



APARTADO 11

Manual de cálculos

Tree diagram illustrating mathematical limits and formulas:

- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{3x+9}{5x+4} = 3$
- $\lim_{x \rightarrow a} x = a$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt{1+x^2} - \sqrt{1}}{x^2} = \frac{1}{2}$
- $\lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x+h) - f(x)}{h} = f'(x)$
- $\lim_{x \rightarrow a} f(x) = A$
- $\lim_{x \rightarrow a} x^2 = a^2$
- $\lim_{x \rightarrow \pi} \sin x = 0$
- $\lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x+h) \pm g(x+h) - f(x) - g(x)}{h} = f'(x) \pm g'(x)$
- $(4+3)^3 = 343$
- $4^3 + 3 \cdot 4^2 \cdot 3 + 3^3 = 64 + 27 + 27 = 118$
- $\lim_{x \rightarrow a} f(x) + \lim_{x \rightarrow a} g(x) = \lim_{x \rightarrow a} (f(x) + g(x))$
- $\lim_{x \rightarrow a} g(x) \neq 0$
- $\lim_{x \rightarrow 0} x^3 = 0$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{3x^2 + 3x + 9}{3x^2 + 4x + 4} = 3$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{3x^3 + 3x^2 + 9x}{5x^3 + 4x^2 + 4} = \frac{3}{5}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x} - \sqrt[3]{a}}{x - a} = \frac{1}{3a^2}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^2} - \sqrt[3]{a^2}}{x^2 - a^2} = \frac{1}{6a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^3} - \sqrt[3]{a^3}}{x^3 - a^3} = \frac{1}{3a^2}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^4} - \sqrt[3]{a^4}}{x^4 - a^4} = \frac{1}{12a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^5} - \sqrt[3]{a^5}}{x^5 - a^5} = \frac{1}{20a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^6} - \sqrt[3]{a^6}}{x^6 - a^6} = \frac{1}{36a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^7} - \sqrt[3]{a^7}}{x^7 - a^7} = \frac{1}{48a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^8} - \sqrt[3]{a^8}}{x^8 - a^8} = \frac{1}{64a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^9} - \sqrt[3]{a^9}}{x^9 - a^9} = \frac{1}{80a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{10}} - \sqrt[3]{a^{10}}}{x^{10} - a^{10}} = \frac{1}{100a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{11}} - \sqrt[3]{a^{11}}}{x^{11} - a^{11}} = \frac{1}{120a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{12}} - \sqrt[3]{a^{12}}}{x^{12} - a^{12}} = \frac{1}{144a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{13}} - \sqrt[3]{a^{13}}}{x^{13} - a^{13}} = \frac{1}{160a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{14}} - \sqrt[3]{a^{14}}}{x^{14} - a^{14}} = \frac{1}{176a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{15}} - \sqrt[3]{a^{15}}}{x^{15} - a^{15}} = \frac{1}{192a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{16}} - \sqrt[3]{a^{16}}}{x^{16} - a^{16}} = \frac{1}{208a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{17}} - \sqrt[3]{a^{17}}}{x^{17} - a^{17}} = \frac{1}{224a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{18}} - \sqrt[3]{a^{18}}}{x^{18} - a^{18}} = \frac{1}{240a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{19}} - \sqrt[3]{a^{19}}}{x^{19} - a^{19}} = \frac{1}{256a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{20}} - \sqrt[3]{a^{20}}}{x^{20} - a^{20}} = \frac{1}{272a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{21}} - \sqrt[3]{a^{21}}}{x^{21} - a^{21}} = \frac{1}{288a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{22}} - \sqrt[3]{a^{22}}}{x^{22} - a^{22}} = \frac{1}{304a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{23}} - \sqrt[3]{a^{23}}}{x^{23} - a^{23}} = \frac{1}{320a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{24}} - \sqrt[3]{a^{24}}}{x^{24} - a^{24}} = \frac{1}{336a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{25}} - \sqrt[3]{a^{25}}}{x^{25} - a^{25}} = \frac{1}{352a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{26}} - \sqrt[3]{a^{26}}}{x^{26} - a^{26}} = \frac{1}{368a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{27}} - \sqrt[3]{a^{27}}}{x^{27} - a^{27}} = \frac{1}{384a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{28}} - \sqrt[3]{a^{28}}}{x^{28} - a^{28}} = \frac{1}{400a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{29}} - \sqrt[3]{a^{29}}}{x^{29} - a^{29}} = \frac{1}{416a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{30}} - \sqrt[3]{a^{30}}}{x^{30} - a^{30}} = \frac{1}{432a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{31}} - \sqrt[3]{a^{31}}}{x^{31} - a^{31}} = \frac{1}{448a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{32}} - \sqrt[3]{a^{32}}}{x^{32} - a^{32}} = \frac{1}{464a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{33}} - \sqrt[3]{a^{33}}}{x^{33} - a^{33}} = \frac{1}{480a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{34}} - \sqrt[3]{a^{34}}}{x^{34} - a^{34}} = \frac{1}{496a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{35}} - \sqrt[3]{a^{35}}}{x^{35} - a^{35}} = \frac{1}{512a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{36}} - \sqrt[3]{a^{36}}}{x^{36} - a^{36}} = \frac{1}{528a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{37}} - \sqrt[3]{a^{37}}}{x^{37} - a^{37}} = \frac{1}{544a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{38}} - \sqrt[3]{a^{38}}}{x^{38} - a^{38}} = \frac{1}{560a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{39}} - \sqrt[3]{a^{39}}}{x^{39} - a^{39}} = \frac{1}{576a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{40}} - \sqrt[3]{a^{40}}}{x^{40} - a^{40}} = \frac{1}{592a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{41}} - \sqrt[3]{a^{41}}}{x^{41} - a^{41}} = \frac{1}{608a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{42}} - \sqrt[3]{a^{42}}}{x^{42} - a^{42}} = \frac{1}{624a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{43}} - \sqrt[3]{a^{43}}}{x^{43} - a^{43}} = \frac{1}{640a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{44}} - \sqrt[3]{a^{44}}}{x^{44} - a^{44}} = \frac{1}{656a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{45}} - \sqrt[3]{a^{45}}}{x^{45} - a^{45}} = \frac{1}{672a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{46}} - \sqrt[3]{a^{46}}}{x^{46} - a^{46}} = \frac{1}{688a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{47}} - \sqrt[3]{a^{47}}}{x^{47} - a^{47}} = \frac{1}{704a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{48}} - \sqrt[3]{a^{48}}}{x^{48} - a^{48}} = \frac{1}{720a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{49}} - \sqrt[3]{a^{49}}}{x^{49} - a^{49}} = \frac{1}{736a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{50}} - \sqrt[3]{a^{50}}}{x^{50} - a^{50}} = \frac{1}{752a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{51}} - \sqrt[3]{a^{51}}}{x^{51} - a^{51}} = \frac{1}{768a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{52}} - \sqrt[3]{a^{52}}}{x^{52} - a^{52}} = \frac{1}{784a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{53}} - \sqrt[3]{a^{53}}}{x^{53} - a^{53}} = \frac{1}{800a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{54}} - \sqrt[3]{a^{54}}}{x^{54} - a^{54}} = \frac{1}{816a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{55}} - \sqrt[3]{a^{55}}}{x^{55} - a^{55}} = \frac{1}{832a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{56}} - \sqrt[3]{a^{56}}}{x^{56} - a^{56}} = \frac{1}{848a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{57}} - \sqrt[3]{a^{57}}}{x^{57} - a^{57}} = \frac{1}{864a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{58}} - \sqrt[3]{a^{58}}}{x^{58} - a^{58}} = \frac{1}{880a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{59}} - \sqrt[3]{a^{59}}}{x^{59} - a^{59}} = \frac{1}{896a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{60}} - \sqrt[3]{a^{60}}}{x^{60} - a^{60}} = \frac{1}{912a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{61}} - \sqrt[3]{a^{61}}}{x^{61} - a^{61}} = \frac{1}{928a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{62}} - \sqrt[3]{a^{62}}}{x^{62} - a^{62}} = \frac{1}{944a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{63}} - \sqrt[3]{a^{63}}}{x^{63} - a^{63}} = \frac{1}{960a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{64}} - \sqrt[3]{a^{64}}}{x^{64} - a^{64}} = \frac{1}{976a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{65}} - \sqrt[3]{a^{65}}}{x^{65} - a^{65}} = \frac{1}{992a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{66}} - \sqrt[3]{a^{66}}}{x^{66} - a^{66}} = \frac{1}{1008a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{67}} - \sqrt[3]{a^{67}}}{x^{67} - a^{67}} = \frac{1}{1024a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{68}} - \sqrt[3]{a^{68}}}{x^{68} - a^{68}} = \frac{1}{1040a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{69}} - \sqrt[3]{a^{69}}}{x^{69} - a^{69}} = \frac{1}{1056a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{70}} - \sqrt[3]{a^{70}}}{x^{70} - a^{70}} = \frac{1}{1072a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{71}} - \sqrt[3]{a^{71}}}{x^{71} - a^{71}} = \frac{1}{1088a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{72}} - \sqrt[3]{a^{72}}}{x^{72} - a^{72}} = \frac{1}{1104a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{73}} - \sqrt[3]{a^{73}}}{x^{73} - a^{73}} = \frac{1}{1120a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{74}} - \sqrt[3]{a^{74}}}{x^{74} - a^{74}} = \frac{1}{1136a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{75}} - \sqrt[3]{a^{75}}}{x^{75} - a^{75}} = \frac{1}{1152a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{76}} - \sqrt[3]{a^{76}}}{x^{76} - a^{76}} = \frac{1}{1168a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{77}} - \sqrt[3]{a^{77}}}{x^{77} - a^{77}} = \frac{1}{1184a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{78}} - \sqrt[3]{a^{78}}}{x^{78} - a^{78}} = \frac{1}{1200a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{79}} - \sqrt[3]{a^{79}}}{x^{79} - a^{79}} = \frac{1}{1216a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{80}} - \sqrt[3]{a^{80}}}{x^{80} - a^{80}} = \frac{1}{1232a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{81}} - \sqrt[3]{a^{81}}}{x^{81} - a^{81}} = \frac{1}{1248a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{82}} - \sqrt[3]{a^{82}}}{x^{82} - a^{82}} = \frac{1}{1264a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{83}} - \sqrt[3]{a^{83}}}{x^{83} - a^{83}} = \frac{1}{1280a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{84}} - \sqrt[3]{a^{84}}}{x^{84} - a^{84}} = \frac{1}{1296a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{85}} - \sqrt[3]{a^{85}}}{x^{85} - a^{85}} = \frac{1}{1312a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{86}} - \sqrt[3]{a^{86}}}{x^{86} - a^{86}} = \frac{1}{1328a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{87}} - \sqrt[3]{a^{87}}}{x^{87} - a^{87}} = \frac{1}{1344a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{88}} - \sqrt[3]{a^{88}}}{x^{88} - a^{88}} = \frac{1}{1360a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{89}} - \sqrt[3]{a^{89}}}{x^{89} - a^{89}} = \frac{1}{1376a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{90}} - \sqrt[3]{a^{90}}}{x^{90} - a^{90}} = \frac{1}{1392a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{91}} - \sqrt[3]{a^{91}}}{x^{91} - a^{91}} = \frac{1}{1408a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{92}} - \sqrt[3]{a^{92}}}{x^{92} - a^{92}} = \frac{1}{1424a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{93}} - \sqrt[3]{a^{93}}}{x^{93} - a^{93}} = \frac{1}{1440a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{94}} - \sqrt[3]{a^{94}}}{x^{94} - a^{94}} = \frac{1}{1456a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{95}} - \sqrt[3]{a^{95}}}{x^{95} - a^{95}} = \frac{1}{1472a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{96}} - \sqrt[3]{a^{96}}}{x^{96} - a^{96}} = \frac{1}{1488a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{97}} - \sqrt[3]{a^{97}}}{x^{97} - a^{97}} = \frac{1}{1504a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{98}} - \sqrt[3]{a^{98}}}{x^{98} - a^{98}} = \frac{1}{1520a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{99}} - \sqrt[3]{a^{99}}}{x^{99} - a^{99}} = \frac{1}{1536a}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^{100}} - \sqrt[3]{a^{100}}}{x^{100} - a^{100}} = \frac{1}{1552a}$

Índice

11.1. DISEÑO DE TANQUES Y CUBETOS.....	5
11.1.1. Consideraciones de diseño.....	5
11.1.2. Diseño de Tanques de Ácido Acético	7
11.1.3. Diseño de Tanques de Oxígeno.....	12
11.1.4. Diseño Tanques de Etileno.....	26
11.1.5. Diseño Tanques de VAM.....	38
11.2. DISEÑO DE TANQUES PULMÓN	43
11.2.1.Tanque pulmón TP-201	43
11.2.1.1. Diseño funcional.....	43
11.2.1.2. Dimensionamiento	44
11.2.1.3. Diseño mecánico.....	45
11.2.1.4. Aislamiento.....	55
11.2.2.Tanque pulmón TP-401	56
11.2.2.1. Diseño funcional.....	56
11.2.2.2. Dimensionamiento	57
11.2.2.3. Diseño mecánico.....	59
11.2.2.4. Aislamiento.....	67
11.2.3.Tanque pulmón TP-501	69
11.2.4.Tanque pulmón TP-402	70
11.2.5.Tanque pulmón TP403.....	71
11.2.6.Tanque pulmón TP-404	72
11.2.7.Tanque pulmón TP-405	73
11.3. DISEÑO DE TANQUES DE MEZCLA	74
11.3.1. Diseño Tanque de Mezcla M-201	74
11.3.1.1. Balance de materia.....	74
11.3.1.2. Diseño funcional.....	74
11.3.1.3. Dimensionamiento	75
11.3.1.4. Diseño mecánico.....	77
11.3.1.5. Agitación.....	84
11.3.1.6. Peso del tanque.....	89
11.3.1.7. Aislamiento.....	93
11.3.2. Diseño del Tanque de Mezcla M-202	95
11.3.2.1. Balance de materia	95
11.3.2.2. Diseño funcional.....	95
11.3.2.3. Dimensionamiento	96
11.3.2.4. Diseño mecánico.....	98
11.3.2.5. Peso del tanque.....	104
11.3.2.6. Aislamiento.....	108
11.3.3. Diseño del Tanque de Mezcla M-401	110
11.3.3.1. Balance de materia	110
11.3.3.2. Diseño funcional.....	111
11.3.3.3. Dimensionamiento	112
11.3.3.4. Diseño mecánico.....	113
11.3.3.5. Agitación.....	120
11.3.3.6. Peso del tanque.....	124
11.3.3.7. Aislamiento.....	129
11.4. DISEÑO DEL REACTOR MULTITUBULAR DE LECHO FIJO R-201	130
11.4.1.Introducción.....	130
11.4.2.Balance de Materia	133
11.4.3. Dimensionamiento	139

11.4.4. Balance de energía.....	144
11.4.5. Diseño mecánico.....	147
11.4.6. Aislamiento de equipo.....	170
11.4. DISEÑO DE COLUMNAS DE SEPARACIÓN	172
11.4.1. Introducción.....	172
11.4.1.1. Columna de absorción.....	172
11.4.1.2. Columna de destilación	173
11.4.1.3. Tipos de columnas.....	174
11.4.1.4. Comparación entre columnas de platos y de relleno	176
11.4.2. Columna de absorción C-401.....	177
11.4.2.1. Diseño funcional.....	177
11.4.2.2. Dimensionado.....	181
11.4.2.3. Diseño mecánico.....	187
11.4.2.4. Aislamiento.....	199
11.4.3. Columna de destilación C-402.....	200
11.4.3.1. Diseño funcional.....	201
11.4.3.2. Diseño con Aspen Hysys	203
11.4.3.3. Dimensionado.....	209
11.4.3.4. Diseño mecánico.....	214
11.4.3.5. Aislamiento.....	225
11.5. DISEÑO DEL DECANΤADOR TRIFÁSICO.....	226
11.5.1. Introducción.....	226
11.5.2. Diseño funcional	228
11.5.3. Diseño mecánico.....	234
11.5.4. Peso del tanque	238
11.6. DISEÑO DE INTERCAMBIADORES DE CALOR.....	243
11.6.1. Introducción.....	243
11.6.2. Tipos de intercambiadores de calor.....	243
11.6.2.1. Intercambiadores de contacto directo.....	243
11.6.2.2. Intercambiadores de contacto indirecto	244
11.6.3. Diseño funcional y mecánico.....	247
11.6.3.1. Balance Térmico	249
11.6.3.2. Cálculo del DTML	249
11.6.3.3. Corrección DTML (DTML)c.....	250
11.6.3.4. Selección del intercambiador	251
11.6.3.5. Utilización del software.....	255
11.6.3.6. Intercambiador E-201	261
11.6.3.7. Intercambiador E-202.....	262
11.6.3.8. Intercambiador E-301.....	262
11.6.3.9. Intercambiador E-303.....	263
11.6.3.10. Intercambiador E-401.....	263
11.6.3.11. Condensador C-402.....	264
11.6.3.12. Evaporador C-402	264
11.6.3.13. Intercambiador E-402.....	265
11.7. DISEÑO DE BOMBAS.....	266
11.7.1. Introducción.....	266
11.7.2. Cálculo de la potencia de la bomba	266
11.7.3. Cálculo del régimen del fluido.....	266
11.7.4. Cálculo de las pérdidas de carga.....	268
11.7.5. Cálculo de la potencia real y teórica de la bomba	269
11.7.6. Cálculo del NPSH disponible	269
11.8. DISEÑO DE COMPRESORES	270
11.8.1. Diseño con Aspen Hysys.....	270

11.8.2. Diseño teórico	272
11.9. DISEÑO DE EQUIPOS DE SERVICIO.....	275
11.9.1. Torres de refrigeración.....	275
11.9.2. Caldera	280

11. MANUAL DE CÁLCULOS

11.1. DISEÑO DE TANQUES Y CUBETOS

11.1.1. Consideraciones de diseño

Los tanques se han diseñado según las normas:

ATEX, ASME sección VIII, MIE APQ-1, DIN 4119 (*above-ground cylindrical flat-bottom metallic tank*), APQ -6 y APQ-10.

- Volumen de diseño

Se ha sobredimensionado un 15% el volumen de los tanques como margen de seguridad. Así que el volumen de diseño será :

$$V_d = V_t \cdot 1.15$$

La relación entre diámetro y altura en tanques no esféricos es de 1.75.

- Presión de diseño

Se ha sobredimensionado un 15% la presión de los tanques como margen de seguridad. Así que la presión de diseño será:

$$P_d = P_t \cdot 1.15$$

- Temperatura de diseño

Se ha cogido un margen de seguridad de 20ºC respecto a la temperatura de trabajo. Así que la temperatura de diseño será:

$$T_d = T_t + 20^\circ C$$

- Materiales de diseño

Para la mayoría de los tanques se ha cogido un acero inoxidable AISI 304 ya que es un material cuyo precio no es muy elevado y nos ofrece unas propiedades muy buenas para el diseño de tanques, a excepción del tanque de ácido acético, como es un

compuesto muy corrosivo se ha usado el acero inoxidable AISI 316L ya que nos ofrece buenas propiedades ante la corrosión. Sus características serían las siguientes:

Tabla 11.1.1. Características de AISI 304 y AISI 316L.

Material	AISI 304	AISI 316L
Composición	18Cr-8Ni Spec No: SA-240	17Cr-12Ni Spec No: SA-240
Densidad(ρ)	7930 kg/m ³	7936 kg/m ³
Tensión máxima admisible(S)	85000psi	85000psi
Módulo de elasticidad (E)	200GPa	193 GPa
Sobreespesor por corrosión (C₁)	0.001 mm	0.001 mm
Sobreespesor por fabricación (C₂)	0.0018 mm	0.0018 mm

- **Venteo**

Todo recipiente de almacenamiento deberá disponer de sistemas de venteo para prevenir la deformación del mismo como consecuencia de llenados, vaciados o cambios de temperatura ambiente. Tendrán como mínimo un tamaño igual al mayor de las tuberías de llenado o vaciado y en ningún caso inferiores a 35 mm de diámetro interior.

- **Venteos de emergencia**

Todo recipiente de almacenamiento de superficie tendrá alguna forma constructiva o dispositivo que permita aliviar el exceso de presión interna causado por un fuego exterior. Se han dimensionado los venteos según normativa MIE APQ-1 *Capítulo Artículo 10 apartado 3.*

- **Diseño del parque de tanques**

Se ha diseñado según los cánones de la MIE APQ-1 Capítulo II Artículo 17.

- **Acción de viento**

No se considera la acción de viento como un factor de importancia, puesto que los valores tabulados medios y máximos (METEOCAT) no hacen pensar en una acción preventiva ante corrientes violentas de viento.

- **Inertización**

Se ha decidido hacer una inertización con nitrógeno para la creación de atmósferas protectoras en tanques de almacenamiento para prevenir incendios o explosiones. También se utiliza para mantener una atmósfera seca e inerte y evitar la corrosión de tuberías y mantener los contenedores limpios.

11.1.2. Diseño de Tanques de Ácido Acético

Para el diseño de tanques de ácido acético se usado el acero inoxidable con una forma cilíndrica con el fondo superior en cono. Se ha usado la normativa MIE-APQ-6 al tratarse de un líquido corrosivo.

Además, en nuestra situación es necesario proveer de calor al tanque para prevenir que el ácido se congele, debido a que la temperatura de congelación es fácilmente alcanzable (16°C). A continuación se describe el proceso:

- **Volumen**

Suponiendo un tiempo de residencia de 48h tenemos que el volumen del tanque será de:

$$V = \frac{Q_m \cdot \tau}{\rho} = \frac{6786.04 \text{ Kg/h} \cdot 48 \text{ h}}{1049.2 \text{ Kg/m}^3} = 310.48 \text{ m}^3$$

- **Sobredimensionado**

$$V_s = V \cdot 1.15 = 310.48 \text{ m}^3 \cdot 1.15 = 357.02 \cong 357 \text{ m}^3$$

- **Número y volumen de los tanques**

Tenemos 2 tanques cuyo volumen será de:

$$V_t = \frac{V_s}{n \text{ tanques}} = \frac{357 \text{ m}^3}{2} = 178.5 \text{ m}^3$$

Como máximo los tanques tienen que tener un 75% de su llenado máximo, por lo que las dimensiones de los tanques se calculan como:

- **Diámetro interno tanque**

$$h \geq 1.75r$$

$$V_t = \pi \cdot r^2 \cdot h \Rightarrow (178.5 \cdot 0.75) = \pi \cdot r^2 \cdot (1.75 \cdot r)$$

$$r = 2.65 \text{ m}$$

$$D_i = 2r = 5.3 \text{ m}$$

- **Altura cilindro**

$$h = 1.75 \cdot D_i = 9.275 \text{ m}$$

- **Volumen cilindro**

$$V_c = \pi \cdot r^2 \cdot h = \pi \cdot (2.65 \text{ m})^2 \cdot 9.275 \text{ m} = 204.624 \text{ m}^3$$

- **Ocupación Acético en el tanque**

$$\% V_{\text{ocupado}} = \frac{\frac{V}{n \text{ tanques}}}{V_c} \cdot 100 = \frac{310.48 \text{ m}^3 / 2}{204.624 \text{ m}^3} \cdot 100 = 75\%$$

- **Presión compuesto**

$$h_l = \frac{\frac{V}{n \text{ tanques}}}{\pi \cdot \left(\frac{D_i}{2}\right)^2} = \frac{\frac{310.48 \text{ m}^3}{2}}{\pi \cdot \left(\frac{5.3}{2} \text{ m}\right)^2} = 7.03 \text{ m}$$

$$\Delta P = \rho \cdot g \cdot h_l = 1049.2 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 7.03 \text{ m} = 72422 \frac{\text{Kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2}$$

$$\Delta P = 72422 \frac{\text{Kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2} = 72422 \cdot 10 \text{ Pa} = 72422 \text{ Pa} \cdot \frac{1 \text{ atm}}{101325 \text{ Pa}} = 0.71 \text{ atm}$$

- **Presión de diseño teórica**

$$P_t = \Delta P + P_c + P_{\text{atm}} = (0.71 + 1 + 1) \text{ atm} = 2.71 \text{ atm}$$

- **Presión de diseño interna**

$$P_d = P_t \cdot 1.15 = 2.71 \text{ atm} \cdot 1.15 = 3.12 \text{ atm}$$

- **Presión externa**

$$P_e = 1 \text{ atm}$$

- **Temperatura de diseño**

$$T_d = T_t + 20^\circ\text{C} = 40^\circ\text{C}$$

- **Espesor del tanque**

$$\tau = \frac{P_d \cdot r}{S \cdot E - 0.6 \cdot P_d} + C_1 + C_2$$

$$\tau = \frac{3.12 \text{ atm} \cdot \frac{14.7 \text{ psi}}{1 \text{ atm}} \cdot 2.65 \text{ m}}{(85000 \text{ psi} \cdot 0.85 - 0.6 \cdot 3.12 \text{ atm} \cdot \frac{14.7 \text{ psi}}{1 \text{ atm}})} + 0.001 \text{ m} + 0.0018 \text{ m} = 0.0045 \text{ m}$$

$$\tau = 5 \text{ mm}$$

- **Fondo superior**

$$\tau = \frac{P_d \cdot D}{\cos \alpha \cdot (S \cdot E - 0.6 \cdot P_d)}$$

$$\alpha = \cos^{-1} \left(\frac{h}{\sqrt{h^2 + r^2}} \right) = \cos^{-1} \left(\frac{1}{\sqrt{1^2 + 2.65^2}} \right) = 67.83^\circ$$

$$\tau = \frac{3.12 \text{ atm} \cdot \frac{14.7 \text{ psi}}{1 \text{ atm}} \cdot 5.3 \text{ m}}{\cos 63.61 \cdot (85000 \text{ psi} \cdot 0.85 - 0.6 \cdot 3.12 \text{ atm} \cdot \frac{14.7 \text{ psi}}{1 \text{ atm}})} = 0.00495 \text{ m} \cong 5 \text{ mm}$$

- **Fondo inferior**

$$\tau = \frac{2.6 \cdot D(h_l - 1)G}{S} + C_1 = \frac{2.6 \cdot 5.3 \text{ m} (9.25 - 1) 9.8}{193 \text{ MPa}} + 0.001 = 0.0051 \text{ m} \cong 5 \text{ mm}$$

- **Vento de emergencia**

MIE APQ-6

Área húmeda

$$A_h = 2\pi r \cdot h = 2\pi \cdot 2.65m \cdot 9.25m = 154.43 \text{ m}^2$$

Calor recibido en caso de fuego externo

$$Q_f = 139.7 \cdot F \cdot A_h^{0.82} \cdot 1000 = 139.7 \cdot 0.3 \cdot 154.43^{0.82} \cdot 1000 = 2612668 \frac{\text{Kj}}{\text{h}}$$

Capacidad viento

$$C_v = \frac{4.414 \cdot Q_f}{L \cdot \sqrt{PM_p}} = \frac{4.414 \cdot 2612668 \frac{\text{Kj}}{\text{h}}}{316.07 \frac{\text{Kj}}{\text{kg}} \cdot \sqrt{60.05 \text{ u. m. a}}} \cong 4708 \text{ m}^3$$

- **Peso Cilindro**

$$P_c = (V_{\text{ext}} - V_{\text{int}}) \cdot \rho_{\text{AISI316L}}$$

$$D_e = D_i + 2\tau = 5.3m + (0.005 \cdot 2)m = 5.31m$$

$$P_c = \left(\left(\frac{D_e^2}{2} - \frac{D_i^2}{2} \right) \cdot \pi h \right) \rho_{\text{AISI316L}} = \left(\left(\frac{5.31m}{2} \right)^2 - \left(\frac{5m}{2} \right)^2 \right) \cdot \pi \cdot 9.25m \cdot 7960 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} = 6152.23 \text{ Kg}$$

- **Peso Fondo**

$$P_f = \left(\pi \cdot \left(\frac{D_e}{2} \right)^2 \cdot \tau \right) \rho_{\text{AISI316L}} = \left(\pi \cdot \left(\frac{5.31m}{2} \right)^2 \cdot 0.005m \right) \cdot 7960 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} = 663.31 \text{ Kg}$$

- **Peso Fondo superior**

$$D_{\text{efs}} = D_i + 2\tau = 5.3m + (0.005 \cdot 2)m = 5.31m$$

$$r_{\text{efs}} = \frac{D_{\text{efs}}}{2} = \frac{5.31}{2} \text{ m} = 2.655 \text{ m}$$

$$h_{efs} = h_{fs} + \tau = 1m + 0.004m = 1.004m$$

$$P_{fs} = \left(\frac{\pi \cdot r_{efs}^2 \cdot h_{efs}}{3} - \frac{\pi \cdot r_{ifs}^2 \cdot h_{efs}}{3} \right) \cdot \rho_{AISI316L}$$

$$P_{fs} = \left(\frac{\pi \cdot 5.31m^2 \cdot 1.005}{3} - \frac{\pi \cdot 5.3m^2 \cdot 1m}{3} \right) \cdot 7960 \frac{kg}{m^3} = 881.378 kg$$

- **Peso Equipo**

$$P_e = P_c + P_f + P_{fs} = 6152.23Kg + 663.31 Kg + 881.378 Kg = 7696.92 kg$$

- **Peso Equipo en Operación**

$$P_{op} = P_e + V_t \cdot \rho_{ac} = 7696.92 Kg + \frac{310.48}{3} m^3 \cdot 1049 \frac{kg}{m^3} = 116274 Kg = 116.27 Tn$$

- **Resistencia Terreno**

$$\frac{P_{op}}{A_{eq}} = \frac{116274kg}{\pi \cdot \left(\frac{5.31}{2}m\right)^2 \cdot \frac{10000cm^2}{1m^2}} = 0.52 \frac{kg}{cm^2}$$

- **Diseño del parque de tanques**

APQ-1

$$D_t = 0.5 \varnothing_t = 0.5 \cdot 5.3m = 2.655m$$

Reducción por aplicación de 1 medida de protección nivel 2=0.8 (inertización).

$$D_{tp} = D_t \cdot 0.8 = 2.655m \cdot 0.8 = 2.12m$$

- **Cubeto**

Longitud cubeto

$$L_{cu} = n_{tf} \cdot \varnothing_t + D_t + 1 \cdot D_{tp} = 2 \cdot 5.3m + 2.65m + 1 \cdot 2.25m = 15.37m$$

Anchura cubeto

$$W_{cu} = n_t \cdot \emptyset_t + D_{tp} = 1 \cdot 5.3m + 2.12m = 7.42m$$

Altura cubeto

Por normativa, la altura del cubeto como mínimo tiene que ser de 1m. Por lo tanto tenemos un volumen del cubeto de :

$$V_{cu} = V_l = W_{cu} \cdot L_{cu} \cdot h_{cu}$$

$$6.3m \cdot 17.55m \cdot 1 = 114m^3$$

- Distancia Vallado

La pared interior de los cubetos distará, como mínimo, 1.5 metros del vallado exterior de la planta. El resto de las instalaciones del almacenamiento distarán al menos 3 metros de dicho vallado. Tendrá que tener un vallado una distancia igual o mayor que la que corresponde a los de la clase D en los cuadros II-5 y II-6 de la ITC MIE-APQ 1.

