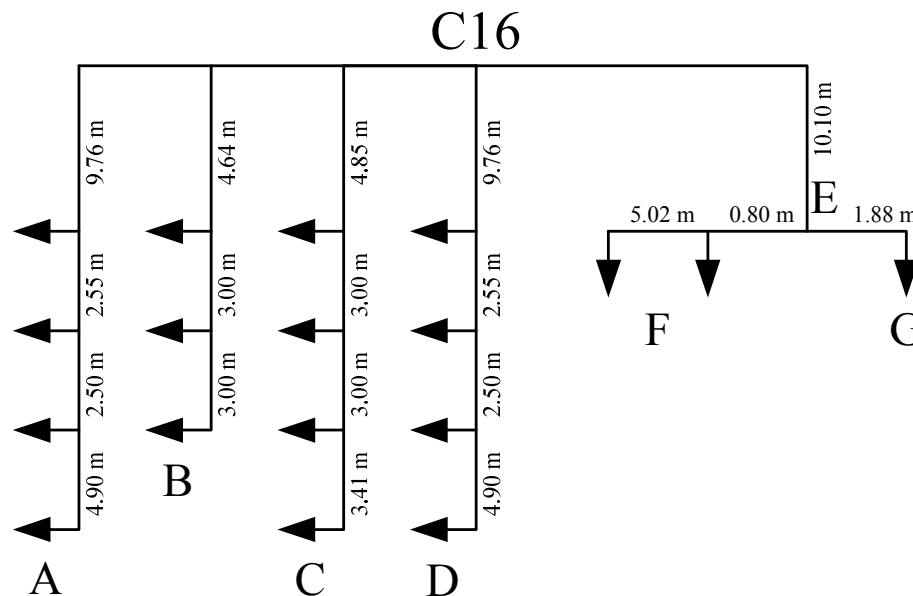
Tramo	Cargas	Potencia, kW	Factor de potencia	Módulo de la intensidad, A	Distancia a C15, m	Intensidad total, A	Sección calculada, mm <sup>2</sup>	Sección escogida, mm <sup>2</sup>	$\Delta U$ en el tramo, V	$\Delta U$ total, V
C15-A	12 alumbrados y 2 enchufes	4.93	1.00	21.45	0.48	$21.45 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$	0.25	4	0.09	4.46
A-B	12 tubos fluoresc. 58 W	1.25	1.00	5.45	5.08	$5.45 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$	0.17	1.5	0.66	5.12
A-C	2 tomas de corriente	---	1.00	16.00	5.04	$16.00 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$	0.27	2.5	1.15	5.61
C15-D	11 alumbrados y 2 enchufes	4.83	1.00	20.99	6.14	$20.99 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$	3.07	4	1.15	5.52
D-E	11 tubos fluoresc. 58 W	1.15	1.00	4.99	3.54	$4.99 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$	0.13	1.5	0.42	5.94
D-F	2 tomas de corriente	---	1.00	16.00	10.12	$16.00 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$	0.61	2.5	2.31	7.83
C15-G	8 alumbrados y 8 enchufes	20.48	1.00	89.04	5.45	$89.04 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$	11.55	35	0.50	4.87
G-H	8 lámparas de sodio, 400 W	5.76	1.00	25.04	11.73	$25.04 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$	1.91	4	2.62	7.49
G-I	8 tomas de corriente	---	1.00	64.00	11.50	$64.00 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$	2.61	16	1.64	6.51



♦ **Derivaciones que parten desde C16:**

El esquema unifilar que parte desde este cuadro de distribución se muestra en la figura 29:

Figura 29. Diagrama unifilar de las derivaciones que parten desde C16.