MIE APQ-001

Cuadro II.1: 3.2 Clase D. Vallado=20 m

Cuadro II.2 Coeficiente reducción por almacenamiento=0.5

Cuadro II.4 Reducciones de las distancias entre instalaciones fijas de superficie por protecciones adicionales Nivel 2.1 =0.5

$$\text{Distancia Vallado} = 20m \cdot 0.5 \cdot 0.5 = 5m$$

11.1.3. Diseño de Tanques de Oxígeno

Para el diseño de tanques de Oxígeno se ha usado un tanque de tipo criogénico (condiciones de alta presión y baja temperatura) debido a las características de este. De manera que el oxígeno será almacenado como un líquido licuado. El almacenamiento en estas condiciones permiten trabajar con el oxígeno más fácilmente y reducir el volumen del tanque. Se almacenara siguiendo la normativa MIE-APQ-001 y MIE-AP-10.

Los recipientes criogénicos están diseñados para almacenamiento y transporte de gases licuados a temperaturas bajo cero. En este caso se almacenará a 8 atmósferas y -160°C, por lo tanto implica que las características de diseño de este tipo de tanques sean especiales. La normativa de aplicación: Real Decreto 1244/1979, de 4 Abril por el que se aprueba el Reglamento de Aparatos a Presión (B.O.E. 29-5-1979) e Instrucción Técnica Complementaria.

En la siguiente *Figura 11.1* se muestra un esquema de un sistema de almacenamiento criogénico:

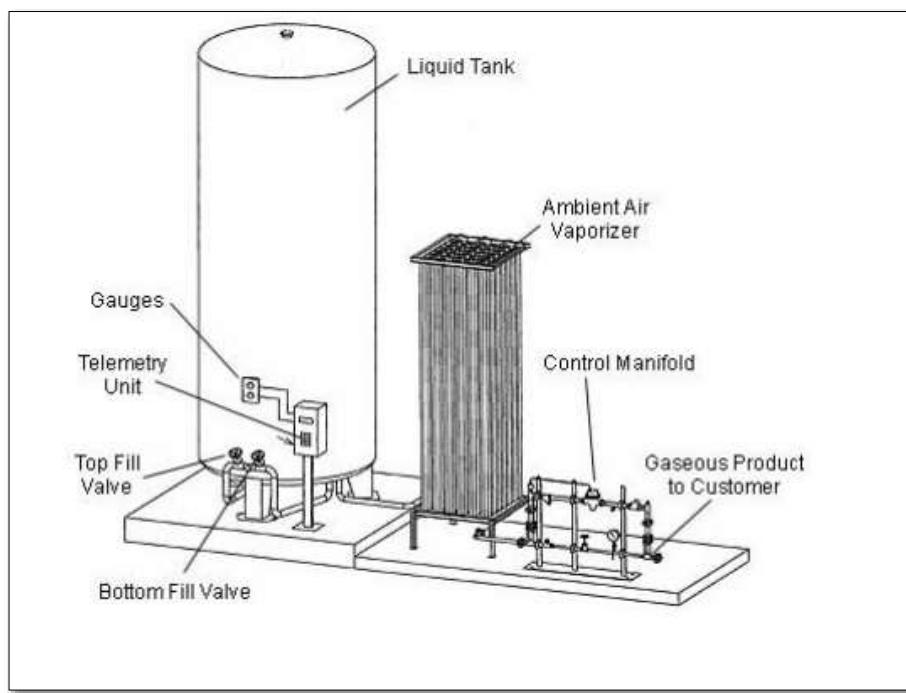


Figura 11.1. Sistema de un almacenamiento criogénico.

La estación gasificadora está compuesta esencialmente de un depósito para el almacenamiento del gas licuado a temperatura criogénica y del correspondiente módulo de tubería aleteada para la gasificación posterior. El funcionamiento de la estación gasificadora es totalmente automático, por lo que el consumidor sólo debe preocuparse de solicitar el suministro de gas licuado cuando el nivel del depósito así lo aconseje. En la siguiente *Figura 11.2* se puede observar el esquema de un tanque criogénico:

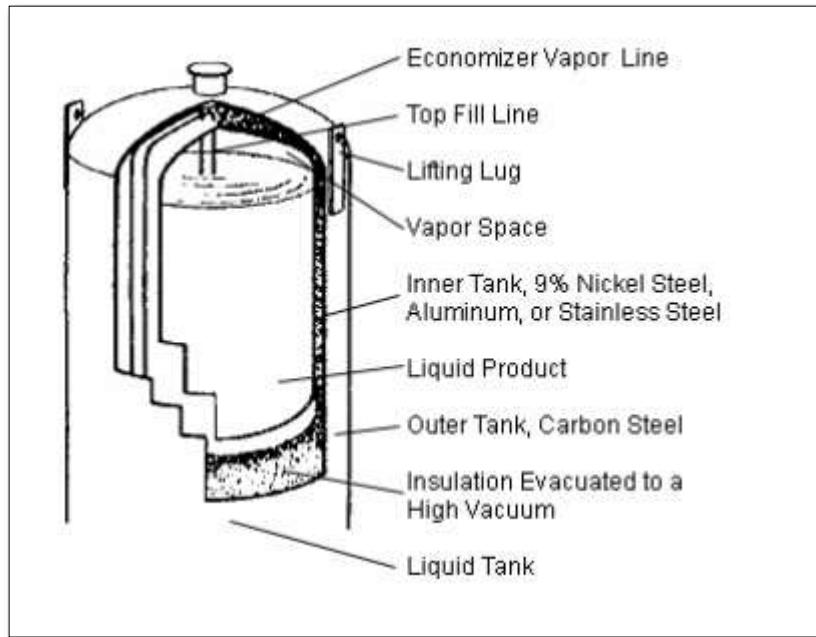


Figura 11.2. Esquema tanque criogénico.

Estos tanques de almacenamiento serán tanques de disposición vertical, con fondo superior e inferior toriesférico decimal. Estarán situados en el parque de tanques en el área 100, correspondiente en la zona de almacenamiento de materias primeras.

La estructura de estos tanques la forman dos recipientes, un recipiente de interior y otro de exterior. Este último recipiente exterior estará a la vez recubierto de material aislante.

Esto se hace para poder garantizar que la temperatura de almacenamiento se mantiene prácticamente constante puesto que con esta estructura conseguiremos que las variaciones de temperatura sean mínimas. En referencia a los materiales de los recipientes, el recipiente interiores de acero al carbono SANO-516 Gr 55 y es el que está en contacto directo con el oxígeno líquido, el recipiente exterior también será de acero al carbono SANO-516 Gr 55. Se elige este material debido a que es más recomendable que el acero al carbono SANO-515 Gr 55 para temperaturas bajas. El espacio entre ambos recipientes está lleno de perlita y se mantiene en condiciones de vacío.

Para el diseño de estos tanques se han hecho los siguientes cálculos:

- **Volumen**

Suponiendo un tiempo de residencia de 48 h tenemos que :

$$V = \frac{Q_m \cdot \tau}{\rho} = \frac{2498 \frac{\text{Kg}}{\text{h}} \cdot 48 \text{ h}}{1.429 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}} = 83904.19 \text{ m}^3$$

Sabiendo que un litro de oxígeno líquido equivale a 0.68 m³ de oxígeno gas, tenemos un volumen total de O₂ líquido de:

$$83904.19 \text{ m}^3 \text{ O}_{2g} = \frac{0.001 \text{ m}^3 \text{ O}_{2l}}{0.68 \text{ m}^3 \text{ O}_{2g}} = 123 \text{ m}^3 \text{ O}_{2l}$$

- **Sobredimensionado**

$$V_s = V \cdot 1.15 = 123 \text{ m}^3 \cdot 1.15 = 141.5 \cong 142 \text{ m}^3$$

A partir de la siguiente expresión se obtendrá el diámetro y posteriormente la altura:

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

▪ Relación entre altura (H) y diámetro (D) del tanque:

$$\frac{H}{D} = 1.75$$

Cálculo del diámetro a partir de la ecuación:

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot V_{\text{tanque}}}{2 \cdot \pi}}$$

Se sustituyen los valores:

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 142 \text{ m}^3}{2 \cdot \pi}} = 4.7 \text{ m}$$

A partir de la relación mencionada, se obtiene la altura del tanque:

$$H = 1.75 \cdot 4.7 \text{ m} = 8.22 \text{ m}$$

Una vez obtenidos los valores del cuerpo cilíndrico del tanque, estos se normalizan para que sean unas medidas estándar fácil de obtener y económicamente más viable. Se fijan las siguientes medidas:

$$\text{Altura} = \mathbf{8.75 \text{ m}}, \text{Diámetro} = \mathbf{5 \text{ m}}$$

A partir del dimensionamiento del tanque y las medidas estándar se vuelve a calcular el volumen del tanque, siendo este el volumen real al cual se diseñará:

$$V_{\text{tanque,real}} = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot H$$

Dónde:

- $V_{\text{tanque,real}}$: Volumen real del tanque (m^3).
- D: Diámetro del tanque (m).
- H: Altura del tanque (m).

$$V_{\text{tanque,real}} = \frac{\pi}{4} \cdot (5 \text{ m})^2 \cdot (8.75 \text{ m}) = 171.8 \text{ m}^3$$

Seguidamente, se calcula el porcentaje de ocupación de la mezcla en el tanque de la siguiente manera:

$$\% \text{ Volumen ocupado} = \frac{\frac{V_{\text{mezcla}}}{N^{\circ} \text{ tanques}}}{V_{\text{tanque,real}}} \cdot 100$$

Dónde:

- V_{mezcla} : Volumen de la mezcla (m^3).
- N° tanques: Número de tanques (1).
- $V_{\text{tanque,real}}$: Volumen real del tanque (m^3).

$$\% \text{ Volumen ocupado} = \frac{\frac{123 \text{ m}^3}{1}}{171.3 \text{ m}^3} \cdot 100 = 71.6 \%$$

- Presión de diseño

$$P_{\text{diseño,1}} = 1.15 \cdot P_{\text{operación}}$$

Dónde:

- $P_{operación}$: Presión de operación (800 kPa = 8 bar)

$$P_{diseño,1} = 1.15 \cdot 8 \text{ bar} = 9.2 \text{ bar}$$

- **Temperatura de diseño**

La temperatura de diseño se establece 20°C por encima de la temperatura de operación del tanque, en este caso, como la temperatura es negativa se establece 20°C por debajo de la temperatura de operación.

$$T_{diseño} = T_{operación} + 20 \text{ °C}$$

Dónde:

- $T_{operación}$: Temperatura de operación del tanque (150°C)

$$T_{diseño} = -160 \text{ °C} - 20 \text{ °C} = 180 \text{ °C}$$

- **Espesor de los cabezales**

$$t_{cab.} = \frac{P_t \cdot L \cdot M}{2 \cdot S \cdot E - 0.2 \cdot P_t} + C.A.$$

Dónde:

- t_{cab} : Espesor de los cabezales (mm)
- P_t : Presión interna del tanque (bar)
- L : Diámetro interno del tanque (mm)
- M : Factor que depende de la relación L/r
- S : Esfuerzo del material (bar)
- E : Factor de soldadura (0.85)
- $C.A.$: Tolerancia de corrosión (2 mm)

Se sustituyen los valores en la ecuación:

$$t_{cab.} = \frac{9.2 \text{ bar} \cdot 5000 \text{ mm} \cdot 1.54}{2 \cdot 1079.03 \text{ bar} \cdot 0.85 - 0.2 \cdot 9.2 \text{ bar}} + 2 \text{ mm} = 16.3 \text{ mm}$$

Además, se le suma una tolerancia de fabricación del 10% al espesor de cabezal. De esta manera el espesor será:

$$t_{cab.} = 1.10 \cdot 16.30 \text{ mm} = 17.8 \text{ mm}$$

El valor del espesor del cabezal será de **18 mm**.

A partir del valor del espesor de los cabezales y mediante la siguiente ecuación se puede calcular el diámetro externo del cabezal.

$$D_{ext,cab.} = D_{int,cab.} + 2 \cdot t_{cab.}$$

Dónde:

- $D_{ext, cab.}$: Diámetro externo del cabezal (mm).
- $D_{int, cab.}$: Diámetro interno del cabezal (mm).
- $t_{cab.}$: Espesor del cabezal (mm).

Sustitución de valores:

$$D_{ext,cab.} = 5000 \text{ mm} + 2 \cdot 18 \text{ mm} = 5036 \text{ mm} = 5.036 \text{ m}$$

- **Espesor del cilindro**

De la misma manera que para el espesor de los cabezales se procede para calcular el espesor del cilindro siguiendo el código ASME.

Se utiliza la siguiente ecuación para el cálculo del espesor del cuerpo cilíndrico:

$$t_c = \frac{P_c \cdot R_{int,c}}{S \cdot E - 0.6 \cdot P_c} + C.A.$$

Dónde:

- t_c : Espesor del cilindro (mm).
- P_c : Presión interna del cilindro (atm).
- $R_{int,c}$: Radio interno del cilindro (mm).
- S : Esfuerzo del material (bar).
- E : Factor de soldadura (0.85).

- C.A.: Tolerancia de corrosión (2 mm).

$$t_c = \frac{9.2 \text{ bar} \cdot 2500 \text{ mm}}{1079.03 \text{ bar} \cdot 0.85 - 0.6 \cdot 9.2 \text{ bar}} + 2 \text{ mm} = 16.7 \text{ mm}$$

El espesor del cilindro es de 16.7 mm, pero debido a los espesores estándar de chapa en Europa se elige un valor de espesor del tanque de 17 mm.

Para que el diseño, montaje y mantenimiento sea más fácil y con el objetivo de aminorar costes se decide utilizar un mismo grosor de chapa para todo el diseño, utilizando el espesor más grande entre el cabezal y el cilindro, un valor de 18mm.

Una vez conocido el espesor que se usará para el diseño de todo el equipo, se determina el diámetro externo del tanque comprobando que se corresponde con el diámetro externo del cabezal con la misma expresión anterior:

$$D_{\text{ext,tanque}} = D_{\text{tanque}} + 2 \cdot t_c$$

Dónde:

- $D_{\text{ext, tanque}}$: Diámetro externo del tanque (m).
- D_{tanque} : Diámetro interno del tanque (m).
- t_c : Espesor del cilindro (m).

Por lo tanto se sustituyen los valores:

$$D_{\text{ext,tanque}} = 5 \text{ m} + 2 \cdot 0.016 \text{ m} = 5.032 \text{ m}$$

- Altura de los cabezales

Se determina la altura de los cabezales según las ecuaciones de proporcionadas por la página web de “Koenig-co”, proveedora de cabezales.

$$DH = 0.1935 \cdot D_{\text{tanque}} - 0.455 \cdot t_{\text{cab.}}$$

$$SF = 3.5 \cdot t_{\text{cab.}}$$

$$TH = SF + DH$$

Dónde:

- D_{tanque} : Diámetro interno del tanque (m).
- $t_{\text{cab.}}$: Espesor del cabezal (m).

Se sustituyen los valores en las ecuaciones:

$$DH = 0.1935 \cdot 5000 \text{ mm} - 0.455 \cdot 16 \text{ mm} = 0.95 \text{ m}$$

$$SF = 3.5 \cdot 16 \text{ mm} = 0.061 \text{ m}$$

$$TH = 0.95 \text{ m} + 0.061 = 1.02 \text{ m}$$

Se obtiene una altura de los cabezales de **1.02 m**.

- **Altura del tanque**

Se procede a calcular la altura del tanque a partir de la siguiente ecuación:

$$H_{\text{Total}} = H + 2 \cdot H_{\text{cab.}}$$

Dónde:

- H_{Total} : Altura total del tanque (m).
- H : Altura del tanque (m).
- $H_{\text{cab.}}$: Altura del cabezal (m).

Se obtiene la altura total del tanque:

$$H_{\text{Total}} = 8.75 \text{ m} + 2 \cdot 1.02 \text{ m} = 10.8 \text{ m}$$

- **Peso del tanque**

Peso del tanque vacío

Se ha de conocer el volumen del tanque para poder calcular el peso en vacío. Por eso, primero se calcula el volumen de los cabezales de la siguiente manera:

→ Cálculo del volumen interno del cabezal:

$$V_{\text{int,cab.}} = 0.1 \cdot (D_{\text{tanque}})^3$$

Dónde:

- $V_{\text{int,cab.}}$: Volumen interior del cabezal (m^3).
- D_{tanque} : Diámetro interno del tanque (m).

$$V_{\text{int,cab.}} = 0.1 \cdot (5 \text{ m})^3 = 12.5 \text{ m}^3$$

→ Se calcula el volumen externo de los cabezales:

$$V_{\text{ext,cab.}} = 0.1 \cdot (D_{\text{tanque}} + t_{\text{cab.}})^3$$

Dónde:

- $V_{\text{ext,cab.}}$: Volumen interior del cabezal (m^3).
- D_{tanque} : Diámetro interno del tanque (m).
- $t_{\text{cab.}}$: Espesor del cabezal (m).

$$V_{\text{ext,cab.}} = 0.1 \cdot (5 \text{ m} + 0.016 \text{ m})^3 = 12.77 \text{ m}^3$$

La diferencia de estos valores será el volumen que ocupa la pared del cabezal:

$$V_{\text{pared cab.}} = V_{\text{ext,cab.}} - V_{\text{int,cab.}}$$

Dónde:

- $V_{\text{paredcab.}}$: Volumen de la pared del cabezal (m^3).
- $V_{\text{ext,cab.}}$: Volumen exterior del cabezal (m^3).
- $V_{\text{int,cab.}}$: Volumen interior del cabezal (m^3).

$$V_{\text{pared cab.}} = 12.77 \text{ m}^3 - 12.5 \text{ m}^3 = 0.27 \text{ m}^3$$

De la misma manera se calcula el volumen interno del cilindro que conforma el tanque:

$$V_{\text{int,c}} = \pi \cdot \left(\frac{D_{\text{tanque}}}{2} \right)^2 \cdot H$$

Dónde:

- $V_{\text{int,c}}$: Volumen interior del cilindro (m^3).
- D_{tanque} : Diámetro interno del tanque (m).
- H : Altura del cilindro (m).

$$V_{\text{int,c}} = \pi \cdot \left(\frac{5 \text{ m}}{2}\right)^2 \cdot 8.75 \text{ m} = 171.8 \text{ m}^3$$

A continuación, se calcula también el volumen externo:

$$V_{\text{ext,c}} = \pi \cdot \left(\frac{D_{\text{ext,tanque}}}{2}\right)^2 \cdot H$$

Dónde:

- $V_{\text{ext,c}}$: Volumen interior del cilindro (m^3).
- $D_{\text{ext,tanque}}$: Diámetro interno del tanque (m).
- H : Altura del cilindro (m).

$$V_{\text{ext,c}} = \pi \cdot \left(\frac{5.032 \text{ m}}{2}\right)^2 \cdot 8.75 \text{ m} = 174.28 \text{ m}^3$$

La diferencia entre estos dos volúmenes es el volumen de la pared del cilindro:

$$V_{\text{pared cil.}} = V_{\text{ext,cil.}} - V_{\text{int,cil.}}$$

Dónde:

- $V_{\text{pared cil.}}$: Volumen de la pared del cilindro (m^3)
- $V_{\text{ext,cil.}}$: Volumen exterior del cilindro (m^3)
- $V_{\text{int,cil.}}$: Volumen interior del cilindro (m^3)

Los valores en la ecuación:

$$V_{\text{pared cil.}} = 174.28 \text{ m}^3 - 171.8 \text{ m}^3 = 2.48 \text{ m}^3$$

A continuación se calcula el volumen de la pared del equipo, mediante la siguiente expresión:

$$V_{\text{pared tanque}} = V_{\text{pared,cil.}} + 2 \cdot V_{\text{pared,cab.}}$$

Dónde:

- $V_{\text{pared,tanque}}$: Volumen de la pared del tanque (m^3).
- $V_{\text{pared,cil.}}$: Volumen pared del cilindro (m^3).
- $V_{\text{pared,cab.}}$: Volumen pared del cabezal (m^3).

$$V_{\text{pared tanque}} = 2.48 \text{ m}^3 + 2 \cdot 0.27 \text{ m}^3 = 2.75 \text{ m}^3$$

Se obtiene el peso del tanque en vacío a partir de la densidad del acero que es de 7850 kg/m³, de la siguiente manera:

$$M_{\text{tanque vacío}} = 1.1 \cdot V_{\text{pared tanque}} \cdot \rho_{\text{acero inox.}}$$

Dónde:

- $M_{\text{tanque vacío}}$: Peso del equipo lleno de agua (kg).
- $V_{\text{pared tanque}}$: Volumen de la pared del tanque (m³).
- $\rho_{\text{acero inox.}}$: Densidad del acero inoxidable AISI 316L (kg/m³).
-

$$M_{\text{tanque vacío}} = 1.1 \cdot 2.75 \text{m}^3 \cdot 7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 23788.21 \text{ kg}$$

En toneladas:

$$M_{\text{tanque vacío}} = 23.8 \text{ Tn}$$

Peso del tanque lleno de agua

Para conocer el peso del tanque lleno de agua a modo de prueba, se calcula el volumen del tanque de la siguiente manera:

$$V_{\text{tanque}} = V_{\text{int,c}} + 2 \cdot V_{\text{int,cab.}}$$

Dónde:

- V_{tanque} : Volumen del tanque (m³).
- $V_{\text{int,c.}}$: Volumen interior del cilindro (m³).
- $V_{\text{int, cab.}}$: Volumen interior del cabezal (m³).

$$V_{\text{tanque}} = 171.8 \text{m}^3 + 2 \cdot 12.5 \text{m}^3 = 196.8 \text{m}^3$$

A continuación, se calcula el peso del tanque con agua:

$$M_{\text{tanque con agua}} = M_{\text{tanque vacío}} + V_{\text{tanque}} \cdot \rho_{\text{agua}}$$

Dónde:

- $M_{\text{tanque con agua}}$: Peso del equipo lleno de agua (kg).
- $M_{\text{tanque vacío}}$: Masa total del equipo vacío (kg).

- V_{tanque} : Volumen del tanque (m^3).
- ρ_{agua} : Densidad del agua (kg/m^3).

$$M_{\text{tanque con agua}} = 23788.21 \text{ kg} + 196.8 \text{ m}^3 \cdot 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 220594 \text{ Kg}$$

En toneladas:

$$M_{\text{tanque con agua}} = 220.6 \text{ Tn}$$

Peso del tanque en operación

Se procede a calcular el peso del tanque en operación, teniendo en cuenta la densidad del fluido y el volumen del tanque.

$$M_{\text{tanque en op.}} = M_{\text{tanque vacío}} + V_{\text{tanque}} \cdot \rho_{\text{mezcla}}$$

Dónde:

- $M_{\text{tanque en op.}}$: Peso del equipo en operación (kg).
- $M_{\text{tanque vacío}}$: Masa total del tanque vacío (kg).
- V_{tanque} : Volumen del O_2 líquido(m^3).
- ρ_{mezcla} : Densidad del O_2 líquido(kg/m^3).

$$M_{\text{tanque en op.}} = 23788.21 \text{ kg} + 123 \text{ m}^3 \cdot 1141 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 166479.48 \text{ kg}$$

En toneladas:

$$M_{\text{tanque en op.}} = 166.48 \text{ Tn}$$

- **Venteo de emergencia**

MIE APQ-1

Área húmeda

$$A_h = 2\pi r \cdot h = 2\pi \cdot 2.5 \text{ m} \cdot 8.75 \text{ m} = 137.44 \text{ m}^2$$

Calor recibido en caso de fuego externo

$$Q_f = 139.7 \cdot F \cdot A_h^{0.82} \cdot 1000 = 139.7 \cdot 0.3 \cdot 137.44^{0.82} \cdot 1000 = 2374556.8 \frac{\text{Kj}}{\text{h}}$$

Capacidad venteo

$$C_v = \frac{4.414 \cdot Q_f}{L \cdot \sqrt{PM_p}} = \frac{4.414 \cdot 2374556.8 \frac{\text{Kj}}{\text{h}}}{316.07 \frac{\text{Kj}}{\text{kg}} \cdot \sqrt{32.05 \text{ u.m.a}}} = 5857.6 \text{ m}^3$$

- Diseño del parque de tanques

APQ-1

$$D_t = \frac{\sum \emptyset_t}{2} = \frac{5\text{m}}{2} = 2.5\text{m}$$

Reducción por aplicación de 1 medida de protección nivel 2=0.8 (inertización).

$$D_{tp} = D_t \cdot 0.8 = 2.5\text{m} \cdot 0.8 = 2\text{m}$$

- Cubeto

Longitud cubeto

$$L_{cu} = n_{tf} \cdot \emptyset_t + D_t + 1 \cdot D_{tp} = 2 \cdot 5\text{m} + 2\text{m} + 1 \cdot 2.5\text{m} = 14.5\text{m}$$

Anchura cubeto

$$W_{cu} = n_t \cdot \emptyset_t + 2 \cdot D_{tp} = 1 \cdot 5\text{m} + 2 \cdot 2\text{m} = 9 \text{ m}$$

Área cubeto

Siendo la altura mínima del cubeto de un metro. Calculamos el área del cubeto según la ecuación:

$$V_{cu} = V_{pe} = W_{cu} \cdot L_{cu} \cdot h_{cu}$$

$$V_{cu} = 14.5 \cdot 9 \cdot 1 = 130.5 \text{ m}^3$$

- **Distancia Vallado**

Según el MIE APQ10, siendo clase D por tener un volumen que está entre 60 y 200 m³.

Cuadro II.1: 3.2 Clase D. Vallado=20m

- **Protección contra incendios**

Según el artículo 6 del reglamento MIE APQ-10, al ser un depósitos de tamaño superior a 60.000 litros (grupos D, E y F) se deberá colocar una toma de agua con capacidad de 3 l/min/m² del depósito y que no sólo llegue al depósito protegido, sino también a los adyacentes situados a menos de 10 metros.

11.1.4. Diseño Tanques de Etileno

Para el diseño de tanques de etileno se ha un tanque criogénico, con las mismas condiciones para el diseño de este, aunque su temperatura es de -60°C y su presión de 8 bares.

- **Volumen**

Suponiendo un tiempo de residencia de 48h tenemos que el volumen del tanque será de:

$$V = \frac{Q_m \cdot \tau}{\rho} = \frac{3462.17 \text{ Kg/h} \cdot 48 \text{ h}}{577 \text{ Kg/m}^3} = 288.01 \text{ m}^3$$

- **Sobredimensionado**

$$V_s = V \cdot 1.15 = 288.01 \text{ m}^3 \cdot 1.15 = 331.51 \cong 332 \text{ m}^3$$

- **Número y volumen de los tanques**

Tenemos 3 tanques cuyo volumen será de:

$$V_t = \frac{V_s}{\text{nº tanques}} = \frac{332 \text{ m}^3}{2} = 166 \text{ m}^3$$

- **Diámetro y altura de los tanques**

A partir de esta expresión se obtendrá el diámetro y posteriormente la altura:

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

- Relación entre altura (H) y diámetro (D) del tanque:

$$\frac{H}{D} = 1.75$$

Cálculo del diámetro a partir de la ecuación:

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot V_{\text{tanque}}}{2 \cdot \pi}}$$

Se sustituyen los valores:

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 166 \text{ m}^3}{2 \cdot \pi}} = 4.95 \text{ m}$$

A partir de la relación mencionada, se obtiene la altura del tanque:

$$H = 1.75 \cdot 4.95 \text{ m} = 8.65 \text{ m}$$

Una vez obtenidos los valores de las dimensiones del cuerpo cilíndrico del tanque, estos se normalizan para que sean unas medidas estándar fácil de obtener y económicamente más viable. Se fijan las siguientes medidas:

Altura = 8.75 m, Diámetro = 5 m

A partir del dimensionamiento del tanque y las medidas estándar se vuelve a calcular el volumen del tanque, siendo este el volumen real al cual se diseñará:

$$V_{\text{tanque,real}} = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot H$$

Dónde:

- $V_{\text{tanque,real}}$: Volumen real del tanque (m^3).

- D: Diámetro del tanque (m).
- H: Altura del tanque (m).

$$V_{\text{tanque,real}} = \frac{\pi}{4} \cdot (5 \text{ m})^2 \cdot (8.75 \text{ m}) = 171.8 \text{ m}^3$$

Seguidamente, se calcula el porcentaje de ocupación de la mezcla en el tanque de la siguiente manera:

$$\% \text{ Volumen ocupado} = \frac{\frac{V_{\text{mezcla}}}{N^{\circ} \text{ tanques}}}{V_{\text{tanque,real}}} \cdot 100$$

Dónde:

- V_{mezcla} : Volumen de la mezcla (m^3).
- N° tanques: Número de tanques (1).
- $V_{\text{tanque,real}}$: Volumen real del tanque (m^3).

$$\% \text{ Volumen ocupado} = \frac{\frac{288.014 \text{ m}^3}{2}}{171.3 \text{ m}^3} \cdot 100 = 83.9 \%$$

- Presión de diseño

$$P_{\text{diseño,1}} = 1.15 \cdot P_{\text{operación}}$$

Dónde:

- $P_{\text{operación}}$: Presión de operación (8000 kPa = 8 bar)

$$P_{\text{diseño,1}} = 1.15 \cdot 8 \text{ bar} = 9.2 \text{ bar}$$

- Temperatura de diseño

La temperatura de diseño se establece 20°C por encima de la temperatura de operación del tanque, en este caso, como la temperatura es negativa se establece 20°C por debajo de la temperatura de operación.

$$T_{\text{diseño}} = T_{\text{operación}} + 20 \text{ °C}$$

Dónde:

- $T_{operación}$: Temperatura de operación del tanque (150°C)

$$T_{diseño} = -60°C - 20°C = -80°C$$

- **Espesor de los cabezales**

$$t_{cab.} = \frac{P_t \cdot L \cdot M}{2 \cdot S \cdot E - 0.2 \cdot P_t} + C.A.$$

Dónde:

- $t_{cab.}$: Espesor de los cabezales (mm)
- P_{tanque} : Presión interna del tanque (bar)
- L : Diámetro interno del tanque (mm)
- M : Factor que depende de la relación L/r
- S : Esfuerzo del material (bar)
- E : Factor de soldadura (0.85)
- C.A.: Tolerancia de corrosión (2 mm)

Se sustituyen los valores en la ecuación:

$$t_{cab.} = \frac{9.2 \text{ bar} \cdot 5000 \text{ mm} \cdot 1.54}{2 \cdot 1079.03 \text{ bar} \cdot 0.85 - 0.2 \cdot 9.2 \text{ bar}} + 2 \text{ mm} = 16.3 \text{ mm}$$

Además, se le suma una tolerancia de fabricación del 10% al espesor de cabezal. De esta manera el espesor será:

$$t_{cab.} = 1.10 \cdot 16.30 \text{ mm} = 17.8 \text{ mm}$$

El valor del espesor del cabezal será de **18 mm**.

A partir del valor del espesor de los cabezales y mediante la siguiente ecuación se puede calcular el diámetro externo del cabezal.

$$D_{ext,cab.} = D_{int,cab.} + 2 \cdot t_{cab.}$$

Dónde:

- $D_{ext, cab.}$: Diámetro externo del cabezal (mm).
- $D_{int, cab.}$: Diámetro interno del cabezal (mm).

- t_{cab} : Espesor del cabezal (mm).

Sustitución de valores:

$$D_{ext,cab} = 5000 \text{ mm} + 2 \cdot 18 \text{ mm} = 5036 \text{ mm} = 5.036 \text{ m}$$

- **Espesor del cilindro**

De la misma manera que para el espesor de los cabezales se procede para calcular el espesor del cilindro siguiendo el código ASME.

Se utiliza la siguiente ecuación para el cálculo del espesor del cuerpo cilíndrico:

$$t_c = \frac{P_c \cdot R_{int,c}}{S \cdot E - 0,6 \cdot P_c} + \text{C. A.}$$

Dónde:

- t_c : Espesor del cilindro (mm).
- P_c : Presión interna del cilindro (atm).
- $R_{int,c}$: Radio interno del cilindro (mm).
- S : Esfuerzo del material (bar).
- E : Factor de soldadura (0.85).
- C.A.: Tolerancia de corrosión (2 mm).

$$t_c = \frac{9.2 \text{ bar} \cdot 2500 \text{ mm}}{1079.03 \text{ bar} \cdot 0.85 - 0.6 \cdot 9.2 \text{ bar}} + 2 \text{ mm} = 16.7 \text{ mm}$$

El espesor del cilindro es de 16.7 mm, pero debido a los espesores estándar de chapa en Europa se elige un valor de espesor del tanque de 17mm.

Para que el diseño, montaje y mantenimiento sea más fácil y con el objetivo de aminorar costes se decide utilizar un mismo grosor de chapa para todo el diseño, utilizando el espesor más grande entre el cabezal y el cilindro, un valor de 18mm.

Una vez conocido el espesor que se usará para el diseño de todo el equipo, se determina el diámetro externo del tanque comprobando que se corresponde con el diámetro externo del cabezal con la misma expresión anterior:

$$D_{ext,tanque} = D_{tanque} + 2 \cdot t_c$$

Dónde:

D_{ext}, tanque: Diámetro externo del tanque (m).

D_{tanque}: Diámetro interno del tanque (m).

t_c: Espesor del cilindro (m).

Por lo tanto se sustituyen los valores:

$$D_{\text{ext,tanque}} = 5 \text{ m} + 2 \cdot 0.016 \text{ m} = 5.032 \text{ m}$$

- **Altura de los cabezales**

Se determina la altura de los cabezales según las ecuaciones de proporcionadas por la página web de “Koenig-co”, proveedora de cabezales.

$$DH = 0.1935 \cdot D_{\text{tanque}} - 0.455 \cdot t_{\text{cab.}}$$

$$SF = 3.5 \cdot t_{\text{cab.}}$$

$$TH = SF + DH$$

Dónde:

D_{tanque}: Diámetro interno del tanque (m).

t_{cab.}: Espesor del cabezal (m).

Se sustituyen los valores en las ecuaciones:

$$DH = 0.1935 \cdot 5000 \text{ mm} - 0.455 \cdot 16 \text{ mm} = 0.95 \text{ m}$$

$$SF = 3.5 \cdot 16 \text{ mm} = 0.061 \text{ m}$$

$$TH = 0.95 \text{ m} + 0.061 = 1.02 \text{ m}$$

Se obtiene una altura de los cabezales de **1.02 m**.

- **Altura del tanque**

Se procede a calcular la altura del tanque a partir de la siguiente ecuación:

$$H_{\text{Total}} = H + 2 \cdot H_{\text{cab.}}$$

Dónde:

- H_{Total} : Altura total del tanque (m).
- H : Altura del tanque (m).
- $H_{\text{cab.}}$: Altura del cabezal (m).

Se obtiene la altura total del tanque:

$$H_{\text{Total}} = 8.75 \text{ m} + 2 \cdot 1.02 \text{ m} = 10.8 \text{ m}$$

- **Peso del tanque**

Peso del tanque vacío

Se ha de conocer el volumen del tanque para poder calcular el peso en vacío. Por eso, primero se calcula el volumen de los cabezales de la siguiente manera:

→ Cálculo del volumen interno del cabezal:

$$V_{\text{int,cab.}} = 0.1 \cdot (D_{\text{tanque}})^3$$

Dónde:

- $V_{\text{int,cab.}}$: Volumen interior del cabezal (m^3)
- D_{tanque} : Diámetro interno del tanque (m)

$$V_{\text{int,cab.}} = 0.1 \cdot (5 \text{ m})^3 = 12.5 \text{ m}^3$$

→ Se calcula el volumen externo de los cabezales:

$$V_{\text{ext,cab.}} = 0.1 \cdot (D_{\text{tanque}} + t_{\text{cab.}})^3$$

Dónde:

- $V_{\text{ext, cab.}}$: Volumen exterior del cabezal (m^3).
- D_{tanque} : Diámetro interno del tanque (m).
- $t_{\text{cab.}}$: Espesor del cabezal (m).

$$V_{\text{ext,cab.}} = 0.1 \cdot (5 \text{ m} + 0.016 \text{ m})^3 = 12.77 \text{ m}^3$$

La diferencia de estos valores será el volumen que ocupa la pared del cabezal:

$$V_{\text{pared cab.}} = V_{\text{ext,cab.}} - V_{\text{int,cab.}}$$

Dónde:

- $V_{\text{paredcab.}}$: Volumen de la pared del cabezal (m^3).
- $V_{\text{ext, cab.}}$: Volumen exterior del cabezal (m^3).
- $V_{\text{int, cab.}}$: Volumen interior del cabezal (m^3).

$$V_{\text{pared cab.}} = 12.77 \text{ m}^3 - 12.5 \text{ m}^3 = 0.27 \text{ m}^3$$

De la misma manera se calcula el volumen interno del cilindro que conforma el tanque:

$$V_{\text{int,c}} = \pi \cdot \left(\frac{D_{\text{tanque}}}{2} \right)^2 \cdot H$$

Dónde:

- $V_{\text{int,c}}$: Volumen interior del cilindro (m^3)
- D_{tanque} : Diámetro interno del tanque (m)
- H : Altura del cilindro (m)

$$V_{\text{int,c}} = \pi \cdot \left(\frac{5 \text{ m}}{2} \right)^2 \cdot 8.75 \text{ m} = 171.8 \text{ m}^3$$

A continuación, se calcula también el volumen externo:

$$V_{\text{ext,c}} = \pi \cdot \left(\frac{D_{\text{ext,tanque}}}{2} \right)^2 \cdot H$$

Dónde:

- $V_{\text{ext,c}}$: Volumen exterior del cilindro (m^3)
- $D_{\text{ext,tanque}}$: Diámetro interno del tanque (m)
- H : Altura del cilindro (m)

$$V_{\text{ext,c}} = \pi \cdot \left(\frac{5.032 \text{ m}}{2} \right)^2 \cdot 8.75 \text{ m} = 174.28 \text{ m}^3$$

La diferencia entre estos dos volúmenes es el volumen de la pared del cilindro:

$$V_{\text{pared cil.}} = V_{\text{ext,cil.}} - V_{\text{int,cil.}}$$

Dónde:

- $V_{\text{pared cil.}}$: Volumen de la pared del cilindro (m^3).
- $V_{\text{ext,cil.}}$: Volumen exterior del cilindro (m^3).
- $V_{\text{int,cil.}}$: Volumen interior del cilindro (m^3).

Los valores en la ecuación:

$$V_{\text{pared cil.}} = 174.28 \text{ m}^3 - 171.8 \text{ m}^3 = 2.48 \text{ m}^3$$

A continuación se calcula el volumen de la pared del equipo, mediante la siguiente expresión:

$$V_{\text{pared tanque}} = V_{\text{pared,cil.}} + 2 \cdot V_{\text{pared,cab.}}$$

Dónde:

- $V_{\text{pared tanque}}$: Volumen de la pared del tanque (m^3).
- $V_{\text{pared,cil.}}$: Volumen pared del cilindro (m^3).
- $V_{\text{pared,cab.}}$: Volumen pared del cabezal (m^3).

$$V_{\text{pared tanque}} = 2.48 \text{ m}^3 + 2 \cdot 0.27 \text{ m}^3 = 3.02 \text{ m}^3$$

Se obtiene el peso del tanque en vacío a partir de la densidad del acero que es de 7850 kg/m^3 , de la siguiente manera:

$$M_{\text{tanque vacío}} = 1.1 \cdot V_{\text{pared tanque}} \cdot \rho_{\text{acero inox.}}$$

Dónde:

- $M_{\text{tanque vacío}}$: Peso del equipo lleno de agua (kg).
- $V_{\text{pared tanque}}$: Volumen de la pared del tanque (m^3).
- $\rho_{\text{acero inox.}}$: Densidad del acero inoxidable AISI 316L (kg/m^3).

$$M_{\text{tanque vacío}} = 1.1 \cdot 3.02 \text{m}^3 \cdot 7850 \text{ kg/m}^3 = 26136.5 \text{ kg}$$

En toneladas:

$$M_{\text{tanque vacío}} = 26.13 \text{ Tn}$$

Peso del tanque lleno de agua

Para conocer el peso del tanque lleno de agua a modo de prueba, se calcula el volumen del tanque de la siguiente manera:

$$V_{\text{tanque}} = V_{\text{int,c}} + 2 \cdot V_{\text{int,cab.}}$$

Dónde:

- V_{tanque} : Volumen del tanque (m^3).
- $V_{\text{int,c.}}$: Volumen interior del cilindro (m^3).
- $V_{\text{int,cab.}}$: Volumen interior del cabezal (m^3).

$$V_{\text{tanque}} = 171.8 \text{ m}^3 + 2 \cdot 12.5 \text{ m}^3 = 196.8 \text{ m}^3$$

A continuación, se calcula el peso del tanque con agua:

$$M_{\text{tanque con agua}} = M_{\text{tanque vacío}} + V_{\text{tanque}} \cdot \rho_{\text{agua}}$$

Dónde:

- $M_{\text{tanque con agua}}$: Peso del equipo lleno de agua (kg).
- $M_{\text{tanque vacío}}$: Masa total del equipo vacío (kg).
- V_{tanque} : Volumen del tanque (m^3).
- ρ_{agua} : Densidad del agua (kg/m^3).

$$M_{\text{tanque con agua}} = 26136.5 \text{ kg} + 196.8 \text{ m}^3 \cdot 1000 \text{ kg/m}^3 = 222942.33 \text{ Kg}$$

En toneladas:

$$M_{\text{tanque con agua}} = 222.94 \text{ Tn}$$

Peso del tanque en operación

Se procede a calcular el peso del tanque en operación, teniendo en cuenta la densidad del fluido y el volumen del tanque.

$$M_{\text{tanque en op.}} = M_{\text{tanque vacío}} + V_{\text{tanque}} \cdot \rho_{\text{mezcla}}$$

Dónde:

- $M_{\text{tanque en op.}}$: Peso del equipo en operación (kg).
- $M_{\text{tanque vacío}}$: Masa total del tanque vacío (kg).
- V_{tanque} : Volumen del O₂ líquido(m³).
- ρ_{mezcla} : Densidad del O₂ líquido(kg/m³).

$$M_{\text{tanque en op.}} = 26136.5 \text{ kg} + 144\text{m}^3 \cdot 577 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 192321 \text{ kg}$$

En toneladas:

$$M_{\text{tanque en op.}} = 192.321 \text{ Tn}$$

- **Venteo de emergencia**

MIE APQ-1

Área húmeda

$$A_h = 2\pi r \cdot h = 2\pi \cdot 2.5\text{m} \cdot 8.75\text{m} = 137.44 \text{ m}^2$$

Calor recibido en caso de fuego externo

$$Q_f = 139.7 \cdot F \cdot A_h^{0.82} \cdot 1000 = 139.7 \cdot 0.3 \cdot 137.44^{0.82} \cdot 1000 = 2374556.8 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}$$

Capacidad venteo

$$C_v = \frac{4.414 \cdot Q_f}{L \cdot \sqrt{PM_p}} = \frac{4.414 \cdot 2374556.8 \frac{\text{Kj}}{\text{h}}}{316.07 \frac{\text{Kj}}{\text{kg}} \cdot \sqrt{28.05 \text{ u. m. a}}} = 6261.31 \text{ m}^3$$

- **Diseño del parque de tanques**

APQ-1

$$D_t = \frac{\sum \phi_t}{2} = \frac{5m}{2} = 2.5m$$

Reducción por aplicación de 1 medida de protección nivel 2=0.8 (inertización).

$$D_{tp} = D_t \cdot 0.8 = 2.5m \cdot 0.8 = 2m$$

- **Cubeto**

Longitud cubeto

$$L_{cu} = n_{tf} \cdot \phi_t + D_t + 1 \cdot D_{tp} = 2 \cdot 5m + 2m + 1 \cdot 2.5m = 14.5m$$

Anchura cubeto

$$W_{cu} = n_t \cdot \phi_t + 2 \cdot D_{tp} = 1 \cdot 5m + 2 \cdot 2m = 9m$$

Área cubeto

Siendo la altura mínima del cubeto de un metro. Calculamos el área del cubeto según la ecuación:

$$V_{cu} = V_{pe} = W_{cu} \cdot L_{cu} \cdot h_{cu}$$

$$V_{cu} = 14.5 \cdot 9 \cdot 1 = 130.5m^3$$

- **Distancia Vallado**

Según el MIE APQ10, siendo clase D por tener un volumen que está entre 60 y 200 m³.

Cuadro II.1: 3.2 Clase D. Vallado=20 m.

- **Protección contra incendios**

Según el artículo 6 del reglamento MIE APQ-10, al ser un depósitos de tamaño superior a 60.000 litros (grupos D, E y F) se deberá colocar una toma de agua con

capacidad de 3 l/min/m² del depósito y que no sólo llegue al depósito protegido, sino también a los adyacentes situados a menos de 10 metros.

11.1.5. Diseño Tanques de VAM

Para el diseño de tanques de VAM se ha usado AISI 304 con una forma cilíndrica y en cono, ya que era la más adecuada para sus condiciones.

- **Volumen**

Suponiendo un tiempo de residencia de 48h tenemos que el volumen del tanque será de:

$$V = \frac{Q_m \cdot \tau}{\rho} = \frac{9696.44 \text{ Kg/h} \cdot 48 \text{ h}}{934 \text{ Kg/m}^3} = 498.32 \text{ m}^3$$

- **Sobredimensionado**

$$V_s = V \cdot 1.15 = 398.32 \text{ m}^3 \cdot 1.15 = 573.06 \cong 573 \text{ m}^3$$

- **Número y volumen de los tanques**

Tenemos 3 tanques cuyo volumen será de:

$$V_t = \frac{V_s}{n^{\text{tanques}}} = \frac{573 \text{ m}^3}{3} = 191 \text{ m}^3$$

- **Diámetro interno tanque**

$$h \geq 1.75r$$

$$V_t = \pi r^2 h = \pi r^2 \cdot (1.75r)$$

$$r = 2.6 \text{ m}$$

$$D_i = 2r = 5.2 \text{ m}$$

- **Altura cilindro**

$$h = 1.75D_i = 9.1 \text{ m}$$

- **Volumen cilindro**

$$V_c = \pi r^2 h = \pi \cdot (2.25\text{m})^2 \cdot 7.875\text{m} = 193.26 \text{ m}^3$$

- **Ocupación VAM en el tanque**

$$\% \text{ ocupado} = \frac{\frac{V}{\text{nº tanques}}}{V_c} \cdot 100 = \frac{498.32 \text{ m}^3 / 3}{193.26 \text{ m}^3} \cdot 100 = 85.95\%$$

- **Presión compuesto**

$$h_l = \frac{\frac{V}{\text{nº tanques}}}{\pi \cdot (\frac{D_i}{2})^2} = \frac{\frac{498.32 \text{ m}^3}{3}}{\pi \cdot (\frac{5.2}{2} \text{ m})^2} = 7.82 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} \Delta P = \rho \cdot g \cdot h_l &= 934 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 7.81 \text{m} = 71664.59 \frac{\text{Kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2} \\ &= 71664.59 \text{ Pa} = 66974.10 \text{ Pa} \cdot \frac{1 \text{ atm}}{101325 \text{ Pa}} = 0.70 \text{ atm} \end{aligned}$$

- **Presión de diseño teórica**

$$P_t = \Delta P + P_c + P_{\text{atm}} = (0.70 + 1 + 1) \text{ atm} = 2.7 \text{ atm}$$

- **Presión de diseño interna**

$$P_d = P_t \cdot 1.15 = 2.7 \text{ atm} \cdot 1.15 = 3.11 \text{ atm}$$

- **Presión externa**

$$P_e = 1 \text{ atm}$$

- **Temperatura de diseño**

$$T_d = T_t + 20^\circ\text{C} = 40^\circ\text{C}$$

- **Espesor del tanque**

$$\tau = \frac{P_d \cdot r}{S \cdot E - 0.6 \cdot P_d} + C_1 + C_2$$

$$\tau = \frac{3.11 \text{ atm} \cdot \frac{14.7 \text{ psi}}{1 \text{ atm}} \cdot 2.6 \text{ m}}{(85000 \text{ psi} \cdot 0.85 - 0.6 \cdot 3.11 \text{ atm} \cdot \frac{14.7 \text{ psi}}{1 \text{ atm}})} + 0.001 \text{ m} + 0.0018 \text{ m} = 0.0045 \text{ m}$$

$$\tau = 4.5 \text{ mm}$$

- **Fondo superior**

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{P_d \cdot D}{\cos \alpha \cdot (S \cdot E - 0.6 \cdot P_d)} \\ \alpha &= \cos^{-1} \left(\frac{h}{\sqrt{h^2 + r^2}} \right) = \cos^{-1} \left(\frac{0.8}{\sqrt{1^2 + 5.2^2}} \right) = 69.88^\circ \\ \tau &= \frac{3.11 \text{ atm} \cdot \frac{14.7 \text{ psi}}{1 \text{ atm}} \cdot 4.5 \text{ m}}{\cos 69.88^\circ \cdot (85000 \text{ psi} \cdot 0.85 - 0.6 \cdot 3.11 \text{ atm} \cdot \frac{14.7 \text{ psi}}{1 \text{ atm}})} = 0.0046 \text{ m} \cong 5 \text{ mm} \end{aligned}$$

- **Fondo inferior**

$$\tau = \frac{2.6 \cdot D(h_l - 1)G}{S} + C_1 = \frac{2.6 \cdot 5.2 \text{ m} (7.82 - 1) 9.8}{200 \text{ MPa}} + 0.001 = 0.0051 \text{ m} \cong 5 \text{ mm}$$

- **Venteo de emergencia**

MIE APQ-1

Área húmeda

$$A_h = 2\pi r \cdot h = 2\pi \cdot 2.6 \text{ m} \cdot 9.1 \text{ m} = 148.66 \text{ m}^2$$

Calor recibido en caso de fuego externo

$$Q_f = 139.7 \cdot F \cdot A_h^{0.82} \cdot 1000 = 139.7 \cdot 0.3 \cdot 148.66^{0.82} \cdot 1000 = 2532312 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}$$

Capacidad venteo

$$C_v = \frac{4.414 \cdot Q_f}{L \cdot \sqrt{PM_p}} = \frac{4.414 \cdot 2532312 \frac{\text{Kj}}{\text{h}}}{316.07 \frac{\text{Kj}}{\text{kg}} \cdot \sqrt{86.09 \text{ u. m. a}}} = 3811.44 \text{m}^3 \cong 3811 \text{m}^3$$