La caída de tensión en la derivación desde el cuadro de distribución general hasta el cuadro de distribución C16 es de 4.19 V. Teniendo en cuenta que la caída de tensión máxima permitida por el reglamento para el alumbrado es del 4.5 % de la tensión nominal y para las tomas de corriente es del 6.5 %, la máxima caída de tensión para todas las derivaciones secundarias es de:

- 6.16 V para las líneas de iluminación
- 10.76 V para las líneas de tomas de corriente

Los datos considerados para el cálculo de las secciones y los resultados para este grupo de derivaciones individuales aparecen en la tabla 86:

Tabla 86. Derivaciones que parten desde C16.

Tramo	Cargas	Potencia, kW	Factor de potencia	Módulo de la intensidad, A	Distancia a C16, m	Intensidad total, A	Sección calculada, mm <sup>2</sup>	Sección escogida, mm <sup>2</sup>	$\Delta U$ en el tramo, V	$\Delta U$ total, V
C16-A	4 tomas de corriente	---	1.00	32.00	19.71	$32.00 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$	2.09	6	3.75	7.94
C16-B	3 lámparas de sodio, 400 W	<b>2.16</b>	1.00	9.39	10.64	$9.39 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$	0.58	1.5	2.38	6.57
C16-C	4 lámparas de sodio, 400 W	<b>2.88</b>	1.00	12.52	14.26	$12.52 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$	1.04	1.5	4.25	8.44
C16-D	4 tomas de corriente	---	1.00	32.00	19.71	$32.00 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$	2.09	6	3.75	7.94
C16-E	2 alumbrados y 1 enchufe	<b>3.28</b>	1.00	14.26	10.10	$14.26 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$	1.71	2.5	2.06	6.25
E-F	2 lámparas de sodio, 400 W	<b>1.44</b>	1.00	6.26	5.82	$6.26 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$	0.32	1.5	0.87	7.12
E-G	1 toma de corriente	---	1.00	8.00	1.88	$8.00 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$	0.06	1.5	0.36	6.61

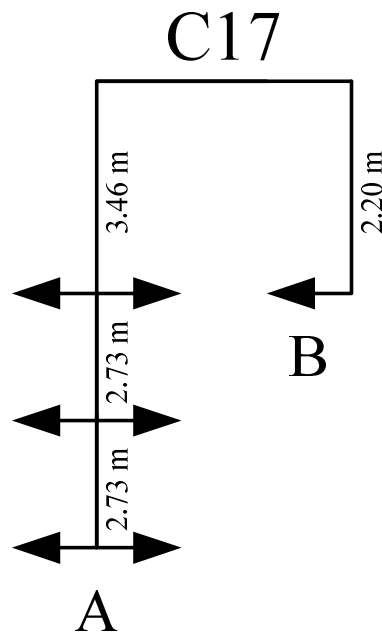
NOTA:

- Las potencias en negrita han sido mayoradas un 80 %, ya que corresponden a iluminación.
- En todos los casos se ha dimensionado el tramo de iluminación interior y tomas de fuerza con mayor caída de tensión, considerando que el resto de líneas tendrán la misma sección.

◆ Derivaciones que parten desde C17:

El esquema unifilar que parte desde este cuadro de distribución se muestra en la figura 30:

Figura 30. Diagrama unifilar de las derivaciones que parten desde C17.



La caída de tensión en la derivación desde el cuadro de distribución general hasta el cuadro de distribución C17 es de 0.16 V. Teniendo en cuenta que la caída de tensión máxima permitida por el reglamento para el alumbrado es del 4.5 % de la tensión nominal y para las tomas de corriente es del 6.5 %, la máxima caída de tensión para todas las derivaciones secundarias es de:

- 10.19 V para las líneas de iluminación
- 14.79 V para las líneas de tomas de corriente

Los datos considerados para el cálculo de las secciones y los resultados para este grupo de derivaciones individuales aparecen en la tabla 87:

Tabla 87. Derivaciones que parten desde C17.