- Peso Cilindro

$$P_c = (V_{\text{ext}} - V_{\text{int}}) \cdot \rho_{\text{AISI304}}$$

$$D_e = D_i + 2\tau = 5.2\text{m} + (0.005 \cdot 2)\text{m} = 5.21\text{m}$$

$$P_c = \left(\left(\frac{D_e^2}{2} - \frac{D_i^2}{2} \right) \cdot \pi h \right) \rho_{\text{AISI304}} = \left(\left(\frac{5.21\text{m}}{2} \right)^2 - \left(\frac{5.2\text{m}}{2} \right)^2 \right) \cdot \pi \cdot 9.1 \cdot 7930 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} = 5900 \text{ kg}$$

- Peso Fondo

$$P_f = \left(\pi \cdot \left(\frac{D_e}{2} \right)^2 \cdot \tau \right) \rho_{\text{AISI304}} = \left(\pi \cdot \left(\frac{5.21\text{m}}{2} \right)^2 \cdot 0.005\text{m} \right) \cdot 7930 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} = 845.3 \text{ kg}$$

- Peso Fondo superior

$$D_{\text{efs}} = D_i + 2\tau = 5.2\text{m} + (0.005 \cdot 2)\text{m} = 5.21\text{m}$$

$$r_{\text{efs}} = \frac{D_{\text{efs}}}{2} = \frac{5.21}{2} \text{m} = 2.605\text{m}$$

$$h_{\text{efs}} = h_{\text{fs}} + \tau = 0.8\text{m} + 0.005\text{m} = 0.805\text{m}$$

$$P_{\text{fs}} = \left(\frac{\pi \cdot r_{\text{efs}}^2 \cdot h_{\text{efs}}}{3} - \frac{\pi \cdot r_{\text{ifs}}^2 \cdot h_{\text{efs}}}{3} \right) \cdot \rho_{\text{AISI3304}} \\ = \left(\frac{\pi \cdot 5.21\text{m}^2 \cdot 0.805}{3} - \frac{\pi \cdot 5.2\text{m}^2 \cdot 0.8\text{m}}{3} \right) \cdot 7930 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} = 518.7 \text{ Kg}$$

- Peso Equipo

$$P_e = P_c + P_f + P_{\text{fs}} = 5900 \text{ Kg} + 845.3 \text{ Kg} + 518.7 \text{ Kg} = 7264 \text{ Kg}$$

- Peso Equipo en Operación

$$P_{\text{op}} = P_e + V_t \cdot \rho_{\text{vam}} = 7264 \text{ Kg} + \frac{498.32}{3} \text{m}^3 \cdot 934 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} = 162407 \text{ Kg} = 162.4 \text{ Tn}$$

- **Resistencia Terreno**

$$\frac{P_{op}}{A_{eq}} = \frac{162407}{\pi \cdot \left(\frac{5.21}{2} m\right)^2 \cdot \frac{10000cm^2}{1m^2}} = 0.76 \frac{kg}{cm^2}$$

- **Diseño del parque de tanques**

APQ-1

$$D_t = 0.5 \cdot \emptyset_t = 0.5 \cdot 5.2m = 2.6m$$

Reducción por aplicación de 1 medida de protección nivel 2=0.8 (inertización).

$$D_{tp} = D_t \cdot 0.8 = 2.6m \cdot 0.8 = 2.08m$$

- **Cubeto**

Longitud cubeto

$$L_{cu} = n_{tf} \cdot \emptyset_t + D_t + 1 \cdot D_{tp} = 3 \cdot 5.2m + 2.6m + 1 \cdot 2.08m = 20.28m$$

Anchura cubeto

$$W_{cu} = n_t \cdot \emptyset_t + D_{tp} = 1 \cdot 5.2m + 2.08m = 7.28m$$

Altura cubeto

$$V_{cu} = V_l = W_{cu} \cdot L_{cu} \cdot h_{cu}$$

$$166.1m^3 = 7.28m \cdot 20.28m \cdot h_{cu}$$

$$h_{cu} = 1.12m$$

- **Distancia Vallado**

MIE APQ-001

Cuadro II.1: 3.2 Clase B. Vallado=20m

Cuadro II.2: Coeficiente reducción por almacenamiento=0.5

Cuadro II.4: Reducciones de las distancias entre instalaciones fijas de superficie por protecciones adicionales Nivel 2.1 =0.5

$$\text{Distancia Vallado} = 20m \cdot 0.5 \cdot 0.5 = 5m$$

11.2. DISEÑO DE TANQUES PULMÓN

11.2.1. Tanque pulmón TP-201

Para el buen funcionamiento del reactor se introduce un tanque pulmón a la salida de este, para controlar la recirculación y a la vez, será de gran utilidad para la puesta en marcha.

11.2.1.1. Diseño funcional

La planta se encuentra operando en continuo. por lo tanto. para asegurar la mezcla en el tanque se supone un tiempo de mezcla de 36 s (0.01 h), siendo este no muy elevado porque se trata de fase vapor. Se procede a calcular el volumen de mezcla en el tanque según la siguiente ecuación:

$$V_{mezcla} = Q_v \cdot t_{mezcla}$$

Dónde:

- V_{fluido} : Volumen del fluido en el tanque (m^3)
- Q_v : Caudal volumétrico (m^3/h)
- t_{mezcla} : tiempo de mezcla (h)

$$V_{mezcla} = \left(84645.081 \frac{kg}{h} \cdot \frac{m^3}{11.25 kg} \right) \cdot 0.01 h = 75.24 m^3$$

Aunque el contenido del tanque sea gas. se deja un espacio de un 15% del volumen de total para que debido a la presión no se produzcan roturas en el tanque. A partir de la siguiente ecuación, se calcula el volumen mínimo del tanque teniendo en cuenta el espacio que se ha de dejar como medida de seguridad.

$$V_{tanque} = \frac{V_{fluido}}{(1 - 0.15)}$$

Dónde:

- V_{tanque} : Volumen del tanque mínimo (m^3).

Se sustituyen los valores en la anterior ecuación:

$$V_{tanque} = \frac{75.24 m^3}{(1 - 0.15)} = 88.51 m^3$$

Se obtiene un volumen mínimo del tanque de mezcla de **88.51 m³**.

11.2.1.2. Dimensionamiento

Obtenido el valor mínimo del tanque se determinan las dimensiones del tanque a partir de la normativa API 650. Este dimensionado será de la parte cilíndrica del tanque teniendo en cuenta la siguiente ecuación y relación entre altura y diámetro.

A partir de esta expresión se obtendrá el diámetro y posteriormente la altura:

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

- Relación entre altura (H) y diámetro (D) del tanque:

$$\frac{H}{D} = 2$$

Cálculo del diámetro a partir de la ecuación:

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot V_{\text{tanque}}}{2 \cdot \pi}}$$

Se sustituyen los valores:

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 88.51 \text{ m}^3}{2 \cdot \pi}} = 3.84 \text{ m}$$

A partir de la relación mencionada, se obtiene la altura del tanque:

$$H = 2 \cdot 3.84 \text{ m} = 7.68 \text{ m}$$

Una vez obtenidos los valores de las dimensiones del cuerpo cilíndrico del tanque, estos se normalizan para que sean unas medidas estándar fácil de obtener y económicamente más viable. Se fijan las siguientes medidas:

Altura = 8 m, Diámetro = 4 m

A partir del dimensionamiento del tanque y las medidas estándar se vuelve a calcular el volumen del tanque, siendo este el volumen real al cual se diseñará:

$$V_{\text{tanque.real}} = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot H$$

Dónde:

- $V_{\text{tanque.real}}$: Volumen real del tanque (m^3).
- D: Diámetro del tanque (m).
- H: Altura del tanque (m).

$$V_{\text{tanque.real}} = \frac{\pi}{4} \cdot (4 \text{ m})^2 \cdot (8 \text{ m}) = 100.53 \text{ m}^3$$

Seguidamente, se calcula el porcentaje de ocupación del fluido en el tanque de la siguiente manera:

$$\% \text{ Volumen ocupado} = \frac{\frac{V_{\text{mezcla}}}{N^{\circ} \text{ tanques}}}{V_{\text{tanque.real}}} \cdot 100$$

Dónde:

- V_{mezcla} : Volumen de la mezcla (m^3).
- N° tanques: Número de tanques (1).
- $V_{\text{tanque.real}}$: Volumen real del tanque (m^3).

$$\% \text{ Volumen ocupado} = \frac{\frac{75.24 \text{ m}^3}{1}}{100.53 \text{ m}^3} \cdot 100 = 74.9 \%$$

11.2.1.3. Diseño mecánico

A continuación, se procede con el diseño mecánico del tanque de mezcla. de la misma manera que para el diseño del tanque de mezcla TP-201, según el código ASME.

Para determinar el material adecuado para el diseño del tanque se ha de tener en cuenta las propiedades del fluido. Los compuestos pueden producir corrosión, por lo tanto, será necesario que el material sea resistente. Se elige el acero inoxidable AISI 316L .

Seguidamente es importante conocer la presión y temperatura de diseño.

Presión de diseño

Para el cálculo de la presión de diseño se utilizan las siguientes ecuaciones y se escogerá el valor de presión más alto.

$$P_{\text{diseño.1}} = 1.1 \cdot P_{\text{operación}}$$

$$P_{\text{diseño.2}} = P_{\text{operación}} + 2 \text{ bar}$$

Dónde:

- Poperación : Presión de operación (1010 kPa = 10.1 bar)

$$P_{\text{diseño.1}} = 1.1 \cdot 10 \text{ bar} = 11 \text{ bar}$$

$$P_{\text{diseño.2}} = 10 \text{ bar} + 2 \text{ bar} = 12 \text{ bar}$$

La presión de diseño mayor es la 2. por lo tanto, para el diseño se utilizará una presión de $12 \cong 12 \text{ atm}$.

Temperatura de diseño

La temperatura de diseño se establece 20°C por encima de la temperatura de operación del tanque.

$$T_{\text{diseño}} = T_{\text{operación}} + 20 \text{ °C}$$

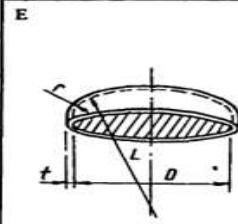
Dónde:

- Toperación: Temperatura de operación del tanque (150°C)

$$T_{\text{diseño}} = 150 \text{ °C} + 20 \text{ °C} = 164.5 \text{ °C}$$

Espesor de los cabezales

Como se ha mencionado antes se calculará a partir del código ASME. La siguiente figura muestra los parámetros para el cálculo del cabezal según el código ASME.



ASME FLANGED AND DISHED HEAD (TORISPHERICAL HEAD)																	
When $\frac{L}{t} = 16 \frac{2}{3}$																	
$t = \frac{0.885PL}{SE - 0.1P}$										$P = \frac{SEt}{0.885L + 0.1t}$							
When $\frac{L}{t}$ less than $16 \frac{2}{3}$																	
$t = \frac{PLM}{2SE - 0.2P}$										$P = \frac{2SEt}{LM + 0.2t}$							
VALUES OF FACTOR "M"																	
L/t	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50	2.75	3.00	3.25	3.50	4.00	4.50	5.00	5.50	6.00	6.50
M	1.00	1.03	1.06	1.08	1.10	1.13	1.15	1.17	1.18	1.20	1.22	1.25	1.28	1.31	1.34	1.36	1.39
L/t	7.00	7.50	8.00	8.50	9.00	9.50	10.0	10.5	11.0	11.5	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	16.5	*
M	1.41	1.44	1.46	1.48	1.50	1.52	1.54	1.56	1.58	1.60	1.62	1.65	1.69	1.72	1.75	1.77	
* THE MAXIMUM ALLOWED RATIO : $L = D + 2t$ (see note 2 on facing page)																	

Figura 11.2.1. Cabezal torisférico de ASME.

Como se ha mencionado antes se calculará a partir del código ASME. Relación L/r:

$$\frac{L}{r} = \frac{4000 \text{ mm}}{400 \text{ mm}} = 10$$

Dónde:

- L : Diámetro interno del cilindro (mm) = 4000 mm
- r: $0.1 \cdot \text{Diámetro interno del cilindro (mm)} = 400 \text{ mm}$

Con el valor de la relación L/r. se puede conocer el valor de M = 1.54, que será utilizada en la siguiente ecuación para el cálculo del espesor de los cabezales del tanque.

$$t_{cab.} = \frac{P_t \cdot L \cdot M}{2 \cdot S \cdot E - 0.2 \cdot P_t} + \text{C. A.}$$

Dónde:

- tcab: Espesor de los cabezales (mm).
- Ptanque: Presión interna del tanque (bar).
- L : Diámetro interno del tanque (mm).
- M: Factor que depende de la relación L/r.
- S: Esfuerzo del material (bar).
- E: Factor de soldadura (0.85).
- C.A.: Tolerancia de corrosión (2 mm).

La temperatura de diseño de los tubos es de $164.5^{\circ}\text{C} = 328.1^{\circ}\text{F}$. Por lo tanto, corresponde a una $S = 1079.03 \text{ bar}$. según la siguiente figura.

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

Figura 11.2.2. Tensión máxima admisible en función de la temperatura para el acero inoxidable.

Se sustituyen los valores en la ecuación:

$$t_{cab.} = \frac{12 \text{ bar} \cdot 4000 \text{ mm} \cdot 1.54}{2 \cdot 1079.03 \text{ bar} \cdot 0.85 - 0.2 \cdot 12 \text{ bar}} + 2 \text{ mm} = 42.35 \text{ mm}$$

Además, se le suma una tolerancia de fabricación del 10% al espesor de cabezal. De esta manera el espesor será:

$$t_{cab.} = 1.10 \cdot 42.35 \text{ mm} = 466 \text{ mm}$$

El valor del espesor del cabezal será de **50 mm**.

A partir del valor del espesor de los cabezales y mediante la siguiente ecuación se puede calcular el diámetro externo del cabezal.

$$D_{ext.cab.} = D_{int.cab.} + 2 \cdot t_{cab.}$$

Dónde:

- Dext. cab.: Diámetro externo del cabezal (mm).
- Dint. cab.: Diámetro interno del cabezal (mm).
- tcab. : Espesor del cabezal (mm).

Sustitución de valores:

$$D_{ext.cab.} = 4000 \text{ mm} + 2 \cdot 50 \text{ mm} = 4100 \text{ mm} = 4.10 \text{ m}$$

Espesor del cilindro

De la misma manera que para el espesor de los cabezales se procede para calcular el espesor del cilindro siguiendo el código ASME, a partir de la ecuación de la siguiente figura.

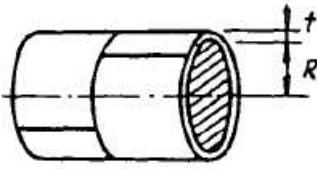
A		CYLINDRICAL SHELL (LONG SEAM) ¹	
	$t = \frac{PR}{SE - 0.6P}$	$P = \frac{SE t}{R + 0.6t}$	
1. Usually the stress in the long seam is governing. See preceding page. 2. When the wall thickness exceeds one half of the inside radius or P exceeds 0.385 SE, the formulas given in the Code UA 2 shall be applied.			

Figura 11.2.3. Espesor para el cilindro según ASME.

Se utiliza la siguiente ecuación para el cálculo del espesor del cuerpo cilíndrico:

$$t_c = \frac{P_c \cdot R_{int.c}}{S \cdot E - 0.6 \cdot P_c} + C.A.$$

Dónde:

- t_c : Espesor del cilindro (mm).
- P_c : Presión interna del cilindro (atm).
- $R_{int.c}$: Radio interno del cilindro (mm).
- S : Esfuerzo del material (bar).
- E : Factor de soldadura (0.85).
- C.A.: Tolerancia de corrosión (2 mm).

La temperatura de diseño es de $164.5^\circ\text{C} = 328.1^\circ\text{F}$, de la misma manera que en el cálculo del esfuerzo del material para el cabezal se hace para el cilindro que conforma el tanque. Por lo tanto, corresponde a una $S = 1079.03$ bar.

$$t_c = \frac{12 \text{ bar} \cdot 2000 \text{ mm}}{1079.03 \text{ bar} \cdot 0.85 - 0.6 \cdot 12 \text{ bar}} + 2 \text{ mm} = 28.59 \text{ mm}$$

El espesor del cilindro es de 28.59 mm, pero debido a los espesores estándar de chapa en Europa se elige un valor de espesor del tanque de 30 mm.

Para que el diseño, montaje y mantenimiento sea más fácil y con el objetivo de aminorar costes se decide utilizar un mismo grosor de chapa para todo el diseño, utilizando el espesor más grande entre el cabezal y el cilindro. un valor de **50 mm**.

Una vez conocido el espesor que se usará para el diseño de todo el equipo, se determina el diámetro externo del tanque comprobando que se corresponde con el diámetro externo del cabezal con la misma expresión anterior:

$$D_{ext.tanque} = D_{tanque} + 2 \cdot t_c$$

Dónde:

- $D_{ext.tanque}$: Diámetro externo del tanque (m)
- D_{tanque} : Diámetro interno del tanque (m)
- t_c : Espesor del cilindro (m)

Por lo tanto se sustituyen los valores:

$$D_{ext.tanque} = 4 \text{ m} + 2 \cdot 0.050 \text{ m} = 4.10 \text{ m}$$

Altura de los cabezales

Se determina la altura de los cabezales según las ecuaciones de proporcionadas por la página web de “Koenig-co”. proveedora de cabezales.

$$DH = 0.1935 \cdot D_{tanque} - 0.455 \cdot t_{cab.}$$

$$SF = 3.5 \cdot t_{cab.}$$

$$TH = SF + DH$$

Dónde:

- D_{tanque} : Diámetro interno del tanque (m).
- $t_{cab.}$: Espesor del cabezal (m).

Se sustituyen los valores en las ecuaciones:

$$DH = 0.1935 \cdot 4000 \text{ mm} - 0.455 \cdot 50 \text{ mm} = 751.25 \text{ mm}$$

$$SF = 3.5 \cdot 50 \text{ mm} = 175 \text{ mm}$$

$$TH = 751.25 \text{ mm} + 175 \text{ mm} = 926.25 \text{ mm} = 0.93 \text{ m}$$

Se obtiene una altura de los cabezales de **0.93 m**.

Altura del tanque

Se procede a calcular la altura del tanque a partir de la siguiente ecuación:

$$H_{Total} = H + 2 \cdot H_{cab.}$$

Dónde:

- H_{Total} : Altura total del tanque (m).
- H : Altura del tanque (m).
- $H_{cab.}$: Altura del cabezal (m).

Se obtiene la altura total del tanque:

$$H_{Total} = 8 \text{ m} + 2 \cdot 0.93 \text{ m} = 9.86 \text{ m}$$

Peso del tanque

-Peso del tanque vacío

Se ha de conocer el volumen del tanque para poder calcular el peso en vacío. Por eso, primero se calcula el volumen de los cabezales de la siguiente manera:

→ Cálculo del volumen interno del cabezal:

$$V_{\text{int.cab.}} = 0.1 \cdot (D_{\text{tanque}})^3$$

Dónde:

- $V_{\text{int.cab.}}$: Volumen interior del cabezal (m^3).
- D_{tanque} : Diámetro interno del tanque (m).

$$V_{\text{int.cab.}} = 0.1 \cdot (4 \text{ m})^3 = 6.40 \text{ m}^3$$

→ Se calcula el volumen externo de los cabezales:

$$V_{\text{ext.cab.}} = 0.1 \cdot (D_{\text{tanque}} + t_{\text{cab.}})^3$$

Dónde:

- $V_{\text{ext. cab.}}$: Volumen exterior del cabezal (m^3).
- D_{tanque} : Diámetro interno del tanque (m).
- $t_{\text{cab.}}$: Espesor del cabezal (m).
-

$$V_{\text{ext.cab.}} = 0.1 \cdot (4 \text{ m} + 0.050 \text{ m})^3 = 6.64 \text{ m}^3$$

La diferencia de estos valores será el volumen que ocupa la pared del cabezal:

$$V_{\text{pared cab.}} = V_{\text{ext.cab.}} - V_{\text{int.cab.}}$$

Dónde:

- $V_{\text{pared cab.}}$: Volumen de la pared del cabezal (m^3).
- $V_{\text{ext. cab.}}$: Volumen exterior del cabezal (m^3).
- $V_{\text{int. cab.}}$: Volumen interior del cabezal (m^3).

$$V_{\text{pared cab.}} = 6.64 \text{ m}^3 - 6.40 \text{ m}^3 = 0.24 \text{ m}^3$$

De la misma manera se calcula el volumen interno del cilindro que conforma el tanque:

$$V_{\text{int.c}} = \pi \cdot \left(\frac{D_{\text{tanque}}}{2}\right)^2 \cdot H$$

Dónde:

- $V_{\text{int.c}}$: Volumen interior del cilindro (m^3).
- D_{tanque} : Diámetro interno del tanque (m).
- H : Altura del cilindro (m).

$$V_{\text{int.c}} = \pi \cdot \left(\frac{4 \text{ m}}{2}\right)^2 \cdot 8 \text{ m} = 100.53 \text{ m}^3$$

A continuación, se calcula también el volumen externo:

$$V_{\text{ext.c}} = \pi \cdot \left(\frac{D_{\text{ext.tanque}}}{2}\right)^2 \cdot H$$

Dónde:

- $V_{\text{ext.c}}$: Volumen interior del cilindro (m^3).
- $D_{\text{ext,tanque}}$: Diámetro interno del tanque (m).
- H : Altura del cilindro (m).

$$V_{\text{ext.c}} = \pi \cdot \left(\frac{4.10 \text{ m}}{2}\right)^2 \cdot 8 \text{ m} = 105.62 \text{ m}^3$$

La diferencia entre estos dos volúmenes es el volumen de la pared del cilindro:

$$V_{\text{pared cil.}} = V_{\text{ext.cil.}} - V_{\text{int.cil.}}$$

Dónde:

- $V_{\text{pared cil.}}$: Volumen de la pared del cilindro (m^3).
- $V_{\text{ext.cil.}}$: Volumen exterior del cilindro (m^3).
- $V_{\text{int.cil.}}$: Volumen interior del cilindro (m^3).

Los valores en la ecuación:

$$V_{\text{pared cil.}} = 105.62 \text{ m}^3 - 100.53 \text{ m}^3 = 5.09 \text{ m}^3$$

A continuación se calcula el volumen de la pared del equipo, mediante la siguiente expresión:

$$V_{\text{pared tanque}} = V_{\text{pared.cil.}} + 2 \cdot V_{\text{pared.cab.}}$$

Dónde:

- $V_{\text{pared tanque}}$: Volumen de la pared del tanque (m^3).
- $V_{\text{pared. cil.}}$: Volumen pared del cilindro (m^3).
- $V_{\text{pared. cab.}}$: Volumen pared del cabezal (m^3).

$$V_{\text{pared tanque}} = 5.09 \text{ m}^3 + 2 \cdot 0.24 \text{ m}^3 = 5.57 \text{ m}^3$$

Se obtiene el peso del tanque en vacío a partir de la densidad del acero inoxidable AISI 316L que es 7960 kg/m^3 , de la siguiente manera:

$$M_{\text{tanque vacío}} = 1.1 \cdot V_{\text{pared tanque}} \cdot \rho_{\text{acero inox.}}$$

Dónde:

- $M_{\text{tanque vacío}}$: Peso del equipo lleno de agua (kg).
- $V_{\text{pared tanque}}$: Volumen de la pared del tanque (m^3).
- $\rho_{\text{acero inox.}}$: Densidad del acero inoxidable AISI 316L (kg/m^3).
-

$$M_{\text{tanque vacío}} = 1.1 \cdot 5.57 \text{ m}^3 \cdot 7960 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 48770.92 \text{ kg}$$

En toneladas:

$$M_{\text{tanque vacío}} = 48.77 \text{ Tn}$$

- Peso del tanque lleno de agua

Para conocer el peso del tanque lleno de agua a modo de prueba. se calcula el volumen del tanque de la siguiente manera:

$$V_{\text{tanque}} = V_{\text{int.c}} + 2 \cdot V_{\text{int.cab.}}$$

Dónde:

- V_{tanque} : Volumen del tanque (m^3).
- $V_{\text{int.c.}}$: Volumen interior del cilindro (m^3).
- $V_{\text{int. cab.}}$: Volumen interior del cabezal (m^3).

$$V_{\text{tanque}} = 100.53 \text{ m}^3 + 2 \cdot 6.40 \text{ m}^3 = 113.33 \text{ m}^3$$

A continuación, se calcula el peso del tanque con agua:

$$M_{\text{tanque con agua}} = M_{\text{tanque vacío}} + V_{\text{tanque}} \cdot \rho_{\text{agua}}$$

Dónde:

- $M_{\text{tanque con agua}}$: Peso del equipo lleno de agua (kg).
- $M_{\text{tanque vacío}}$: Masa total del equipo vacío (kg).
- V_{tanque} : Volumen del tanque (m^3).
- ρ_{agua} : Densidad del agua (kg/m^3).
-

$$M_{\text{tanque con agua}} = 48770.92 \text{ kg} + 113.33 \text{ m}^3 \cdot 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 162100.92 \text{ kg}$$

En toneladas:

$$M_{\text{tanque con agua}} = 162.10 \text{ Tn}$$

- Peso del tanque en operación

Se procede a calcular el peso del tanque en operación, teniendo en cuenta la densidad del fluido y el volumen del tanque.

$$M_{\text{tanque en op.}} = M_{\text{tanque vacío}} + V_{\text{tanque}} \cdot \rho_{\text{mezcla}}$$

Dónde:

- $M_{\text{tanque en op.}}$: Peso del equipo en operación (kg).
- $M_{\text{tanque vacío}}$: Masa total del tanque vacío (kg).
- V_{tanque} : Volumen del tanque (m^3).
- ρ_{mezcla} : Densidad de la mezcla (kg/m^3).

$$M_{\text{tanque en op.}} = 48770.92 \text{ kg} + 113.33 \text{ m}^3 \cdot 11.25 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 50041.35 \text{ kg}$$

En toneladas:

$$M_{\text{tanque en op.}} = 50.04 \text{ Tn}$$

11.2.1.4. Aislamiento

Hacer uso de un aislante es necesario debido a que la temperatura del tanque es 144.5 °C y se ha de usar como medida de seguridad. Para asegurar que no haya intercambio de calor con el exterior se decide aislar el equipo con una lana mineral. Por ello, se elige aislar el equipo con lana de roca.

El espesor requerido para el aislante se calcula con la siguiente ecuación:

$$X = \frac{30}{3.6 \cdot \left(\frac{\Delta T}{D_{ext.c}} \right)^{\frac{1}{4}}}$$

Dónde:

- X: Espesor del aislante (cm).
- ΔT : Diferencia de temperaturas entre el interior y exterior del reactor. siendo 20°C la temperatura media en Martorell y la temperatura en el interior del tanque es 144.5°C.
- $D_{ext.c}$: Diámetro externo del cilindro (m).

Por lo tanto.

$$X = \frac{30}{3.6 \cdot \left(\frac{150\text{ }^{\circ}\text{C} - 20\text{ }^{\circ}\text{C}}{4.10\text{ m} \cdot 100\text{ cm}} \right)^{\frac{1}{4}}} = 11.1\text{ cm}$$

El aislamiento se recubre con una capa de aluminio.

Finalmente. se necesita conocer el volumen aislante necesario para todo el equipo:

$$V_{aislante} = S_{ext.tanque} \cdot X$$

$$S_{ext.tanque} = S_{ext.c} + S_{ext.cab.}$$

Dónde:

- $V_{aislante}$: Volumen del aislante para todo el equipo (m^3).
- $S_{ext.tanque}$: Sección externa del tanque (m^2).
- X: Espesor del aislante (cm).
- $S_{ext.c}$: Sección externa del cilindro (m^2).

$$S_{ext.c} = \pi \cdot D_{ext.c} \cdot H_{tanque} = \pi \cdot 4.10\text{ m} \cdot 8\text{ m} = 103.04\text{ m}^2$$

- $S_{ext.cab.}$: Sección externa del cabezal (m^2).

$$S_{ext.cab.} = 0.931 \cdot (D_{ext.c})^2 = 0.931 \cdot (4.10\text{ m})^2 = 15.65\text{ m}^2$$

Por lo tanto:

$$S_{\text{ext.tanque}} = 103.04 \text{ m}^2 + 15.65 \text{ m}^2 = 118.61 \text{ m}^2$$

Seguidamente se obtiene el volumen del aislante necesario:

$$V_{\text{aislante}} = 118.69 \text{ m}^2 \cdot \left(11.23 \text{ cm} \cdot \frac{1 \text{ m}}{100 \text{ cm}} \right) = 13.17 \text{ m}^3$$

11.2.2. Tanque pulmón TP-401

Para asegurar el buen funcionamiento de la columna de absorción C-401, se instala un tanque pulmón para controlar el caudal de ácido acético en estado líquido, que entrará en la columna y para la puesta en marcha.

11.2.2.1. Diseño funcional

El tanque TP-401 se encuentra a una temperatura de 21 °C. El fluido dentro del tanque está en fase líquida.

La planta se encuentra operando en continuo. por lo tanto. para asegurar la mezcla en el tanque se supone un tiempo de mezcla de 10 minutos (0.167 h), siendo este no muy elevado porque se trata de fase líquida. A partir de este valor y conociendo el caudal de entrada se procede a calcular el volumen de mezcla en el tanque según la siguiente ecuación:

$$V_{\text{mezcla}} = Q_v \cdot t_{\text{mezcla}}$$

Dónde:

- V_{fluido} : Volumen del fluido en el tanque (m^3).
- Q_v : Caudal volumétrico (m^3/h).
- t_{mezcla} : tiempo de mezcla (h).
-

$$V_{\text{mezcla}} = \left(24020.68 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot \frac{\text{m}^3}{1066 \text{ kg}} \right) \cdot 0.167 \text{ h} = 3.75 \text{ m}^3$$

Aunque el contenido del tanque sea gas, se deja un espacio de un 15% del volumen de total para que debido a la presión no se produzcan roturas en el tanque. A partir de la siguiente ecuación, se calcula el volumen mínimo del tanque teniendo en cuenta el espacio que se ha de dejar como medida de seguridad.

$$V_{\text{tanque}} = \frac{V_{\text{fluido}}}{(1 - 0.15)}$$

Dónde:

- V_{tanque} : Volumen del tanque mínimo (m^3).
-

Se sustituyen los valores en la anterior ecuación:

$$V_{\text{tanque}} = \frac{3.75 \text{ m}^3}{(1 - 0.15)} = 4.41 \text{ m}^3$$

Se obtiene un volumen mínimo del tanque de mezcla de **4.41 m³**.

11.2.2.2. Dimensionamiento

Obtenido el valor mínimo del tanque se determinan las dimensiones del tanque a partir de la normativa API 650. Este dimensionado será de la parte cilíndrica del tanque teniendo en cuenta la siguiente ecuación y relación entre altura y diámetro.

A partir de esta expresión se obtendrá el diámetro y posteriormente la altura:

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

- Relación entre altura (H) y diámetro (D) del tanque:

$$\frac{H}{D} = 2$$

Cálculo del diámetro a partir de la ecuación:

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot V_{\text{tanque}}}{2 \cdot \pi}}$$

Se sustituyen los valores:

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 4.41 \text{ m}^3}{2 \cdot \pi}} = 1.41 \text{ m}$$

A partir de la relación mencionada, se obtiene la altura del tanque:

$$H = 2 \cdot 1.41 \text{ m} = 2.82 \text{ m}$$

Una vez obtenidos los valores de las dimensiones del cuerpo cilíndrico del tanque, estos se normalizan para que sean unas medidas estándar fácil de obtener y económicamente más viable. Se fijan las siguientes medidas:

Altura = 3 m, Diámetro = 1.5 m

A partir del dimensionamiento del tanque y las medidas estándar se vuelve a calcular el volumen del tanque, siendo este el volumen real al cual se diseñará:

$$V_{\text{tanque.real}} = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot H$$

Dónde:

- $V_{\text{tanque.real}}$: Volumen real del tanque (m^3).
- D : Diámetro del tanque (m).
- H : Altura del tanque (m).

$$V_{\text{tanque.real}} = \frac{\pi}{4} \cdot (1.5 \text{ m})^2 \cdot (3 \text{ m}) = 5.3 \text{ m}^3$$

Seguidamente, se calcula el porcentaje de ocupación de la mezcla en el tanque de la siguiente manera:

$$\% \text{ Volumen ocupado} = \frac{\frac{V_{\text{mezcla}}}{N^{\circ} \text{ tanques}}}{V_{\text{tanque.real}}} \cdot 100$$

Dónde:

- V_{mezcla} : Volumen de la mezcla (m^3).
- N° tanques: Número de tanques (1).
- $V_{\text{tanque.real}}$: Volumen real del tanque (m^3).

$$\% \text{ Volumen ocupado} = \frac{\frac{3.75 \text{ m}^3}{1}}{\frac{5.3 \text{ m}^3}{5.3 \text{ m}^3}} \cdot 100 = 70.81 \%$$

11.2.2.3. Diseño mecánico

A continuación, se procede con el diseño mecánico del tanque. de la misma manera que para el diseño del tanque pulmón TP-401, según el código ASME.

Para determinar el material adecuado para el diseño del tanque se ha de tener en cuenta las propiedades del fluido. Por lo tanto, será necesario que el material sea resistente. Se elige el acero inoxidable AISI 316L.

Seguidamente es importante conocer la presión y temperatura de diseño.

Presión de diseño

Para el cálculo de la presión de diseño se utilizan las siguientes ecuaciones y se escogerá el valor de presión más alto.

$$P_{\text{diseño.1}} = 1.1 \cdot P_{\text{operación}}$$

$$P_{\text{diseño.2}} = P_{\text{operación}} + 2 \text{ bar}$$

Dónde:

- Poperación : Presión de operación (800 kPa = 8 bar)

$$P_{\text{diseño.1}} = 1.1 \cdot 8 \text{ bar} = 8.8 \text{ bar}$$

$$P_{\text{diseño.2}} = 8 \text{ bar} + 2 \text{ bar} = 10 \text{ bar}$$

La presión de diseño mayor es la 2, por lo tanto, para el diseño se utilizará una presión de 10 bar $\cong 10 \text{ atm}$.

Temperatura de diseño

La temperatura de diseño se establece 20°C por encima de la temperatura de operación del tanque.

$$T_{\text{diseño}} = T_{\text{operación}} + 20 \text{ °C}$$

Dónde:

- Toperación: Temperatura de operación del tanque (150°C)

$$T_{\text{diseño}} = 21 \text{ °C} + 20 \text{ °C} = 41 \text{ °C}$$

Espesor de los cabezales

Como se ha mencionado antes se calculará a partir del código ASME.

$$t_{cab.} = \frac{P_t \cdot L \cdot M}{2 \cdot S \cdot E - 0.2 \cdot P_t} + C. A.$$

Dónde:

- $t_{cab.}$: Espesor de los cabezales (mm).
- P_t : Presión interna del tanque (bar).
- L : Diámetro interno del tanque (mm).
- M : Factor que depende de la relación L/r .
- S : Esfuerzo del material (bar).
- E : Factor de soldadura (0.85).
- C.A.: Tolerancia de corrosión (2 mm).

$$t_{cab.} = \frac{10 \text{ bar} \cdot 1500 \text{ mm} \cdot 1.54}{2 \cdot 1079.03 \text{ bar} \cdot 0.85 - 0.2 \cdot 10 \text{ bar}} + 2 \text{ mm} = 14.6 \text{ mm}$$

Además. se le suma una tolerancia de fabricación del 10% al espesor de cabezal. De esta manera el espesor será:

$$t_{cab.} = 1.10 \cdot 14.6 \text{ mm} = 16 \text{ mm}$$

El valor del espesor del cabezal será de **16 mm**.

A partir del valor del espesor de los cabezales y mediante la siguiente ecuación se puede calcular el diámetro externo del cabezal.

$$D_{ext.cab.} = D_{int.cab.} + 2 \cdot t_{cab.}$$

Dónde:

- $D_{ext. cab.}$: Diámetro externo del cabezal (mm).
- $D_{int. cab.}$: Diámetro interno del cabezal (mm).
- $t_{cab.}$: Espesor del cabezal (mm).

Sustitución de valores:

$$D_{ext.cab.} = 1500 \text{ mm} + 2 \cdot 16 \text{ mm} = 15320 \text{ mm} = 1.53 \text{ m}$$

Espesor del cilindro

De la misma manera que para el espesor de los cabezales se procede para calcular el espesor del cilindro siguiendo el código ASME, a partir de la ecuación de la siguiente:

$$t_c = \frac{P_c \cdot R_{int.c}}{S \cdot E - 0.6 \cdot P_c} + C.A.$$

Dónde:

- t_c : Espesor del cilindro (mm).
- P_c : Presión interna del cilindro (atm).
- $R_{int.c}$: Radio interno del cilindro (mm).
- S : Esfuerzo del material (bar).
- E : Factor de soldadura (0.85).
- C.A.: Tolerancia de corrosión (2 mm).

$$t_c = \frac{10 \text{ bar} \cdot 750 \text{ mm}}{1079.03 \text{ bar} \cdot 0.85 - 0.6 \cdot 12 \text{ bar}} + 2 \text{ mm} = 10.23 \text{ mm}$$

El espesor del cilindro es de 10.23 mm, pero debido a los espesores estándar de chapa en Europa se elige un valor de espesor del tanque de 11 mm.

Para que el diseño, montaje y mantenimiento sea más fácil y con el objetivo de aminorar costes se decide utilizar un mismo grosor de chapa para todo el diseño, utilizando el espesor más grande entre el cabezal y el cilindro, un valor de **16 mm**.

Una vez conocido el espesor que se usará para el diseño de todo el equipo, se determina el diámetro externo del tanque comprobando que se corresponde con el diámetro externo del cabezal con la misma expresión anterior:

$$D_{ext.tanque} = D_{tanque} + 2 \cdot t_c$$

Dónde:

$D_{ext.tanque}$: Diámetro externo del tanque (m).

D_{tanque} : Diámetro interno del tanque (m).

t_c : Espesor del cilindro (m).

Por lo tanto se sustituyen los valores:

$$D_{ext,tanque} = 4 \text{ m} + 2 \cdot 0.016 \text{ m} = 1.532 \text{ m}$$

Altura de los cabezales

Se determina la altura de los cabezales según las ecuaciones de proporcionadas por la página web de “Koenig-co”. proveedora de cabezales.

$$DH = 0.1935 \cdot D_{tanque} - 0.455 \cdot t_{cab.}$$

$$SF = 3.5 \cdot t_{cab.}$$

$$TH = SF + DH$$

Dónde:

- D_{tanque} : Diámetro interno del tanque (m).
- $t_{cab.}$: Espesor del cabezal (m).

Se sustituyen los valores en las ecuaciones:

$$DH = 0.1935 \cdot 1500 \text{ mm} - 0.455 \cdot 16 \text{ mm} = 0.283 \text{ m}$$

$$SF = 3.5 \cdot 16 \text{ mm} = 0.056 \text{ m}$$

$$TH = 0.283 \text{ m} + 0.056 \text{ m} = 0.335 \text{ m}$$

Se obtiene una altura de los cabezales de **0.33 m**.

Altura del tanque

Se procede a calcular la altura del tanque a partir de la siguiente ecuación:

$$H_{Total} = H + 2 \cdot H_{cab.}$$

Dónde:

- H_{Total} : Altura total del tanque (m).
- H : Altura del tanque (m).
- $H_{cab.}$: Altura del cabezal (m).
-

Se obtiene la altura total del tanque:

$$H_{Total} = 3 \text{ m} + 2 \cdot 0.335 \text{ m} = 3.67 \text{ m}$$

Peso del tanque

- Peso del tanque vacío

Se ha de conocer el volumen del tanque para poder calcular el peso en vacío. Por eso, primero se calcula el volumen de los cabezales de la siguiente manera:

→ Cálculo del volumen interno del cabezal:

$$V_{\text{int.cab.}} = 0.1 \cdot (D_{\text{tanque}})^3$$

Dónde:

- $V_{\text{int.cab.}}$: Volumen interior del cabezal (m^3)
- D_{tanque} : Diámetro interno del tanque (m)

$$V_{\text{int.cab.}} = 0.1 \cdot (1.5\text{m})^3 = 0.3375 \text{ m}^3$$

→ Se calcula el volumen externo de los cabezales:

$$V_{\text{ext.cab.}} = 0.1 \cdot (D_{\text{tanque}} + t_{\text{cab.}})^3$$

Dónde:

- $V_{\text{ext.cab.}}$: Volumen exterior del cabezal (m^3).
- D_{tanque} : Diámetro interno del tanque (m).
- $t_{\text{cab.}}$: Espesor del cabezal (m).
-

$$V_{\text{ext.cab.}} = 0.1 \cdot (1.5 \text{ m} + 0.050 \text{ m})^3 = 0.348 \text{ m}^3$$

La diferencia de estos valores será el volumen que ocupa la pared del cabezal:

$$V_{\text{pared cab.}} = V_{\text{ext.cab.}} - V_{\text{int.cab.}}$$

Dónde:

- $V_{\text{pared cab.}}$: Volumen de la pared del cabezal (m^3).
- $V_{\text{ext.cab.}}$: Volumen exterior del cabezal (m^3).
- $V_{\text{int.cab.}}$: Volumen interior del cabezal (m^3).

$$V_{\text{pared cab.}} = 0.348 \text{ m}^3 - 0.337 \text{ m}^3 = 0.011 \text{ m}^3$$

De la misma manera se calcula el volumen interno del cilindro que conforma el tanque:

$$V_{\text{int.c}} = \pi \cdot \left(\frac{D_{\text{tanque}}}{2} \right)^2 \cdot H$$

Dónde:

- $V_{\text{int.c}}$: Volumen interior del cilindro (m^3).
- D_{tanque} : Diámetro interno del tanque (m).
- H : Altura del cilindro (m).

$$V_{\text{int.c}} = \pi \cdot \left(\frac{1.5 \text{ m}}{2} \right)^2 \cdot 3 \text{ m} = 5.31 \text{ m}^3$$

A continuación. se calcula también el volumen externo:

$$V_{\text{ext.c}} = \pi \cdot \left(\frac{D_{\text{ext.tanque}}}{2} \right)^2 \cdot H$$

Dónde:

- $V_{\text{ext.c}}$: Volumen interior del cilindro (m^3)
- $D_{\text{ext.tanque}}$: Diámetro interno del tanque (m)
- H : Altura del cilindro (m)

$$V_{\text{ext.c}} = \pi \cdot \left(\frac{1.532 \text{ m}}{2} \right)^2 \cdot 3 \text{ m} = 5.53 \text{ m}^3$$

La diferencia entre estos dos volúmenes es el volumen de la pared del cilindro:

$$V_{\text{pared cil.}} = V_{\text{ext.cil.}} - V_{\text{int.cil.}}$$

Dónde:

- $V_{\text{pared cil.}}$: Volumen de la pared del cilindro (m^3).
- $V_{\text{ext.cil.}}$: Volumen exterior del cilindro (m^3).
- $V_{\text{int.cil.}}$: Volumen interior del cilindro (m^3).

Los valores en la ecuación:

$$V_{\text{pared cil.}} = 5.53 \text{ m}^3 - 5.31 \text{ m}^3 = 0.22 \text{ m}^3$$

A continuación se calcula el volumen de la pared del equipo. mediante la siguiente expresión:

$$V_{\text{pared tanque}} = V_{\text{pared.cil.}} + 2 \cdot V_{\text{pared.cab.}}$$

Dónde:

- $V_{pared\ tanque}$: Volumen de la pared del tanque (m^3).
- $V_{pared.\ cil.}$: Volumen pared del cilindro (m^3).
- $V_{pared.\ cab.}$: Volumen pared del cabezal (m^3).

$$V_{pared\ tanque} = 0.22\ m^3 + 2 \cdot 0.011\ m^3 = 0.25\ m^3$$

Se obtiene el peso del tanque en vacío a partir de la densidad del acero inoxidable AISI 316L que es $7960\ kg/m^3$, de la siguiente manera:

$$M_{tanque\ vacío} = 1.1 \cdot V_{pared\ tanque} \cdot \rho_{acero\ inox.}$$

Dónde:

- $M_{tanque\ vacío}$: Peso del equipo lleno de agua (kg).
- $V_{pared\ tanque}$: Volumen de la pared del tanque (m^3).
- $\rho_{acero\ inox.}$: Densidad del acero inoxidable AISI 316L (kg/m^3).

$$M_{tanque\ vacío} = 1.1 \cdot 0.25\ m^3 \cdot 7960\ kg/m^3 = 2192.84\ kg$$

En toneladas:

$$M_{tanque\ vacío} = 2.193\ Tn$$

Peso del tanque lleno de agua

Para conocer el peso del tanque lleno de agua a modo de prueba, se calcula el volumen del tanque de la siguiente manera:

$$V_{tanque} = V_{int.c} + 2 \cdot V_{int.cab.}$$

Dónde:

- V_{tanque} : Volumen del tanque (m^3).
- $V_{int.c.}$: Volumen interior del cilindro (m^3).
- $V_{int. cab.}$: Volumen interior del cabezal (m^3).

$$V_{tanque} = 5.3\ m^3 + 2 \cdot 0.33\ m^3 = 5.97\ m^3$$

A continuación, se calcula el peso del tanque con agua:

$$M_{\text{tanque con agua}} = M_{\text{tanque vacío}} + V_{\text{tanque}} \cdot \rho_{\text{agua}}$$

Dónde:

- $M_{\text{tanque con agua}}$: Peso del equipo lleno de agua (kg).
- $M_{\text{tanque vacío}}$: Masa total del equipo vacío (kg).
- V_{tanque} : Volumen del tanque (m^3).
- ρ_{agua} : Densidad del agua (kg/m^3).
-

$$M_{\text{tanque con agua}} = 2192.84 \text{ kg} + 5.97 \text{ m}^3 \cdot 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 8169.28 \text{ kg}$$

En toneladas:

$$M_{\text{tanque con agua}} = 8.17 \text{ Tn}$$

Peso del tanque en operación

Se procede a calcular el peso del tanque en operación, teniendo en cuenta la densidad del fluido y el volumen del tanque.

$$M_{\text{tanque en op.}} = M_{\text{tanque vacío}} + V_{\text{tanque}} \cdot \rho_{\text{mezcla}}$$

Dónde:

- $M_{\text{tanque en op.}}$: Peso del equipo en operación (kg).
- $M_{\text{tanque vacío}}$: Masa total del tanque vacío (kg).
- V_{tanque} : Volumen del tanque (m^3).
- ρ_{mezcla} : Densidad de la mezcla (kg/m^3).

$$M_{\text{tanque en op.}} = 2192.84 \text{ kg} + 3.75 \text{ m}^3 \cdot 1066 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 6196.3 \text{ kg}$$

En toneladas:

$$M_{\text{tanque en op.}} = 6.1 \text{ Tn}$$

11.2.2.4. Aislamiento

Hacer uso de un aislante es necesario debido a que la temperatura del tanque es 21 °C y se ha de usar como medida de seguridad.

Para asegurar que no haya intercambio de calor con el exterior se decide aislar el equipo con lana de roca.

El espesor requerido para el aislante se calcula con la siguiente ecuación:

$$X = \frac{30}{3.6 \cdot \left(\frac{\Delta T}{D_{ext.c}} \right)^{\frac{1}{4}}}$$

Dónde:

- X: Espesor del aislante (cm).
- ΔT : Diferencia de temperaturas entre el interior y exterior del reactor. siendo 20°C la temperatura media en Martorell y la temperatura en el interior del tanque es 21°C.
- $D_{ext.c}$: Diámetro externo del cilindro (m).

Por lo tanto.

$$X = \frac{30}{3.6 \cdot \left(\frac{21^{\circ}\text{C} - 20^{\circ}\text{C}}{1.532 \text{ m} \cdot 100 \text{ cm}} \right)^{\frac{1}{4}}} = 29 \text{ cm}$$

El aislamiento se recubre con una capa de aluminio para protegerlo de las condiciones meteorológicas de Martorell.

Finalmente. se necesita conocer el volumen aislante necesario para todo el equipo:

$$V_{aislante} = S_{ext.tanque} \cdot X$$

$$S_{ext.tanque} = S_{ext.c} + S_{ext.cab.}$$

Dónde:

- Vaislante: Volumen del aislante para todo el equipo (m^3).
- Sext. tanque: Sección externa del tanque (m^2).
- X: Espesor del aislante (cm).
- Sext. c: Sección externa del cilindro (m^2).

$$S_{\text{ext.c}} = \pi \cdot D_{\text{ext.c}} \cdot H_{\text{tanque}} = \pi \cdot 1.532 \text{ m} \cdot 4 \text{ m} = 14.43 \text{ m}^2$$

- **Sext. cab.** : Sección externa del cabezal (m^2).

$$S_{\text{ext.cab.}} = 0.334 \cdot (D_{\text{ext.c}})^2 = 0.334 \cdot (1.532 \text{ m})^2 = 0.79 \text{ m}^2$$

Por lo tanto:

$$S_{\text{ext.tanque}} = 14.43 \text{ m}^2 + 0.79 \text{ m}^2 = 15.234 \text{ m}^2$$

Seguidamente se obtiene el volumen del aislante necesario:

$$V_{\text{aislante}} = 15.234 \text{ m}^2 \cdot \left(29.31 \text{ cm} \cdot \frac{1 \text{ m}}{100 \text{ cm}} \right) = 4.46 \text{ m}^3$$

El resto de tanques pulmón se han diseñado de la misma manera. de modo que el espesor del cilindro y cabezales se calcula a partir del código ASME. El tiempo de residencia cambia según si el corriente está en estado líquido o gaseoso. Si es un gas. tendrá un tiempo de residencia de 0.01 h, mientras que si es un líquido, tendrá un tiempo de residencia de 0.167 h. También cabe mencionar que los tanques que contengan ácido acético serán diseñados con el acero inoxidable AISI 316L para evitar corrosión los tanques. Finalmente, para el recubrimiento de los tanques se ha usado lana de roca ya que es un buen aislante térmico.

Así pues, se han omitido los siguientes cálculos para los siguientes tanques pulmón, ya que son los mismos mencionados en los dos casos anteriores, y solo se pondrá el diseño final de estos y su función.

11.2.3.Tanque pulmón TP-501

Para asegurar una buena recirculación de gases después del tratamiento de gases, se colocará un tanque pulmón después del compresor CR-501, para controlar el caudal de recirculación de etileno, CO₂ y ácido acético.

Tabla 11.2.1. Propiedades y características del Tanque Pulmón TP-501.

Tanque pulmón TP-501			
Área	500	Material	AISI316-L
Caudal (kg/h)	53113.87	Altura cilindro (m)	7
Tiempo residencia (min)	0.60	Espesor cilindro (mm)	42
Capacidad tanque(m ³)	79.92	Tipo de fondo inferior	Toriesférico
Volumen ocupado (%)	68	Espesor fondo inferior(mm)	42
Diámetro interno (m)	3.5	Altura fondo inferior (m)	0.80
Altura total (m)	8.61	Tipo de fondo superior	Toriesférico
T operación (ºC)	81.71	Espesor fondo superior (mm)	42
T diseño (ºC)	100.71	Altura fondo superior (m)	0.80
P operación (bar)	10.1	Tipo aislante	Lana de roca
P diseño (bar)	12.1	Grueso aislante(cm)	12.93
Peso vacío (kg)	31262.45	Volumen aislante (m ³)	11.53
Peso agua (kg)	107185.34	Capacidad venteo (kg /h)	
Peso operación (kg)	31793.59		

11.2.4. Tanque pulmón TP-402

Para el correcto funcionamiento del tanque de mezcla M-401, se recomienda instalar un tanque pulmón para controlar la cantidad de cabal de cabal que entra en al mezclador, asegurando así una buena mezcla. por lo tanto. antes de la bomba P-402 se colocará un tanque pulmón.

Tabla 11.2.2. Propiedades y características del Tanque Pulmón TP-402.

Tanque pulmón TP-402			
Área	400	Material	AISI316-L
Caudal (kg/h)	21808.63	Altura cilindro (m)	3
Tiempo residencia (min)	10	Espesor cilindro (mm)	8
Capacidad tanque(m ³)	5.98	Tipo de fondo inferior	Toriesférico
Volumen ocupado (%)	70.9972	Espesor fondo inferior(mm)	8
Diámetro interno (m)	1.5	Altura fondo inferior (m)	0.31461
Altura total (m)	3.63	Tipo de fondo superior	Toriesférico
T operación (ºC)	93.73	Espesor fondo superior (mm)	8
T diseño (ºC)	113.73	Altura fondo superior (m)	0.31461
P operación (bar)	1.8	Tipo aislante	Lana de roca
P diseño (bar)	3.8	Grueso aislante(cm)	12.93
Peso vacío (kg)	1090.63	Volumen aislante (m ³)	1.49793
Peso agua (kg)	7067.07	Capacidad viento (kg /h)	
Peso operación (kg)	4725.40		

11.2.5. Tanque pulmón TP403

Este tanque pulmón también corresponde para el correcto funcionamiento del tanque de mezcla M-401. Se instala un segundo tanque pulmón.

Tabla 11.2.3. Propiedades y características del Tanque Pulmón TP-402.

Tanque pulmón TP-403			
Área	400	Material	AISI316-L
Caudal (kg/h)	32080.72	Altura cilindro (m)	5
Tiempo residencia (min)	10	Espesor cilindro (mm)	11
Capacidad tanque(m ³)	27.67	Tipo de fondo inferior	Toriesférico
Volumen ocupado (%)	89.17	Espesor fondo inferior(mm)	11
Diámetro interno (m)	2.5	Altura fondo inferior (m)	0.52
Altura total (m)	6.035	Tipo de fondo superior	Toriesférico
T operación (ºC)	62.63	Espesor fondo superior (mm)	11
T diseño (ºC)	82.63	Altura fondo superior (m)	0.51725
P operación (bar)	2	Tipo aislante	Lana de roca
P diseño (bar)	4	Grueso aislante(cm)	12.93
Peso vacío (kg)	4161.74	Volumen aislante (m ³)	5.57
Peso agua (kg)	31830.43	Capacidad venteo (kg /h)	
Peso operación (kg)	9508.52		

11.2.6.Tanque pulmón TP-404

Para asegurar la recirculación de ácido acético y para la puesta en marcha, se recomienda poner un tanque pulmón antes de la entrada al tanque de mezcla M-201 debido a que presenta caudal elevado.

Tabla 11.2.4. Propiedades y características del Tanque Pulmón TP-404.