Tramo	Cargas	Potencia, kW	Factor de potencia	Módulo de la intensidad, A	Distancia a C17, m	Intensidad total, A	Sección calculada, mm <sup>2</sup>	Sección escogida, mm <sup>2</sup>	$\Delta U$ en el tramo, V	$\Delta U$ total, V
C17-A	6 tubos fluoresc., 58 W	<b>0.63</b>	1.00	2.72	8.92	$2.72 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$	0.09	1.5	0.58	0.74
C17-B	1 toma de corriente	---	1.00	8.00	2.20	$8.00 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$	0.04	1.5	0.42	0.58

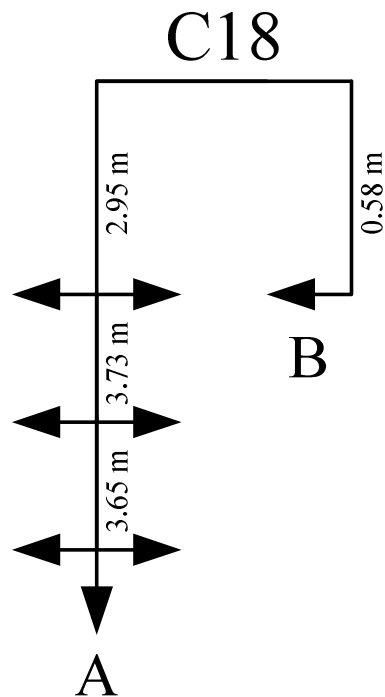
NOTA:

- La potencia en negrita ha sido mayorada un 80 %, ya que corresponde a iluminación.
- Se dimensiona el tramo de iluminación interior con mayor caída de tensión, todos los demás tendrán la misma sección.

◆ **Derivaciones que parten desde C18:**

El esquema unifilar que parte desde este cuadro de distribución se muestra en la figura 31:

Figura 31. Diagrama unifilar de las derivaciones que parten desde C18.



La caída de tensión en la derivación desde el cuadro de distribución general hasta el cuadro de distribución C18 es de 3.07 V. Teniendo en cuenta que la caída de tensión máxima permitida por el reglamento para el alumbrado es del 4.5 % de la tensión nominal y para las tomas de corriente es del 6.5 %, la máxima caída de tensión para todas las derivaciones secundarias es de:

- 7.28 V para las líneas de iluminación
- 11.88 V para las líneas de tomas de corriente

Los datos considerados para el cálculo de las secciones y los resultados para este grupo de derivaciones individuales aparecen en la tabla 88:

Tabla 88. Derivaciones que parten desde C18.

Tramo	Cargas	Potencia, kW	Factor de potencia	Módulo de la intensidad, A	Distancia a C18, m	Intensidad total, A	Sección calculada, mm <sup>2</sup>	Sección escogida, mm <sup>2</sup>	$\Delta U$ en el tramo, V	$\Delta U$ total, V
C18-A	7 tubos fluoresc., 58 W	<b>0.73</b>	1.00	3.18	10.33	$3.18 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$	0.16	1.5	0.78	3.85
C18-B	1 toma de corriente	---	1.00	8.00	0.58	$8.00 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$	0.01	1.5	0.11	3.18

NOTA:

- La potencia en negrita ha sido mayorada un 80 %, ya que corresponde a iluminación.
- Se dimensiona el tramo de iluminación interior con mayor caída de tensión, todos los demás tendrán la misma sección.

◆ **Derivaciones que parten desde C19:**

La caída de tensión en la derivación desde el cuadro de distribución general hasta el cuadro de distribución C19 es de 3.99 V. Teniendo en cuenta que la caída de tensión máxima permitida por el reglamento para el alumbrado es del 4.5 % de la tensión nominal, la máxima caída de tensión para todas las derivaciones secundarias que parten desde C19 es de 6.36 V.

Los datos considerados para el cálculo de las secciones y los resultados para este grupo de derivaciones individuales aparecen en la tabla 89:

NOTA:

- Las potencias en negrita han sido mayoradas un 80 %, ya que corresponden a iluminación.
- Se dimensiona el tramo de iluminación exterior con mayor caída de tensión, todos los demás tendrán la misma sección.