Tanque pulmón TP-404			
Área	400	Material	AISI316-L
Caudal (kg/h)	18903.86	Altura cilindro (m)	3
Tiempo residencia (min)	10	Espesor cilindro (mm)	8
Capacidad tanque(m ³)	5.98	Tipo de fondo inferior	Toriesférico
Volumen ocupado (%)	63.40	Espesor fondo inferior(mm)	8
Diámetro interno (m)	1.5	Altura fondo inferior (m)	0.31461
Altura total (m)	3.63	Tipo de fondo superior	Toriesférico
T operación (ºC)	123.2	Espesor fondo superior (mm)	8
T diseño (ºC)	143.2	Altura fondo superior (m)	0.31
P operación (bar)	2	Tipo aislante	Lana de roca
P diseño (bar)	4	Grueso aislante(cm)	12.93
Peso vacío (kg)	1090.63	Volumen aislante (m ³)	1.38
Peso agua (kg)	7067.07	Capacidad venteo (kg /h)	-
Peso operación (kg)	4241.27		

11.2.7. Tanque pulmón TP-405

El tanque pulmón TP-405 es el tanque que se encuentra después de la columna C-402. La función de este tanque es controlar la cantidad de condensado de reflujo y también se utiliza para la puesta en marcha.

Tabla 11.2.5. Propiedades y características del Tanque Pulmón TP-405.

Tanque pulmón TP-405			
Área	400	Material	AISI316-L
Caudal (kg/h)	11203.92	Altura cilindro (m)	3
Tiempo residencia (min)	10	Espesor cilindro (mm)	7
Capacidad tanque(m ³)	5.98	Tipo de fondo inferior	Toriesférico
Volumen ocupado (%)	32	Espesor fondo inferior(mm)	7
Diámetro interno (m)	1.5	Altura fondo inferior (m)	0.31
Altura total (m)	3.62	Tipo de fondo superior	Toriesférico
T operación (ºC)	-182	Espesor fondo superior (mm)	7
T diseño (ºC)	-162	Altura fondo superior (m)	0.31
P operación (bar)	1.3	Tipo aislante	Lana de roca
P diseño (bar)	3.3	Grueso aislante(cm)	12.93
Peso vacío (kg)	950.076	Volumen aislante (m ³)	1.16
Peso agua (kg)	6926.51	Capacidad venteo (kg /h)	-
Peso operación (kg)	2817.4		

11.3. DISEÑO DE TANQUES DE MEZCLA

11.3.1. Diseño Tanque de Mezcla M-201

En este tanque de mezcla se unen dos corrientes de ácido acético que procede del tanque de almacenamiento del mismo y de la Black Box B-401, a partir del cual, se obtiene ácido acético recirculado.

Las condiciones de esta mezcla son: $\rho = 971.5 \text{ kg/m}^3$ y $\mu = 4.574 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$.

11.3.1.1. Balance de materia

Se trata de un tanque de mezcla donde se homogeneizan las dos corrientes de ácido acético para luego entrar a un intercambiador de calor. Debido a que solo se lleva a cabo la mezcla se ha de cumplir el balance de materia, es decir, el caudal de entrada será igual al caudal a la salida del tanque. La *Tabla 11.3.1* muestra el balance:

Tabla 11.3.1. Balance de materia del mezclador.

Entrada			Salida		
Nº Corriente	Compuesto	Caudal (kg/h)	Nº Corriente	Compuesto	Caudal (kg/h)
02	Ácido Acético	6781.7716	03	Ácido Acético	25685.6268
40	Ácido Acético	18903.8552		TOTAL	25685.6268
TOTAL					

11.3.1.2. Diseño funcional

El tanque M201 se encuentra a una temperatura de 97.32 °C. El fluido está en fase líquida, por lo tanto será necesario un agitador para que la mezcla sea lo más homogénea posible, ya que contiene ácido acético que proviene de corrientes diferentes.

La planta se encuentra operando en continuo, por lo tanto, para asegurar la máxima mezcla en el tanque se supone un tiempo de mezcla de 1080 s (0.3 h). A partir de este valor y conociendo el caudal de entrada se procede a calcular el volumen de mezcla en el tanque según la siguiente expresión:

$$V_{mezcla} = Q_v \cdot t_{mezcla} \quad \text{Ecuación 11.3.1.1}$$

Dónde:

- V_{fluido} : Volumen del fluido en el tanque (m^3)
- Q_v : Caudal volumétrico (m^3/h).
- t_{mezcla} : tiempo de mezcla (h).

$$V_{\text{mezcla}} = \left(25685.627 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot \frac{\text{m}^3}{971.5 \text{ kg}} \right) \cdot 0.3 \text{ h} = 7.93 \text{ m}^3$$

Debido a que se trata de un tanque agitado, y por lo tanto, cuenta con un agitador, el depósito no ha de estar lleno totalmente porque la acción del agitador creará una especie de vórtice debido a la acción de este, lo cual ocasiona que en el centro disminuya el nivel del líquido, al revés que a las paredes donde la altura del líquido aumenta. Es por eso necesario dejar un espacio de un 15% del volumen de total para que no se produzca perdida del fluido o, en su defecto, debido a la presión pueda romperse dicho mezclador. A partir de la siguiente *Ecuación 11.3.1.2*, se calcula el volumen mínimo del tanque teniendo en cuenta el espacio que se ha de dejar como medida de seguridad.

$$V_{\text{tanque,mín}} = \frac{V_{\text{mezcla}}}{(1-0.15)} \quad \text{Ecuación 11.3.1.2}$$

Dónde:

- $V_{\text{tanque,mín}}$: Volumen mínimo del tanque (m^3).
- V_{mezcla} : Volumen de la mezcla en el tanque (m^3).

Se sustituyen los valores en dicha ecuación:

$$V_{\text{tanque,mín}} = \frac{16.57 \text{ m}^3}{(1 - 0.15)} = 9.33 \text{ m}^3$$

Se obtiene un volumen mínimo del tanque de **9.33 m³**.

11.3.1.3. Dimensionamiento

Obtenido el valor mínimo del volumen del tanque se determinan las dimensiones del mismo. Este dimensionado será de la parte cilíndrica del tanque teniendo en cuenta la siguiente ecuación y relación entre altura y diámetro.

A partir de esta expresión se obtendrá el diámetro y posteriormente la altura:

$$V_{\text{tanque}} = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot H \quad \text{Ecuación 11.3.1.3}$$

- Relación entre altura (H) y diámetro (D) del tanque:

$$\frac{H}{D} = 2$$

Cálculo del diámetro a partir de la *Ecuación 11.3.2*:

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot V_{\text{tanque}}}{2 \cdot \pi}}$$

Se sustituyen los valores:

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 8.81 \text{ m}^3}{2 \cdot \pi}} = 1.78 \text{ m}$$

A partir de la relación mentada. se obtiene la altura del tanque:

$$H = 2 \cdot 1.78 \text{ m} = 3.56 \text{ m}$$

Una vez obtenidos los valores de las dimensiones del cuerpo cilíndrico del tanque, estos se normalizan para que sean unas medidas estándar fácil de obtener y económicamente más viable. Se fijan las siguientes medidas:

Altura = 4 m, Diámetro = 2 m

A partir del dimensionamiento del tanque y las medidas estándar se vuelve a calcular el volumen del tanque usando la *Ecuación 11.3.1.2*, siendo este el volumen real al cual se diseñará:

$$V_{\text{tanque,real}} = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot H$$

Dónde:

- $V_{\text{tanque,real}}$: Volumen real del tanque (m^3).
- D: Diámetro del tanque (m).

- H: Altura del tanque (m).

$$V_{\text{tanque,real}} = \frac{\pi}{4} \cdot (2 \text{ m})^2 \cdot (4 \text{ m}) = 12.56 \text{ m}^3$$

Seguidamente, se calcula el porcentaje de ocupación de la mezcla en el tanque de la siguiente manera:

$$\% \text{ Volumen ocupado} = \frac{\frac{V_{\text{mezcla}}}{N^{\circ} \text{ tanques}}}{V_{\text{tanque,real}}} \cdot 100$$

Dónde:

- V_{mezcla} : Volumen de la mezcla (m^3).
- N° tanques: Número de tanques (1).
- $V_{\text{tanque,real}}$: Volumen real del tanque (m^3).

$$\% \text{ Volumen ocupado} = \frac{\frac{7.93 \text{ m}^3}{1}}{12.56 \text{ m}^3} \cdot 100 = 63.14 \%$$

11.3.1.4. Diseño mecánico

A continuación se procede con el diseño mecánico del tanque de mezcla el cual se hará según la normativa ASME, además de las dimensiones obtenidas anteriormente en cuanto al cuerpo cilíndrico del tanque se refiere. Para el diseño de los cabezales toroidesféricos del tanque, superior e inferior, también se usa el código ASME.

Para determinar el material adecuado para el diseño del tanque se ha de tener en cuenta las propiedades del fluido. El ácido acético es un compuesto que produce corrosión, por lo tanto, será necesario que el material sea resistente. Se elige el acero inoxidable AISI 316L, por sus propiedades.

Seguidamente es importante conocer la presión y temperatura de diseño.

Presión de diseño

Antes de calcular la presión de diseño, se ha de determinar la presión de carga hidrostática que ejerce el líquido para asegurar que la mezcla se mantenga licuada. Una vez obtenido el valor que se le suma a la presión de operación, a partir de la cual se harán los cálculos de la presión de diseño.

$$P_{\text{carga hidrostática}} = g \cdot \rho \cdot h \quad \text{Ecuación 11.3.1.4}$$

Dónde:

- $P_{\text{carga hidrostática}}$: Presión de carga hidrostática de la mezcla (bar).
- g : Aceleración de la gravedad ($9,81 \text{ m/s}^2$).
- ρ : Densidad de la mezcla (kg/m^3).
- h : Altura que alcanza el fluido (m).

$$h = \frac{V_{\text{fluido}}}{\frac{\pi}{4} \cdot D^2} = \frac{7.93 \text{ m}^3}{\frac{\pi}{4} \cdot (2 \text{ m})^2} = 2.52 \text{ m}$$

Sustituyendo los valores:

$$P_{\text{carga hidrostática}} = 9.81 \text{ m/s}^2 \cdot 971.5 \text{ kg/m}^3 \cdot 2.52 \text{ m} = 24016.65 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2}$$

Se obtiene una presión de carga hidrostática de:

$$P_{\text{carga hidrostática}} = 0.24 \text{ bar}$$

Teniendo en cuenta que la presión inicial de operación es de 2 bar a la cual se le suma la presión de carga hidrostática, obteniendo: **2 bar + 0.24 bar = 2.4 bar**.

Cálculo de la presión de diseño de dos formas y se escogerá el valor más alto.

$$P_{\text{diseño,1}} = 1.1 \cdot P_{\text{operación}}$$

$$P_{\text{diseño,2}} = P_{\text{operación}} + 2 \text{ bar}$$

Dónde:

- $P_{\text{operación}}$: Presión de operación (2.24 bar).

$$P_{\text{diseño},1} = 1.1 \cdot 2.24 \text{ bar} = 2.46 \text{ bar}$$

$$P_{\text{diseño},2} = 2.24 \text{ bar} + 2 \text{ bar} = 4.24 \text{ bar}$$

La presión de diseño mayor es la número 2, por lo tanto para el diseño se utilizará una presión de 4.24 bares.

Temperatura de diseño

La temperatura de diseño se establece a 20°C por encima de la temperatura de operación del tanque.

$$T_{\text{diseño}} = T_{\text{operación}} + 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Dónde:

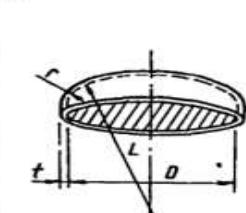
- $T_{\text{operación}}$: Temperatura de operación del tanque (97.32 °C)

$$T_{\text{diseño}} = 97.32 \text{ }^{\circ}\text{C} + 20 \text{ }^{\circ}\text{C} = 117.32 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Se obtiene una temperatura de diseño de 117.32°C.

Espesor de los cabezales

Como se ha mencionado antes se calculará a partir del código ASME. La siguiente *Figura 11.3.1* muestra los parámetros para el cálculo del cabezal según el código ASME.



ASME FLANGED AND DISHED HEAD (TORISpherical HEAD)													
When $L/r = 16^{2/3}$													
$t = \frac{0.885PL}{SE - 0.1P}$							$P = \frac{SEt}{0.885L + 0.1t}$						
When L/r less than $16^{2/3}$							$t = \frac{PLM}{2SE - 0.2P}$						
VALUES OF FACTOR "M"													
L/r	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50	2.75	3.00	3.25	3.50	4.00	4.50
M	1.00	1.03	1.06	1.08	1.10	1.13	1.15	1.17	1.18	1.20	1.22	1.25	1.28
L/r	7.00	8.00	8.50	9.00	9.50	10.0	10.5	11.0	11.5	12.0	13.0	14.0	15.0
M	1.41	1.44	1.46	1.48	1.50	1.52	1.54	1.56	1.58	1.60	1.62	1.65	1.69
* THE MAXIMUM ALLOWED RATIO : $L = D + 2t$ (see note 2 on facing page)													

Figura 11.3.1.1: Cabezal torisférico de ASME.

Dónde:

- L : Diámetro interno del cilindro (mm) = 2000 mm
- r: $0.1 \cdot \text{Diámetro interno del cilindro (mm)} = 200 \text{ mm}$

$$\frac{L}{r} = \frac{2000 \text{ mm}}{200 \text{ mm}} = 10$$

Con el valor de la relación L/r, se puede conocer el valor de M = 1.54, que será utilizada en la *Ecuación 11.3.4* para el cálculo del espesor de los cabezales del tanque.

$$t_{\text{cab.}} = \frac{P_t \cdot L \cdot M}{2 \cdot S \cdot E - 0.2 \cdot P_t} + \text{C. A.} \quad \text{Ecuación 11.3.1.5}$$

Dónde:

- tcab: Espesor de los cabezales (mm).
- Ptanque: Presión interna del tanque (bar).
- L: Diámetro interno del tanque (mm).
- M: Factor que depende de la relación L/r .
- S: Esfuerzo del material (bar).
- E: Factor de soldadura (0.85).
- C.A.: Tolerancia de corrosión (2 mm).

La temperatura de diseño es de $117.32^\circ\text{C} = 243.17^\circ\text{F}$. Por lo tanto corresponde a una S= 1082.48 bar, según la siguiente figura.

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

Figura 11.3.1.2: Tensión máxima admisible en función de la temperatura para el acero inoxidable.

Se sustituyen los valores en la ecuación:

$$t_{\text{cab.}} = \frac{4.24 \text{ bar} \cdot 2000 \text{ mm} \cdot 1.54}{2 \cdot 1082.48 \text{ bar} \cdot 0.85 - 0.2 \cdot 4.24 \text{ bar}} + 2 \text{ mm} = 9.10 \text{ mm}$$

Además, se le suma una tolerancia de fabricación del 10% al espesor de cabezal. De esta manera el espesor será:

$$t_{\text{cab.}} = 1.10 \cdot 9.10 \text{ mm} = 10 \text{ mm}$$

El valor del espesor del cabezal será de **10 mm**.

A partir del valor del espesor de los cabezales y mediante la siguiente *Ecuación 11.3.1.6* se puede calcular el diámetro externo del cabezal.

$$D_{\text{ext,cab.}} = D_{\text{int,cab.}} + 2 \cdot t_{\text{cab.}} \quad \text{Ecuación 11.3.1.6}$$

Dónde:

- $D_{\text{ext,cab.}}$: Diámetro externo del cabezal (mm).
- $D_{\text{int,cab.}}$: Diámetro interno del cabezal (mm).
- $t_{\text{cab.}}$: Espesor del cabezal (mm).

Sustitución de valores:

$$D_{\text{ext,cab.}} = 2000 \text{ mm} + 2 \cdot 10 \text{ mm} = 2020 \text{ mm} = 2.02 \text{ m}$$

Espesor del cilindro

De la misma manera que para el espesor de los cabezales se procede para calcular el espesor del cilindro siguiendo el código ASME, a partir de la ecuación de la siguiente *Figura 11.3.1.3*.

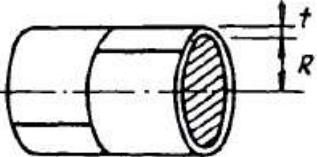
A		CYLINDRICAL SHELL (LONG SEAM) ¹	
		$t = \frac{PR}{SE - 0.6P}$	$P = \frac{SE t}{R + 0.6t}$
1. Usually the stress in the long seam is governing. See preceding page. 2. When the wall thickness exceeds one half of the inside radius or P exceeds 0.385 SE , the formulas given in the Code UA 2 shall be applied.			

Figura 11.3.1.3. Espesor para el cilindro según ASME.

Se utiliza la *Ecuación 11.3.1.7* para el cálculo del espesor del cuerpo cilíndrico:

$$t_c = \frac{P_c \cdot R_{int,c}}{S \cdot E - 0.6 \cdot P_c} + C. A. \quad Ecuación 11.3.1.7$$

Dónde:

- t_c : Espesor del cilindro (mm).
- P_c : Presión interna del cilindro (atm).
- $R_{int,c}$: Radio interno del cilindro (mm).
- S : Esfuerzo del material (atm).
- E : Factor de soldadura (0.85).
- C.A.: Tolerancia de corrosión (2 mm).

La temperatura de diseño, se sabe que es $117.32^\circ\text{C} = 243.17^\circ\text{F}$, de la misma manera que en el cálculo del esfuerzo del material para el cabezal se hace para el cilindro que conforma el tanque. Por lo tanto corresponde a una $S = 1082.48$ bar.

$$t_c = \frac{4.24 \text{ bar} \cdot 1000 \text{ mm}}{1082.48 \text{ atm} \cdot 0.85 - 0.6 \cdot 4.24 \text{ bar}} + 2 \text{ mm} = 6.62 \text{ mm}$$

El espesor del cilindro es de 6.62 mm, pero ya que los espesores estándar de chapa en Europa son: 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 15, 20, entre otros, se elige un valor de espesor del tanque de 8 mm.

Para que el diseño, montaje y mantenimiento sea más fácil y con el objetivo de aminorar costes se decide utilizar un mismo grosor de chapa para todo el diseño, utilizando el espesor más grande entre el cabezal y el cilindro, un valor de 10 mm.

Una vez conocido el espesor que se usará para el diseño de todo el equipo, se determina el diámetro externo del tanque comprobando que se corresponde con el diámetro externo del cabezal con la misma *Ecuación 11.3.1.6*:

$$D_{ext,tanque} = D_{tanque} + 2 \cdot t_c$$

Dónde:

- $D_{ext, tanque}$: Diámetro externo del tanque (m).
- D_{tanque} : Diámetro interno del tanque (m).
- t_c : Espesor del cilindro (m).

Por lo tanto se sustituyen los valores:

$$D_{\text{ext,tanque}} = 2 \text{ m} + 2 \cdot 0.010 \text{ m} = 2.02 \text{ m}$$

Altura de los cabezales

Se determina la altura de los cabezales según las ecuaciones de proporcionadas por la página web de “Koenig-co”, proveedora de cabezales.

$$DH = 0.1935 \cdot D_{\text{tanque}} - 0.455 \cdot t_{\text{cab.}} \quad \text{Ecuación 11.3.1.8}$$

$$SF = 3.5 \cdot t_{\text{cab.}} \quad \text{Ecuación 11.3.1.9}$$

$$TH = SF + DH \quad \text{Ecuación 11.3.1.10}$$

Dónde:

D_{tanque} : Diámetro interno del tanque (m).

$t_{\text{cab.}}$: Espesor del cabezal (m).

Se sustituyen los valores en las ecuaciones:

$$DH = 0.1935 \cdot 2000 \text{ mm} - 0.455 \cdot 10 \text{ mm} = 382.45 \text{ mm}$$

$$SF = 3.5 \cdot 10 \text{ mm} = 35 \text{ mm}$$

$$TH = 382.45 \text{ mm} + 35 \text{ mm} = 417.45 \text{ mm} = 0.42 \text{ m}$$

Se obtiene una altura de los cabezales de **0.42 m**.

Altura del tanque

Se procede a calcular la altura del tanque a partir de la siguiente *Ecuación 11.3.1.11*:

$$H_{\text{Total}} = H + 2 \cdot H_{\text{cab.}} \quad \text{Ecuación 11.3.1.11}$$

Dónde:

- H_{Total} : Altura total del tanque (m).
- H : Altura del tanque (m).
- $H_{\text{cab.}}$: Altura del cabezal (m).

Se obtiene la altura total del tanque:

$$H_{\text{Total}} = 4 \text{ m} + 2 \cdot 0.42 \text{ m} = 4.84 \text{ m}$$

11.3.1.5. Agitación

Debido a que se trata de un tanque de mezcla donde su contenido está en estado líquido, por lo tanto, se instala un sistema de agitación para mantener el contenido homogeneizado.

Los principales tipos de agitadores que se usan en la industria son el de hélice, de paletas y de turbina.

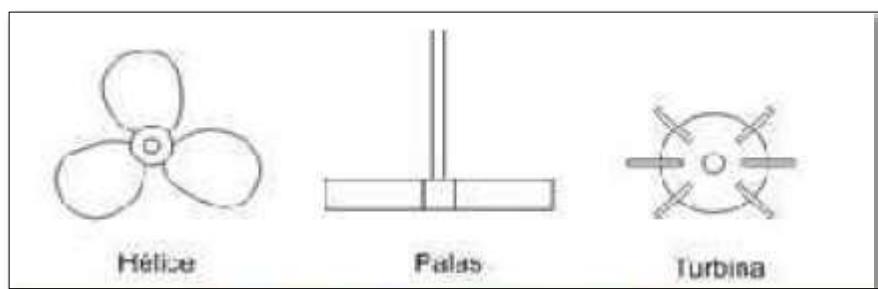


Figura 11.3.1.4. Tipos de agitadores.

Se escoge un agitador de turbina, ya que es adecuado para este proceso y que trabaja en un amplio rango de viscosidad y que favorece a que la mezcla se lo más homogénea posible. Este tipo de agitador trabaja entre 30 - 500 rpm y puede tener entre 4 y 14 palas de mezcla. En este caso se decide trabajar a **300 rpm y 6 palas de mezcla**. Además, se colocan 4 placas deflectoras, siendo este un valor estándar, y de esta manera se evitan posibles formaciones de vórtices.

Una vez escogido el tipo de agitador se calculan sus dimensiones teniendo en cuenta las relaciones geométricas de la siguiente figura obtenida bibliográficamente:

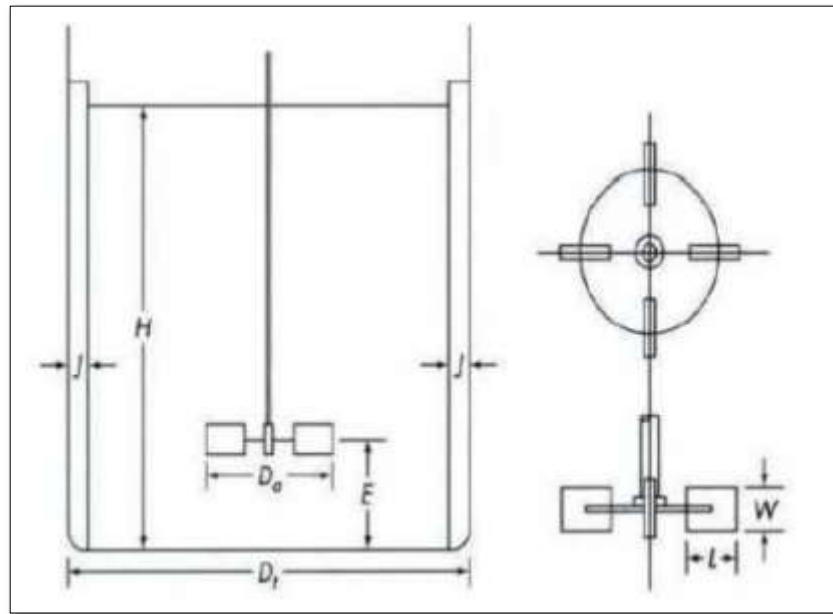


Figura 11.3.1.5. Agitador de turbina de palas.

Relaciones geométricas:

$$D_a/D_t = \frac{1}{3}$$

$$j/D_t = \frac{1}{12}$$

$$E/D_t = \frac{1}{3}$$

$$W/D_a = \frac{1}{5}$$

$$L/D_a = \frac{1}{4}$$

Dónde:

- D_a : Diámetro del agitador (m).
- D_t : Diámetro interno del reactor (m).
- j : Ancho de las placas deflectoras (m).
- E : Altura desde la turbina hasta el fondo del reactor (m).
- W : Altura de las palas de la turbina (m).
- L : Ancho de las palas de la turbina (m).

Se sustituyen los valores en las relaciones para el dimensionamiento del tanque:

$$D_a = \frac{1}{3} \cdot 2000 \text{ mm} = 666.67 \text{ mm} = 0.67 \text{ m}$$

$$j = \frac{1}{12} \cdot 2000 \text{ mm} = 166.67 \text{ mm} = 0.17 \text{ m}$$

$$E = \frac{1}{3} \cdot 2000 \text{ mm} = 666.67 \text{ mm} = 0.67 \text{ m}$$

$$W = \frac{1}{5} \cdot 0.67 \text{ m} = 0.13 \text{ m}$$

$$L = \frac{1}{4} \cdot 0.67 \text{ m} = 0.17 \text{ m}$$

A continuación se calcula la potencia que tendrá el agitador a partir del número de Reynolds de agitación con la siguiente *Ecuación 11.3.1.12*:

$$Re = \frac{\rho \cdot n \cdot Da^2}{\mu} \quad Ecuación 11.3.1.12$$

Dónde:

- Re: Número de Reynolds.
- ρ : Densidad de la mezcla (kg/m^3).
- n: Revoluciones del agitador, 300 rpm (rps).
- Da: Diámetro del agitador (m).
- μ : Viscosidad de la mezcla ($\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}$).

$$Re = \frac{971.5 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 5 \text{ rps} \cdot (0.67 \text{ m})^2}{4.57 \cdot 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}} = 4771404.27$$

Conocido el valor de Re, gráficamente se puede obtener el número de potencia (N_p) que permitirá conocer la potencia necesaria requerida por el agitador del tanque de mezcla.

La siguiente *Figura 11.3.1.6*, se obtiene N_p a partir del valor de $Re = 4.77 \cdot 10^6$.

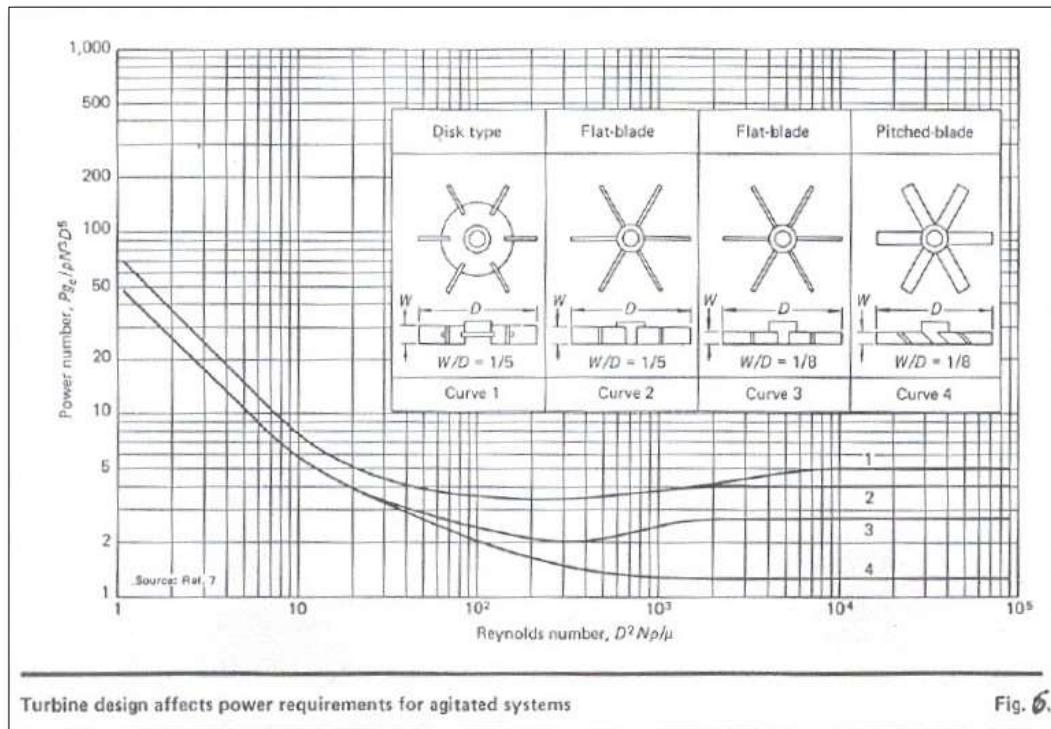


Fig. 6.