Tabla 89. Derivaciones que parten desde C19.

Tramo	Cargas	Potencia, kW	Factor de potencia	Módulo de la intensidad, A	Distancia a C19, m	Intensidad total, A	Sección calculada, mm <sup>2</sup>	Sección escogida, mm <sup>2</sup>	$\Delta U$ en el tramo, V	$\Delta U$ total, V
C19-A	2 lámparas de sodio, 150 W	<b>0.54</b>	1.00	2.35	119.49					
	2 lámparas de sodio, 150 W	<b>0.54</b>	1.00	2.35	132.24	$7.04 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$	5.23	6	5.54	9.53
	2 lámparas de sodio, 150 W	<b>0.54</b>	1.00	2.35	144.99					
C19-B	3 lámparas de sodio, 150 W	<b>0.81</b>	1.00	3.52	166.29	$3.52 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$	3.29	4	5.23	9.22
C19-C	12 lámparas de sodio, 150 W	<b>3.24</b>	1.00	14.09	322.28	$14.09 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$	25.49	35	4.63	8.62
C19-D	4 lámparas de sodio, 400 W	<b>2.88</b>	1.00	12.52	14.38	$12.52 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$	1.01	1.5	4.29	8.28
C19-E	5 lámparas de sodio, 150 W	<b>1.35</b>	1.00	5.87	193.13	$5.87 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$	6.37	10	4.05	8.04
C19-F	19 lámparas de sodio, 150 W	<b>5.13</b>	1.00	22.30	347.57	$22.30 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$	43.53	50	5.54	9.53
C19-G	19 lámparas de sodio, 150 W	<b>5.13</b>	1.00	22.30	332.25	$22.30 \cdot \vec{i} + 0 \cdot \vec{j}$	41.61	50	5.29	9.28



### 1.6.2. Instalación de puesta a tierra

Una vez que se han calculado las potencias y secciones empleadas, se debe calcular la longitud de las picas de puesta a tierra y la resistencia de puesta a tierra, comprobando que ésta no sea tan alta que se puedan dar tensiones de contacto superiores a las permitidas por el reglamento.

Para calcular la resistencia de puesta a tierra se utilizará la siguiente ecuación:

$$R = \frac{\Phi}{L}$$

donde:

- $R$  = resistencia de puesta a tierra,  $\Omega$ .
- $\Phi$  = resistividad del terreno,  $\Omega \cdot m$ .
- $L$  = longitud de la pica, m.

Para conocer la resistividad del terreno se va a usar la tabla 90:

Tabla 90. Valores de resistividad del terreno en función de su uso.

Naturaleza del terreno	Valor medio de la resistividad Ohm.m
Terrenos cultivables y fértiles, terraplenes compactos y húmedos	50
Terraplenes cultivables poco fértiles y otros terraplenes	500
Suelos pedregosos desnudos, arenas secas permeables	3.000

En este caso  $\Phi = 50 \Omega \cdot m$  ya que el terreno en el que se encontrará la instalación se usa para cultivos agrícolas. Si se usan picas de 1 metro de longitud la resistencia de puesta a tierra será:

$$R = \frac{\Phi}{L} = \frac{50}{1} = 50 \Omega$$

El reglamento indica que el valor de la resistencia de puesta a tierra no debe permitir que aparezcan tensiones de contacto superiores a 24 V en los locales, es decir:

$$V_C = I_S \cdot R < 24 V$$

donde:

- $V_C$  = tensión de contacto, V.
- $I_S$  = sensibilidad del interruptor diferencial, A. Es la intensidad a la que al superarse este valor se cerrará el circuito afectado. En este caso será de 300 mA.

Sabiendo que la resistencia de puesta a tierra es de 50  $\Omega$ :

$$V_C = I_S \cdot R = 0.3 \cdot 50 = 15 V < 24 V$$

Y, por lo tanto, se cumple el reglamento.