Figura 11.3.1.6. Número de potencia en función de Reynolds.

El tipo de agitador que se utiliza corresponde a la Curva 1 y debido a que el número de Re es mayor a 10^5 , se considera un valor constante siendo este un valor de $Np=5$.

Seguidamente se calcula la potencia del agitador a partir de la ecuación que se obtiene de la anterior *Figura 11.3.1.6*. Se hace mediante la siguiente expresión:

$$P = \frac{Np \cdot Da^5 \cdot n^3 \cdot \rho}{g} \quad \text{Ecuación 11.3.1.13}$$

Dónde:

- P : Potencia del agitador (kW).
- Da : Diámetro del agitador (m).
- n : Revoluciones del agitador, 300 rpm (rps).
- ρ : Densidad de la mezcla (kg/m^3).
- g : Aceleración de la gravedad (m/s^2).

Se sustituyen los valores en la ecuación:

$$P = \frac{5 \cdot (0.67 \text{ m})^5 \cdot (5 \text{ rps})^3 \cdot 971.5 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} \cdot \frac{1 \text{ kW}}{1000 \text{ W}} = 8.36 \text{ kW}$$

Se obtiene una potencia de **8.36 kW**.

Finalmente, se comprueba que el diseño será el correcto calculando la relación entre la potencia del agitador y el volumen de la mezcla según la ecuación:

$$\text{Power} = \frac{P}{V_{\text{mezcla}}} \quad \text{Ecuación 11.3.1.14}$$

Dónde:

- V_{mezcla} : Volumen de la mezcla (m^3).

$$\text{Power} = \frac{8.36 \text{ kW}}{7.93 \text{ m}^3} = 1.05 \frac{\text{kW}}{\text{m}^3}$$

Se verifica que el valor corresponda al rango de valores cuando su aplicación es una mezcla de líquidos, siendo este rango de 1 -1.5, tal y como se puede observar en la siguiente *Figura 11.3.1.7*.

Agitation	Applications	Power, kW/m^3
Mild	Blending, mixing	0.04–0.10
	Homogeneous reactions	0.01–0.03
Medium	Heat transfer	0.03–1.0
	Liquid-liquid mixing	1.0–1.5
Severe	Slurry suspension	1.5–2.0
	Gas absorption,	1.5–2.0
	Emulsions	1.5–2.0
Violent	Fine slurry suspension	> 2.0

Figura 11.3.1.7. Potencia de agitación.

El valor obtenido se encuentra dentro del rango, por lo tanto se da por válido el diseño de la agitación del tanque.

11.3.1.6. Peso del tanque

Peso del tanque vacío

Se ha de conocer el volumen del tanque para poder calcular el peso en vacío. Por eso, primero se calcula el volumen de los cabezales de la siguiente manera:

→ Cálculo del volumen interno del cabezal:

$$V_{\text{int,cab.}} = 0.1 \cdot (D_{\text{tanque}})^3 \quad \text{Ecuación 11.3.1.15}$$

Dónde:

- $V_{\text{int,cab.}}$: Volumen interior del cabezal (m^3)
- D_{tanque} : Diámetro interno del tanque (m)

$$V_{\text{int,cab.}} = 0.1 \cdot (2 \text{ m})^3 = 0.800 \text{ m}^3$$

→ Se calcula el volumen externo de los cabezales:

$$V_{\text{ext,cab.}} = 0.1 \cdot (D_{\text{tanque}} + t_{\text{cab.}})^3 \quad \text{Ecuación 11.3.1.16}$$

Dónde:

- $V_{\text{ext,cab.}}$: Volumen exterior del cabezal (m^3).
- D_{tanque} : Diámetro interno del tanque (m).
- $t_{\text{cab.}}$: Espesor del cabezal (m).

$$V_{\text{ext,cab.}} = 0.1 \cdot (2 \text{ m} + 0.010 \text{ m})^3 = 0.812 \text{ m}^3$$

La diferencia de estos valores será el volumen que ocupa la pared del cabezal:

$$V_{\text{pared cab.}} = V_{\text{ext,cab.}} - V_{\text{int,cab.}} \quad \text{Ecuación 11.3.1.17}$$

Dónde:

- $V_{\text{pared cab.}}$: Volumen de la pared del cabezal (m^3).
- $V_{\text{ext,cab.}}$: Volumen exterior del cabezal (m^3).
- $V_{\text{int,cab.}}$: Volumen interior del cabezal (m^3).

$$V_{\text{pared cab.}} = 0.812 \text{ m}^3 - 0.800 \text{ m}^3 = 0.012 \text{ m}^3$$

De la misma manera se calcula el volumen interno del cilindro que conforma el tanque:

→ Cálculo del volumen interno del cilindro:

$$V_{\text{int,c}} = \pi \cdot \left(\frac{D_{\text{tanque}}}{2}\right)^2 \cdot H \quad \text{Ecuación 11.3.1.18}$$

Dónde:

- $V_{\text{int,c}}$: Volumen interior del cilindro (m^3).
- D_{tanque} : Diámetro interno del tanque (m).
- H : Altura del cilindro (m).

$$V_{\text{int,c}} = \pi \cdot \left(\frac{2 \text{ m}}{2}\right)^2 \cdot 4 \text{ m} = 12.57 \text{ m}^3$$

→ Se calcula el volumen externo de los cabezales:

$$V_{\text{ext,c}} = \pi \cdot \left(\frac{D_{\text{ext,tanque}}}{2}\right)^2 \cdot H \quad \text{Ecuación 11.3.1.19}$$

Dónde:

- $V_{\text{ext,c}}$: Volumen interior del cilindro (m^3).
- $D_{\text{ext,tanque}}$: Diámetro interno del tanque (m).
- H : Altura del cilindro (m).

$$V_{\text{ext,c}} = \pi \cdot \left(\frac{2.02 \text{ m}}{2}\right)^2 \cdot 4 \text{ m} = 12.82 \text{ m}^3$$

La diferencia entre estos dos volúmenes es el volumen de la pared del cilindro:

$$V_{\text{pared cil.}} = V_{\text{ext,cil.}} - V_{\text{int,cil.}} \quad \text{Ecuación 11.3.1.20}$$

Dónde:

- $V_{\text{pared cil.}}$: Volumen de la pared del cilindro (m^3).
- $V_{\text{ext,cil.}}$: Volumen exterior del cilindro (m^3).
- $V_{\text{int,cil.}}$: Volumen interior del cilindro (m^3).

Los valores en la ecuación:

$$V_{\text{pared cil.}} = 12.82 \text{ m}^3 - 12.57 \text{ m}^3 = 0.25 \text{ m}^3$$

A continuación se calcula el volumen de la pared del equipo, mediante la siguiente expresión:

$$V_{\text{pared tanque}} = V_{\text{pared,cil.}} + 2 \cdot V_{\text{pared,cab.}} \quad \text{Ecuación 11.3.1.21}$$

Dónde:

- $V_{\text{pared tanque}}$: Volumen de la pared del tanque (m^3)
- $V_{\text{pared, cil.}}$: Volumen pared del cilindro (m^3)
- $V_{\text{pared, cab.}}$: Volumen pared del cabezal (m^3)

$$V_{\text{pared tanque}} = 0.25 \text{ m}^3 + 2 \cdot 0.012 \text{ m}^3 = 0.274 \text{ m}^3$$

Se obtiene el peso del tanque en vacío a partir de la densidad del acero inoxidable AISI 316L que es 7960 kg/m^3 , de la siguiente manera:

$$M_{\text{tanque vacío}} = 1.1 \cdot V_{\text{pared tanque}} \cdot \rho_{\text{acero inox.}} \quad \text{Ecuación 11.3.1.22}$$

Dónde:

- $M_{\text{tanque vacío}}$: Peso del equipo lleno de agua (kg).
- $V_{\text{pared tanque}}$: Volumen de la pared del tanque (m^3).
- $\rho_{\text{acero inox.}}$: Densidad del acero inoxidable AISI 316L (kg/m^3).

$$M_{\text{tanque vacío}} = 1.1 \cdot 0.274 \text{ m}^3 \cdot 7960 \text{ kg/m}^3 = 2399.14 \text{ kg}$$

En toneladas:

$$M_{\text{tanque vacío}} = 2.40 \text{ Tn}$$

Peso del tanque lleno de agua

Para conocer el peso del tanque lleno de agua a modo de prueba, se calcula el volumen del tanque de la siguiente manera:

$$V_{\text{tanque}} = V_{\text{int,c}} + 2 \cdot V_{\text{int,cab.}} \quad \text{Ecuación 11.3.1.23}$$

Dónde:

- V_{tanque} : Volumen del tanque (m^3).
- $V_{\text{int,c.}}$: Volumen interior del cilindro (m^3).
- $V_{\text{int,cab.}}$: Volumen interior del cabezal (m^3).

$$V_{\text{tanque}} = 12.57 \text{ m}^3 + 2 \cdot 0.800 \text{ m}^3 = 14.17 \text{ m}^3$$

A continuación, se calcula el peso del tanque con agua:

$$M_{\text{tanque con agua}} = M_{\text{tanque vacío}} + V_{\text{tanque}} \cdot \rho_{\text{agua}} \quad \text{Ecuación 11.3.1.24}$$

Dónde:

- $M_{\text{tanque con agua}}$: Peso del equipo lleno de agua (kg).
- $M_{\text{tanque vacío}}$: Masa total del equipo vacío (kg).
- V_{tanque} : Volumen del tanque (m^3).
- ρ_{agua} : Densidad del agua (kg/m^3).

$$M_{\text{tanque con agua}} = 2399.14 \text{ kg} + 14.17 \text{ m}^3 \cdot 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 16569.14 \text{ kg}$$

En toneladas:

$$M_{\text{tanque con agua}} = 16.57 \text{ tn}$$

Peso del tanque en operación

Se procede a calcular el peso del tanque en operación, teniendo en cuenta la densidad del fluido y el volumen del tanque.

$$M_{\text{tanque en op.}} = M_{\text{tanque vacío}} + V_{\text{tanque}} \cdot \rho_{\text{mezcla}} \quad \text{Ecuación 11.3.1.25}$$

Dónde:

- $M_{\text{tanque en op.}}$: Peso del equipo en operación (kg).
- $M_{\text{tanque vacío}}$: Masa total del tanque vacío (kg).
- V_{tanque} : Volumen del tanque (m^3).
- ρ_{mezcla} : Densidad de la mezcla (kg/m^3).

$$M_{\text{tanque en op.}} = 2399.14 \text{ kg} + 14.17 \text{ m}^3 \cdot 971.5 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 16165.30 \text{ kg}$$

En toneladas:

$$M_{\text{tanque en op.}} = 16.16 \text{ Tn}$$

11.3.1.7. Aislamiento

Hacer uso de un aislante es necesario debido a que la temperatura del tanque es 97.32°C y se ha de usar como medida de seguridad, ya que las paredes pueden ser un peligro para los operarios y demás trabajadores. Para asegurar que no haya intercambio de calor con el exterior se decide aislar el equipo con una lana mineral. Por ello, se elige aislar el equipo con lana de roca, debido a que es más aislante, es decir, tiene menor conductividad que otras lanas minerales. Además, presenta más ventajas en cuanto al medio ambiente porque reduce las emisiones de CO_2 y el consumo de energía, es de fácil manipulación e instalación.

El espesor requerido para el aislante se calcula con la siguiente *Ecuación 11.3.1.26*:

$$X = \frac{30}{3,6 \cdot \left(\frac{\Delta T}{D_{\text{ext},c}} \right)^{\frac{1}{4}}} \quad \text{Ecuación 11.3.1.65}$$

Dónde:

- X: Espesor del aislante (cm).
- ΔT : Diferencia de temperaturas entre el interior y exterior del reactor, siendo 20°C la temperatura media en Martorell, y la temperatura en el interior del tanque es 97.32°C.
- $D_{ext,c}$: Diámetro externo del cilindro (m).

Por lo tanto,

$$X = \frac{30}{3.6 \cdot \left(\frac{97.32^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}}{2.02 \text{ m} \cdot 100 \text{ cm}} \right)^{\frac{1}{4}}} = 10.59 \text{ cm}$$

El aislamiento se recubre con una capa de aluminio (0.6 mm) para protegerlo de las condiciones meteorológicas de Martorell.

Finalmente, se necesita conocer el volumen aislante necesario para todo el equipo:

$$V_{aislante} = S_{ext,tanque} \cdot X \quad \text{Ecuación 11.3.1.27}$$

$$S_{ext,tanque} = S_{ext,c} + S_{ext,cab.} \quad \text{Ecuación 11.3.1.28}$$

Dónde:

- $V_{aislante}$: Volumen del aislante para todo el equipo (m^3).
- $S_{ext,tanque}$: Sección externa del tanque (m^2).
- X: Espesor del aislante (cm).
- $S_{ext,c}$: Sección externa del cilindro (m^2).

$$S_{ext,c} = \pi \cdot D_{ext,c} \cdot H_{tanque} = \pi \cdot 2.02 \text{ m} \cdot 4 \text{ m} = 25.38 \text{ m}^2$$

- $S_{ext,cab.}$: Sección externa del cabezal (m^2).

$$S_{ext,cab.} = 0.931 \cdot (D_{ext,c})^2 = 0.931 \cdot (2.02 \text{ m})^2 = 3.80 \text{ m}^2$$

Por lo tanto:

$$S_{ext,tanque} = 25.38 \text{ m}^2 + 3.80 \text{ m}^2 = 29.18 \text{ m}^2$$

Seguidamente se obtiene el volumen del aislante necesario:

$$V_{\text{aislante}} = 29.18 \text{ m}^2 \cdot \left(10.59 \text{ cm} \cdot \frac{1 \text{ m}}{100 \text{ cm}} \right) = 3.09 \text{ m}^3$$

11.3.2. Diseño del Tanque de Mezcla M-202

En este tanque de mezcla, llegan los reactivos que proceden de los tanques de almacenamiento del ácido acético, del etileno y de oxígeno, respectivamente, tanques T-101/102, T-103/105 y T-104, respectivamente. Además, entra la corriente de recirculación de gases que proviene de la Black Box B-501.

Las condiciones de esta mezcla son: $\rho = 11.21 \text{ kg/m}^3$ y $\mu = 1.488 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{s}$.

11.3.2.1. Balance de materia

Se trata de un tanque de mezcla donde se homogeneizan las dos corrientes para luego entrar a una columna de destilación. La *Tabla 11.3.2* muestra el balance de materia del tanque de mezcla:

Tabla 11.3.2.1. Balance de materia del mezclador.

Entrada			Salida		
Nº Corriente	Compuesto	Caudal (kg/h)	Nº Corriente	Compuesto	Caudal (kg/h)
05	Ácido acético	25685.6268	10	Etileno	30932.9621
07	Etileno	3454.477		CO ₂	22004.8504
09	Oxígeno	2391.0655		Oxígeno	4480
30	Etileno	27478.4853		Ácido acético	27227.2285
	CO ₂	22004.8504		TOTAL	84645.041
	Oxígeno	2088.9345			
	Ácido acético	1541.6017			
TOTAL		84645.041			

11.3.2.2. Diseño funcional

El tanque M-202 se encuentra a una temperatura de 144.5 °C. El fluido dentro del tanque está en fase gas.

La planta se encuentra operando en continuo, por lo tanto, para asegurar la mezcla en el tanque se supone un tiempo de mezcla de 36 s (0.01 h). Debido a que todas las

corrientes están en fase gas no necesita un agitador, pero de todas maneras se ha de asegurar una buena homogeneización antes de su entrada al reactor.

A partir de este valor y conociendo el caudal de entrada se procede a calcular el volumen de mezcla en el tanque según la siguiente ecuación:

$$V_{mezcla} = Q_v \cdot t_{mezcla} \quad Ecuación 11.3.2.1$$

Dónde:

- V_{fluido} : Volumen del fluido en el tanque (m^3)
- Q_v : Caudal volumétrico (m^3/h)
- t_{mezcla} : tiempo de mezcla (h)

$$V_{mezcla} = \left(84645.041 \frac{kg}{h} \cdot \frac{m^3}{11.21 kg} \right) \cdot 0.01 h = 75.51 m^3$$

Aunque el contenido del tanque sea gas, se deja un espacio de un 15% del volumen de total para que debido a la presión no se produzcan roturas en el tanque. A partir de la siguiente *Ecuación 11.3.2.2*, se calcula el volumen mínimo del tanque teniendo en cuenta el espacio que se ha de dejar como medida de seguridad.

$$V_{tanque} = \frac{V_{fluido}}{(1-0.15)} \quad Ecuación 11.3.2.2$$

Dónde:

- V_{tanque} : Volumen del tanque mínimo (m^3)

Se sustituyen los valores en la anterior ecuación:

$$V_{tanque} = \frac{75.51 m^3}{(1 - 0.15)} = 88.83 m^3$$

Se obtiene un volumen mínimo del tanque de mezcla de $88.83 m^3$.

11.3.2.3. Dimensionamiento

Obtenido el valor mínimo del tanque se determinan las dimensiones del tanque. Este dimensionado será de la parte cilíndrica del tanque teniendo en cuenta la siguiente ecuación y relación entre altura y diámetro.

A partir de esta expresión se obtendrá el diámetro y posteriormente la altura:

$$V_{\text{tanque}} = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot H \quad \text{Ecuación 11.3.2.3}$$

- Relación entre altura (H) y diámetro (D) del tanque:

$$\frac{H}{D} = 2$$

Cálculo del diámetro a partir de la *Ecuación 11.3.2.4*:

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot V_{\text{tanque}}}{2 \cdot \pi}} \quad \text{Ecuación 11.3.2.4}$$

Se sustituyen los valores:

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 88.83 \text{ m}^3}{2 \cdot \pi}} = 3.84 \text{ m}$$

A partir de la relación mentada, se obtiene la altura del tanque:

$$H = 2 \cdot 3.84 \text{ m} = 7.68 \text{ m}$$

Una vez obtenidos los valores de las dimensiones del cuerpo cilíndrico del tanque, estos se normalizan para que sean unas medidas estándar fácil de obtener y económicamente más viable. Se fijan las siguientes medidas:

Altura = 8 m, Diámetro = 4 m

A partir del dimensionamiento del tanque y las medidas estándar se vuelve a calcular el volumen del tanque, siendo este el volumen real al cual se diseñará:

$$V_{\text{tanque,real}} = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot H$$

Dónde:

- $V_{\text{tanque,real}}$: Volumen real del tanque (m^3).
- D: Diámetro del tanque (m).
- H: Altura del tanque (m).

$$V_{\text{tanque,real}} = \frac{\pi}{4} \cdot (4 \text{ m})^2 \cdot (8 \text{ m}) = 100.53 \text{ m}^3$$

Seguidamente, se calcula el porcentaje de ocupación de la mezcla en el tanque de la siguiente manera:

$$\% \text{ Volumen ocupado} = \frac{\frac{V_{\text{mezcla}}}{N^{\circ} \text{ tanques}}}{V_{\text{tanque,real}}} \cdot 100$$

Dónde:

- V_{mezcla} : Volumen de la mezcla (m^3).
- N° tanques: Número de tanques (1).
- $V_{\text{tanque,real}}$: Volumen real del tanque (m^3).

$$\% \text{ Volumen ocupado} = \frac{\frac{75.51 \text{ m}^3}{1}}{100.53 \text{ m}^3} \cdot 100 = 75.11 \%$$

11.3.2.4. Diseño mecánico

A continuación se procede con el diseño mecánico del tanque de mezcla, de la misma manera que para el diseño del tanque de mezcla M-201, según el código ASME.

Para determinar el material adecuado para el diseño del tanque se ha de tener en cuenta las propiedades del fluido. La mezcla contiene ácido acético, oxígeno, etileno y dióxido de carbono. Compuestos que pueden producir corrosión, por lo tanto, será necesario que el material sea resistente. Se elige el acero inoxidable AISI 316L, por sus propiedades.

Seguidamente es importante conocer la presión y temperatura de diseño.

Presión de diseño

Para el cálculo de la presión de diseño se utilizan las siguientes ecuaciones y se escogerá el valor de presión más alto.

$$P_{\text{diseño,1}} = 1.1 \cdot P_{\text{operación}}$$

$$P_{\text{diseño,2}} = P_{\text{operación}} + 2 \text{ bar}$$

Dónde:

- $P_{\text{operación}}$: Presión de operación (1010 kPa = 10.1 bar)

$$P_{\text{diseño},1} = 1.1 \cdot 10.1 \text{ bar} = 11.11 \text{ bar}$$

$$P_{\text{diseño},2} = 10.1 \text{ bar} + 2 \text{ bar} = 12.1 \text{ bar}$$

La presión de diseño mayor es la 2, por lo tanto para el diseño se utilizará una presión de 12.1 bar = 11.94 atm.

Temperatura de diseño

La temperatura de diseño se establece 20°C por encima de la temperatura de operación del tanque.

$$T_{\text{diseño}} = T_{\text{operación}} + 20 \text{ °C}$$

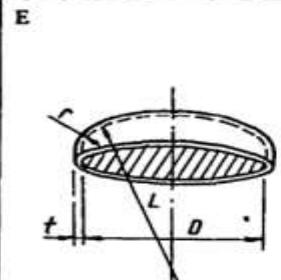
Dónde:

- $T_{\text{operación}}$: Temperatura de operación del tanque (144.5°C)

$$T_{\text{diseño}} = 144.5 \text{ °C} + 20 \text{ °C} = 164.5 \text{ °C}$$

Espesor de los cabezales

Como se ha mencionado antes se calculará a partir del código ASME. La siguiente *Figura 11.3.2.1* muestra los parámetros para el cálculo del cabezal según el código ASME.



ASME FLANGED AND DISHED HEAD (TORISpherical HEAD)																	
When $L/r = 16 \frac{2}{3}$																	
$t = \frac{0.885PL}{SE - 0.1P}$							$P = \frac{SEt}{0.885L + 0.1t}$										
When L/r less than $16 \frac{2}{3}$																	
$t = \frac{PLM}{2SE - 0.2P}$							$P = \frac{2SEt}{LM + 0.2t}$										
VALUES OF FACTOR "M"																	
L/r	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50	2.75	3.00	3.25	3.50	4.00	4.50	5.00	5.50	6.00	6.50
M	1.00	1.03	1.06	1.08	1.10	1.13	1.15	1.17	1.18	1.20	1.22	1.25	1.28	1.31	1.34	1.36	1.39
L/r	7.00	7.50	8.00	8.50	9.00	9.50	10.0	10.5	11.0	11.5	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	16.3	*
M	1.41	1.44	1.46	1.48	1.50	1.52	1.54	1.56	1.58	1.60	1.62	1.65	1.69	1.72	1.75	1.77	
* THE MAXIMUM ALLOWED RATIO : $L = D + 2t$ (see note 2 on facing page)																	

Figura 11.3.2.1. Cabezal toriesférico de ASME.

Dónde:

- L : Diámetro interno del cilindro (mm) = 4000 mm
- r: $0.1 \cdot$ Diámetro interno del cilindro (mm) = 400 mm

$$\frac{L}{r} = \frac{4000 \text{ mm}}{400 \text{ mm}} = 10$$

Con el valor de la relación L/r , se puede conocer el valor de $M = 1.54$, que será utilizada en la *Ecuación 11.3.2.5* para el cálculo del espesor de los cabezales del tanque.

$$t_{\text{cab.}} = \frac{P_t \cdot L \cdot M}{2 \cdot S \cdot E - 0.2 \cdot P_t} + \text{C. A.} \quad \text{Ecuación 11.3.2.5}$$

Dónde:

- t_{cab} : Espesor de los cabezales (mm).
- P_t : Presión interna del tanque (bar).
- L : Diámetro interno del tanque (mm).
- M: Factor que depende de la relación L/r .
- S: Esfuerzo del material (bar).
- E: Factor de soldadura (0.85).
- C.A.: Tolerancia de corrosión (2 mm).

La temperatura de diseño de los tubos es de $164.5^\circ\text{C} = 328.1^\circ\text{F}$. Por lo tanto corresponde a una $S = 1079.03$ bar, según la siguiente figura.

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

Figura 11.3.2.2. Tensión máxima admisible en función de la temperatura para el acero inoxidable.

Se sustituyen los valores en la ecuación:

$$t_{cab.} = \frac{12.1 \text{ bar} \cdot 4000 \text{ mm} \cdot 1.54}{2 \cdot 1079.03 \text{ bar} \cdot 0.85 - 0.2 \cdot 12.1 \text{ bar}} + 2 \text{ mm} = 42.69 \text{ mm}$$

Además, se le suma una tolerancia de fabricación del 10% al espesor de cabezal. De esta manera el espesor será:

$$t_{cab.} = 1.10 \cdot 42.69 \text{ mm} = 46.96 \text{ mm}$$

El valor del espesor del cabezal será de **50 mm**.

A partir del valor del espesor de los cabezales y mediante la siguiente *Ecuación 11.3.2.6* se puede calcular el diámetro externo del cabezal.

$$D_{ext,cab.} = D_{int,cab.} + 2 \cdot t_{cab.} \quad Ecuación 11.3.2.6$$

Dónde:

- $D_{ext, cab.}$: Diámetro externo del cabezal (mm).
- $D_{int, cab.}$: Diámetro interno del cabezal (mm).
- $t_{cab.}$: Espesor del cabezal (mm).

Sustitución de valores:

$$D_{ext,cab.} = 4000 \text{ mm} + 2 \cdot 50 \text{ mm} = 4100 \text{ mm} = 4.10 \text{ m}$$

Espesor del cilindro

De la misma manera que para el espesor de los cabezales se procede para calcular el espesor del cilindro siguiendo el código ASME, a partir de la ecuación de la siguiente *Figura 11.3.2.3*:

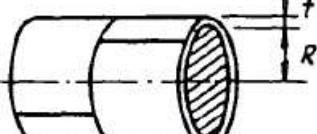
A		CYLINDRICAL SHELL (LONG SEAM) ¹	
	$t = \frac{PR}{SE - 0.6P}$	$P = \frac{SE t}{R + 0.6t}$	<ol style="list-style-type: none"> Usually the stress in the long seam is governing. See preceding page. When the wall thickness exceeds one half of the inside radius or P exceeds $0.385 SE$, the formulas given in the Code UA 2 shall be applied.

Figura 11.3.2.3 .Espesor para el cilindro según ASME.

Se utiliza la siguiente *Ecuación 11.3.2.7* para el cálculo del espesor del cuerpo cilíndrico:

$$t_c = \frac{P_c \cdot R_{int,c}}{S \cdot E - 0.6 \cdot P_c} + \text{C. A.} \quad \text{Ecuación 11.3.2.7}$$

Dónde:

- t_c : Espesor del cilindro (mm).
- P_c : Presión interna del cilindro (atm).
- $R_{int,c}$: Radio interno del cilindro (mm).
- S : Esfuerzo del material (bar).
- E : Factor de soldadura (0.85).
- C.A.: Tolerancia de corrosión (2 mm).

La temperatura de diseño es de $164.5^\circ\text{C} = 328.1^\circ\text{F}$, de la misma manera que en el cálculo del esfuerzo del material para el cabezal se hace para el cilindro que conforma el tanque. Por lo tanto corresponde a una $S = 1079.03$ bar.

$$t_c = \frac{12.1 \text{ bar} \cdot 2000 \text{ mm}}{1079.03 \text{ bar} \cdot 0.85 - 0.6 \cdot 12.1 \text{ bar}} + 2 \text{ mm} = 28.59 \text{ mm}$$

El espesor del cilindro es de 28.59 mm, pero debido a los espesores estándar de chapa en Europa se elige un valor de espesor del tanque de 30 mm.

Para que el diseño, montaje y mantenimiento sea más fácil y con el objetivo de aminorar costes se decide utilizar un mismo grosor de chapa para todo el diseño, utilizando el espesor más grande entre el cabezal y el cilindro, un valor de **50 mm**.

Una vez conocido el espesor que se usará para el diseño de todo el equipo, se determina el diámetro externo del tanque comprobando que se corresponde con el diámetro externo del cabezal con la misma expresión *Ecuación 11.3.2.6* anterior, pero en este caso con el espesor del cilindro:

$$D_{\text{ext,tanque}} = D_{\text{tanque}} + 2 \cdot t_c$$

Dónde:

$D_{\text{ext,tanque}}$: Diámetro externo del tanque (m).

D_{tanque} : Diámetro interno del tanque (m).

t_c : Espesor del cilindro (m).

Por lo tanto se sustituyen los valores:

$$D_{\text{ext,tanque}} = 4 \text{ m} + 2 \cdot 0.050 \text{ m} = 4.10 \text{ m}$$

Altura de los cabezales

Se determina la altura de los cabezales según las ecuaciones de proporcionadas por la página web de “Koenig-co”, proveedora de cabezales.

$$DH = 0.1935 \cdot D_{\text{tanque}} - 0.455 \cdot t_{\text{cab.}} \quad \text{Ecuación 11.3.2.8}$$

$$SF = 3.5 \cdot t_{\text{cab.}} \quad \text{Ecuación 11.3.2.9}$$

$$TH = SF + DH \quad \text{Ecuación 11.3.2.10}$$

Dónde:

- D_{tanque} : Diámetro interno del tanque (m).
- $t_{\text{cab.}}$: Espesor del cabezal (m).

Se sustituyen los valores en las ecuaciones:

$$DH = 0.1935 \cdot 4000 \text{ mm} - 0.455 \cdot 50 \text{ mm} = 751.25 \text{ mm}$$

$$SF = 3.5 \cdot 50 \text{ mm} = 175 \text{ mm}$$

$$TH = 751.25 \text{ mm} + 175 \text{ mm} = 926.25 \text{ mm} = 0.93 \text{ m}$$

Se obtiene una altura de los cabezales de **0.93 m**.

Altura del tanque

Se procede a calcular la altura del tanque a partir de la siguiente *Ecuación 11.3.2.11*:

$$H_{\text{Total}} = H + 2 \cdot H_{\text{cab.}} \quad \text{Ecuación 11.3.2.11}$$

Dónde:

- H_{Total} : Altura total del tanque (m).
- H : Altura del tanque (m).
- $H_{\text{cab.}}$: Altura del cabezal (m).

Se obtiene la altura total del tanque:

$$H_{\text{Total}} = 8 \text{ m} + 2 \cdot 0.93 \text{ m} = 9.86 \text{ m}$$

11.3.2.5. Peso del tanque

Peso del tanque vacío

Se ha de conocer el volumen del tanque para poder calcular el peso en vacío. Por eso, primero se calcula el volumen de los cabezales de la siguiente manera:

→ Cálculo del volumen interno del cabezal:

$$V_{\text{int,cab.}} = 0.1 \cdot (D_{\text{tanque}})^3 \quad \text{Ecuación 11.3.2.12}$$

Dónde:

- $V_{\text{int,cab.}}$: Volumen interior del cabezal (m^3).
- D_{tanque} : Diámetro interno del tanque (m).

$$V_{\text{int,cab.}} = 0.1 \cdot (4 \text{ m})^3 = 6.40 \text{ m}^3$$

→ Se calcula el volumen externo de los cabezales:

$$V_{\text{ext,cab.}} = 0.1 \cdot (D_{\text{tanque}} + t_{\text{cab.}})^3 \quad \text{Ecuación 11.3.2.13}$$

Dónde:

- $V_{\text{ext,cab.}}$: Volumen interior del cabezal (m^3).
- D_{tanque} : Diámetro interno del tanque (m).
- $t_{\text{cab.}}$: Espesor del cabezal (m).

$$V_{\text{ext,cab.}} = 0.1 \cdot (4 \text{ m} + 0.050 \text{ m})^3 = 6.64 \text{ m}^3$$

La diferencia de estos valores será el volumen que ocupa la pared del cabezal:

$$V_{\text{pared cab.}} = V_{\text{ext,cab.}} - V_{\text{int,cab.}} \quad \text{Ecuación 11.3.2.14}$$

Dónde:

- $V_{\text{pared cab.}}$: Volumen de la pared del cabezal (m^3).
- $V_{\text{ext,cab.}}$: Volumen exterior del cabezal (m^3).
- $V_{\text{int,cab.}}$: Volumen interior del cabezal (m^3).

$$V_{\text{pared cab.}} = 6.64 \text{ m}^3 - 6.40 \text{ m}^3 = 0.24 \text{ m}^3$$

De la misma manera se calcula el volumen interno del cilindro que conforma el tanque:

$$V_{\text{int,c}} = \pi \cdot \left(\frac{D_{\text{tanque}}}{2}\right)^2 \cdot H \quad \text{Ecuación 11.3.2.15}$$

Dónde:

- $V_{\text{int,c}}$: Volumen interior del cilindro (m^3).
- D_{tanque} : Diámetro interno del tanque (m).
- H : Altura del cilindro (m).

$$V_{\text{int,c}} = \pi \cdot \left(\frac{4 \text{ m}}{2}\right)^2 \cdot 8 \text{ m} = 100.53 \text{ m}^3$$

A continuación, se calcula también el volumen externo:

$$V_{\text{ext,c}} = \pi \cdot \left(\frac{D_{\text{ext,tanque}}}{2}\right)^2 \cdot H \quad \text{Ecuación 11.3.2.16}$$

Dónde:

- $V_{\text{ext,c}}$: Volumen interior del cilindro (m^3).
- $D_{\text{ext,tanque}}$: Diámetro interno del tanque (m).
- H : Altura del cilindro (m).

$$V_{\text{ext,c}} = \pi \cdot \left(\frac{4.10 \text{ m}}{2}\right)^2 \cdot 8 \text{ m} = 105.62 \text{ m}^3$$

La diferencia entre estos dos volúmenes es el volumen de la pared del cilindro:

$$V_{\text{pared cil.}} = V_{\text{ext,cil.}} - V_{\text{int,cil.}} \quad \text{Ecuación 11.3.2.17}$$

Dónde:

- $V_{\text{pared cil.}}$: Volumen de la pared del cilindro (m^3).
- $V_{\text{ext,cil.}}$: Volumen exterior del cilindro (m^3).
- $V_{\text{int, cil.}}$: Volumen interior del cilindro (m^3).

Los valores en la ecuación:

$$V_{\text{pared cil.}} = 105.62 \text{ m}^3 - 100.53 \text{ m}^3 = 5.09 \text{ m}^3$$

A continuación se calcula el volumen de la pared del equipo, mediante la siguiente expresión:

$$V_{\text{pared tanque}} = V_{\text{pared,cil.}} + 2 \cdot V_{\text{pared,cab.}} \quad \text{Ecuación 11.3.2.18}$$

Dónde:

- $V_{\text{pared tanque}}$: Volumen de la pared del tanque (m^3).
- $V_{\text{pared, cil.}}$: Volumen pared del cilindro (m^3).
- $V_{\text{pared, cab.}}$: Volumen pared del cabezal (m^3).

$$V_{\text{pared tanque}} = 5.09 \text{ m}^3 + 2 \cdot 0.24 \text{ m}^3 = 5.57 \text{ m}^3$$

Se obtiene el peso del tanque en vacío a partir de la densidad del acero inoxidable AISI 316L que es 7960 kg/m³, de la siguiente manera:

$$M_{\text{tanque vacío}} = 1.1 \cdot V_{\text{pared tanque}} \cdot \rho_{\text{acero inox.}} \quad \text{Ecuación 11.3.2.19}$$

Dónde:

- $M_{\text{tanque vacío}}$: Peso del equipo lleno de agua (kg).
- $V_{\text{pared tanque}}$: Volumen de la pared del tanque (m³).
- $\rho_{\text{acero inox.}}$: Densidad del acero inoxidable AISI 316L (kg/m³).

$$M_{\text{tanque vacío}} = 1.1 \cdot 5.57 \text{ m}^3 \cdot 7960 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 48770.92 \text{ kg}$$

En toneladas:

$$M_{\text{tanque vacío}} = 48.77 \text{ Tn}$$

Peso del tanque lleno de agua

Para conocer el peso del tanque lleno de agua a modo de prueba, se calcula el volumen del tanque de la siguiente manera:

$$V_{\text{tanque}} = V_{\text{int,c}} + 2 \cdot V_{\text{int,cab.}} \quad \text{Ecuación 11.3.2.20}$$

Dónde:

- V_{tanque} : Volumen del tanque (m³).
- $V_{\text{int,c.}}$: Volumen interior del cilindro (m³).
- $V_{\text{int, cab.}}$: Volumen interior del cabezal (m³).

$$V_{\text{tanque}} = 100.53 \text{ m}^3 + 2 \cdot 6.40 \text{ m}^3 = 113.33 \text{ m}^3$$

A continuación, se calcula el peso del tanque con agua:

$$M_{\text{tanque con agua}} = M_{\text{tanque vacío}} + V_{\text{tanque}} \cdot \rho_{\text{agua}} \quad \text{Ecuación 11.3.2.21}$$

Dónde:

- $M_{\text{tanque con agua}}$: Peso del equipo lleno de agua (kg).

- $M_{\text{tanque vacío}}$: Masa total del equipo vacío (kg).
- V_{tanque} : Volumen del tanque (m^3).
- ρ_{agua} : Densidad del agua (kg/m^3).

$$M_{\text{tanque con agua}} = 48770.92 \text{ kg} + 113.33 \text{ m}^3 \cdot 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 162100.92 \text{ kg}$$

En toneladas:

$$M_{\text{tanque con agua}} = 162.10 \text{ Tn}$$

Peso del tanque en operación

Se procede a calcular el peso del tanque en operación, teniendo en cuenta la densidad del fluido y el volumen del tanque.

$$M_{\text{tanque en op.}} = M_{\text{tanque vacío}} + V_{\text{tanque}} \cdot \rho_{\text{mezcla}} \quad \text{Ecuación 11.3.2.22}$$

Dónde:

- $M_{\text{tanque en op.}}$: Peso del equipo en operación (kg).
- $M_{\text{tanque vacío}}$: Masa total del tanque vacío (kg).
- V_{tanque} : Volumen del tanque (m^3).
- ρ_{mezcla} : Densidad de la mezcla (kg/m^3).

$$M_{\text{tanque en op.}} = 48770.92 \text{ kg} + 113.33 \text{ m}^3 \cdot 11.21 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 50041.35 \text{ kg}$$

En toneladas:

$$M_{\text{tanque en op.}} = 50.04 \text{ Tn}$$

11.3.2.6. Aislamiento

Hacer uso de un aislante es necesario debido a que la temperatura del tanque es 144.5°C y se ha de usar como medida de seguridad, ya que las paredes pueden ser un peligro para los operarios y demás trabajadores. Para asegurar que no haya intercambio de calor con el exterior se decide aislar el equipo con una lana mineral.

Por ello, se elige aislar el equipo con lana de roca, como se ha mencionado en el anterior diseño del mezclador.

El espesor requerido para el aislante se calcula con la siguiente ecuación:

$$X = \frac{30}{3.6 \cdot \left(\frac{\Delta T}{D_{ext,c}} \right)^{\frac{1}{4}}} \quad Ecuación 11.3.2.23$$

Dónde:

- X: Espesor del aislante (cm).
- ΔT : Diferencia de temperaturas entre el interior y exterior del reactor, siendo 20°C la temperatura media en Martorell, y la temperatura en el interior del tanque es 144.5°C.
- $D_{ext,c}$: Diámetro externo del cilindro (m).

Por lo tanto,

$$X = \frac{30}{3.6 \cdot \left(\frac{144.5 \text{ } ^\circ\text{C} - 20 \text{ } ^\circ\text{C}}{4.10 \text{ m} \cdot 100 \text{ cm}} \right)^{\frac{1}{4}}} = 11.23 \text{ cm}$$

El aislamiento se recubre con una capa de aluminio (0.6 mm) para protegerlo de las condiciones meteorológicas de Martorell.

Finalmente, se necesita conocer el volumen aislante necesario para todo el equipo:

$$V_{aislante} = S_{ext,tanque} \cdot X \quad Ecuación 11.3.2.23$$

$$S_{ext,tanque} = S_{ext,c} + S_{ext,cab.} \quad Ecuación 11.3.2.23$$

Dónde:

- Vaislante: Volumen del aislante para todo el equipo (m^3).
- $S_{ext,tanque}$: Sección externa del tanque (m^2).
- X: Espesor del aislante (cm).
- $S_{ext,c}$: Sección externa del cilindro (m^2).

$$S_{ext,c} = \pi \cdot D_{ext,c} \cdot H_{tanque} = \pi \cdot 4.10 \text{ m} \cdot 8 \text{ m} = 103.04 \text{ m}^2$$

- $S_{ext,cab.}$: Sección externa del cabezal (m^2).

$$S_{ext,cab.} = 0.931 \cdot (D_{ext,c})^2 = 0.931 \cdot (4.10 \text{ m})^2 = 15.65 \text{ m}^2$$

Por lo tanto:

$$S_{\text{ext,tanque}} = 103.04 \text{ m}^2 + 15.65 \text{ m}^2 = 118.69 \text{ m}^2$$

Seguidamente se obtiene el volumen del aislante necesario:

$$V_{\text{aislante}} = 118.69 \text{ m}^2 \cdot \left(11.23 \text{ cm} \cdot \frac{1 \text{ m}}{100 \text{ cm}} \right) = 13.33 \text{ m}^3$$

11.3.3. Diseño del Tanque de Mezcla M-401

En este tanque de mezcla, llegan dos corrientes que proceden de las columnas de absorción C-301, que pertenece a la integración energética, y de la columna C-401.

Las condiciones de esta mezcla son: $\rho = 975.4 \text{ kg/m}^3$ y $\mu = 6.04 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$.

11.3.3.1. Balance de materia

Se trata de un tanque de mezcla donde se homogeneizan dos corrientes para posteriormente entrar a la columna de destilación. La siguiente *Tabla 11.3.3.1* muestra el balance de materia que se da en el tanque de mezcla:

Tabla 11.3.3.1: Balance de materia del mezclador.

Entrada			Salida		
Nº Corriente	Compuesto	Caudal (kg/h)	Nº Corriente	Compuesto	Caudal (kg/h)
32	Etileno	7.0042	35	Etileno	114.34
	CO2	12.8121		CO2	187.4549
	Oxígeno	0.0825		Oxígeno	0.8764
	Acetato Vinilo	950.9882		Acetato Vinilo	9671.9817
	Ácido Acético	20231.368		Ácido Acético	42916.504
	Agua	606.3737		Agua	998.1895
34	Etileno	107.3358		TOTAL	53889.3465
	CO2	174.6428			
	Oxígeno	0.7939			
	Acetato Vinilo	8720.9935			
	Ácido Acético	22685.136			
	Agua	391.8158			
	TOTAL	53889.3465			

11.3.3.2. Diseño funcional

El tanque M201 se encuentra a una temperatura de 74.92 °C. El fluido está en fase líquida. por lo tanto será necesario un agitador para que la mezcla sea lo más homogénea posible, ya que contiene ácido acético que proviene de corrientes diferentes.

La planta se encuentra operando en continuo, por lo tanto, para asegurar la máxima mezcla en el tanque se supone un tiempo de mezcla de 1080 s (0.3 h). A partir de este valor y conociendo el caudal de entrada se procede a calcular el volumen de mezcla en el tanque según la siguiente ecuación:

$$V_{mezcla} = Q_v \cdot t_{mezcla} \quad Ecuación 11.3.3.1$$

Dónde:

- V_{fluido} : Volumen del fluido en el tanque (m^3)
- Q_v : Caudal volumétrico (m^3/h).
- t_{mezcla} : tiempo de mezcla (h).

$$V_{mezcla} = \left(53889.347 \frac{kg}{h} \cdot \frac{m^3}{975.4 kg} \right) \cdot 0.3 h = 16.57 m^3$$

Debido a que se trata de un tanque agitado, y por lo tanto, cuenta con un agitador, el depósito no ha de estar lleno totalmente porque la acción del agitador creará una especie de vórtice debido a la acción de este, lo cual ocasiona que en el centro disminuya el nivel del líquido, al revés que a las paredes donde la altura del líquido aumenta. Es por eso necesario dejar un espacio de un 15% del volumen de total para que no se produzca perdida del fluido o, en su defecto, debido a la presión pueda romperse dicho mezclador. A partir de la siguiente *Ecuación 11.3.3.2*, se calcula el volumen mínimo del tanque teniendo en cuenta el espacio que se ha de dejar como medida de seguridad.

$$V_{tanque} = \frac{V_{fluido}}{(1-0.15)} \quad Ecuación 11.3.3.2$$

Dónde:

- $V_{tanque,mín}$: Volumen mínimo del tanque (m^3).
- V_{mezcla} : Volumen de la mezcla en el tanque (m^3).

Se sustituyen los valores en dicha ecuación:

$$V_{\text{tanque, m}\text{ín}} = \frac{16.57 \text{ m}^3}{(1 - 0.15)} = 19.50 \text{ m}^3$$

Se obtiene un volumen mínimo del tanque de mezcla de 19.50 m³.

11.3.3.3. Dimensionamiento

Obtenido el valor mínimo del tanque se determinan las dimensiones del tanque.. Este dimensionado será de la parte cilíndrica del tanque teniendo en cuenta la siguiente ecuación y relación entre altura y diámetro.

A partir de esta expresión se obtendrá el diámetro y posteriormente la altura:

$$V_{\text{tanque}} = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot H \quad \text{Ecuación 11.3.3.3}$$

- Relación entre altura (H) y diámetro (D) del tanque:

$$\frac{H}{D} = 2$$

Cálculo del diámetro a partir de la *Ecuación 11.3.3.4*:

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot V_{\text{tanque}}}{2 \cdot \pi}} \quad \text{Ecuación 11.3.3.4}$$

Sustitución de valores:

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 18.41 \text{ m}^3}{2 \cdot \pi}} = 2.27 \text{ m}$$

A partir de la relación mentada, se obtiene la altura del tanque:

$$H = 2 \cdot 2.27 \text{ m} = 4.54 \text{ m}$$

Una vez obtenidos los valores de las dimensiones del cuerpo cilíndrico del tanque, estos se normalizan para que sean unas medidas estándar fácil de obtener y económicamente más viable. Se fijan las siguientes medidas:

Altura = **5 m**, Diámetro = **3 m**

A partir del dimensionamiento del tanque y las medidas estándar se vuelve a calcular el volumen del tanque, siendo este el volumen real al cual se diseñará:

$$V_{\text{tanque,real}} = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot H \quad \text{Ecuación 11.3.3.5}$$

Dónde:

- $V_{\text{tanque,real}}$: Volumen real del tanque (m^3).
- D: Diámetro del tanque (m).
- H: Altura del tanque (m).

$$V_{\text{tanque,real}} = \frac{\pi}{4} \cdot (3 \text{ m})^2 \cdot (5 \text{ m}) = 35.34 \text{ m}^3$$

Seguidamente, se calcula el porcentaje de ocupación de la mezcla en el tanque de la siguiente manera:

$$\% \text{ Volumen ocupado} = \frac{\frac{V_{\text{mezcla}}}{N^{\circ} \text{ tanques}}}{V_{\text{tanque,real}}} \cdot 100$$

Dónde:

- V_{mezcla} : Volumen de la mezcla (m^3).
- N° tanques: Número de tanques (1).
- $V_{\text{tanque,real}}$: Volumen real del tanque (m^3).

$$\% \text{ Volumen ocupado} = \frac{\frac{16.57 \text{ m}^3}{1}}{\frac{35.34 \text{ m}^3}{35.34 \text{ m}^3}} \cdot 100 = 46.89 \%$$

11.3.3.4. Diseño mecánico

A continuación se procede con el diseño mecánico del tanque de mezcla el cual se hará según la normativa ASME, además de las dimensiones obtenidas anteriormente en cuanto al cuerpo cilíndrico del tanque se refiere. Para el diseño de los cabezales toriesféricos del tanque, superior e inferior, también se usa el código ASME.

Para determinar el material adecuado para el diseño del tanque se ha de tener en cuenta las propiedades del fluido. El ácido acético es un compuesto que produce corrosión, por lo tanto, será necesario que el material sea resistente. Se elige el acero inoxidable AISI 316L, por sus propiedades.

Seguidamente es importante conocer la presión y temperatura de diseño.

Presión de diseño

Antes de calcular la presión de diseño, se ha de determinar la presión de carga hidrostática que ejerce el líquido para asegurar que la mezcla se mantenga licuada. Una vez obtenido el valor que se le suma a la presión de operación, a partir de la cual se harán los cálculos de la presión de diseño.

$$P_{\text{carga hidrostática}} = g \cdot \rho \cdot h \quad \text{Ecuación 11.3.3.6}$$

Dónde:

- $P_{\text{carga hidrostática}}$: Presión de carga hidrostática de la mezcla (bar).
- g : Aceleración de la gravedad (9.81 m/s^2).
- ρ : Densidad de la mezcla (kg/m^3).
- h : Altura que alcanza el fluido (m).

$$h = \frac{V_{\text{fluido}}}{\frac{\pi}{4} \cdot D^2} = \frac{16.57 \text{ m}^3}{\frac{\pi}{4} \cdot (3 \text{ m})^2} = 2.34 \text{ m}$$

Sustituyendo los valores:

$$P_{\text{carga hidrostática}} = 9.81 \text{ m/s}^2 \cdot 975.4 \text{ kg/m}^3 \cdot 2.34 \text{ m} = 22390.69 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2}$$

Se obtiene una presión de carga hidrostática de:

$$P_{\text{carga hidrostática}} = 0.224 \text{ bar}$$

Teniendo en cuenta que la presión inicial de operación es de 2 bar a la cual se le suma la presión de carga hidrostática, obteniendo: **2 bar + 0.224 bar = 2.224 bar**.

Cálculo de la presión de diseño de dos formas y se escogerá el valor más alto.

$$P_{\text{diseño,1}} = 1.1 \cdot P_{\text{operación}}$$

$$P_{\text{diseño,2}} = P_{\text{operación}} + 2 \text{ bar}$$

Dónde:

- $P_{\text{operación}}$: Presión de operación (2.224 bar).

$$P_{\text{diseño},1} = 1.1 \cdot 2.224 \text{ bar} = 2.446 \text{ bar}$$

$$P_{\text{diseño},2} = 2.224 \text{ bar} + 2 \text{ bar} = 4.224 \text{ bar}$$

La presión de diseño mayor es la número 2, por lo tanto para el diseño se utilizará una presión de 4.22 bares.

Temperatura de diseño

La temperatura de diseño se establece a 20°C por encima de la temperatura de operación del tanque.

$$T_{\text{diseño}} = T_{\text{operación}} + 20 \text{ °C}$$

Dónde:

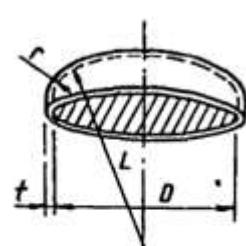
- $T_{\text{operación}}$: Temperatura de operación del tanque (74.92 °C)

$$T_{\text{diseño}} = 74.92 \text{ °C} + 20 \text{ °C} = 94.92 \text{ °C}$$

Se obtiene una temperatura de diseño de 94.92°C.

Espesor de los cabezales

Como se ha mencionado antes se calculará a partir del código ASME. La siguiente *Figura 11.3.3.1* muestra los parámetros para el cálculo del cabezal según el código ASME.



E		ASME FLANGED AND DISHED HEAD (TORISPHERICAL HEAD)											
		When $L/r = 16^{2/3}$											
L/r	t	$t = \frac{0.885PL}{SE - 0.1P}$						$P = \frac{SEt}{0.885L + 0.1t}$					
		When L/r less than $16^{2/3}$						$t = \frac{PLM}{2SE - 0.2P}$					
VALUES OF FACTOR "M"													
L/r	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50	2.75	3.00	3.25	3.50	4.00	4.50
M	1.00	1.03	1.06	1.08	1.10	1.13	1.15	1.17	1.18	1.20	1.22	1.25	1.28
L/r	7.00	8.00	8.50	9.00	9.50	10.0	10.5	11.0	11.5	12.0	13.0	14.0	15.0
M	1.41	1.44	1.46	1.48	1.50	1.52	1.54	1.56	1.58	1.60	1.62	1.65	1.69
* THE MAXIMUM ALLOWED RATIO : $L = D + 2t$ (see note 2 on facing page)													

Figura 11.3.3.1. Cabezal toriesférico de ASME.

Dónde:

- L : Diámetro interno del cilindro (mm) = 3000 mm
- r: $0.1 \cdot \text{Diámetro interno del cilindro (mm)} = 300 \text{ mm}$

$$\frac{L}{r} = \frac{3000 \text{ mm}}{300 \text{ mm}} = 10$$

Con el valor de la relación L/r, se puede conocer el valor de M = 1.54, que será utilizada en la *Ecuación 11.3.3.7* para el cálculo del espesor de los cabezales del tanque.

$$t_{\text{cab.}} = \frac{P_t \cdot L \cdot M}{2 \cdot S \cdot E - 0.2 \cdot P_t} + \text{C. A.} \quad \text{Ecuación 11.3.3.7}$$

Dónde:

- $t_{\text{cab.}}$: Espesor de los cabezales (mm).
- P_t : Presión interna del tanque (bar).
- L: Diámetro interno del tanque (mm).
- M: Factor que depende de la relación L/r.
- S: Esfuerzo del material (bar).
- E: Factor de soldadura (0.85).
- C.A.: Tolerancia de corrosión (2 mm).

La temperatura de diseño de los tubos es de $94.92^\circ\text{C} = 202.86^\circ\text{F}$. Por lo tanto corresponde a una $S = 1082.48 \text{ bar}$, según la siguiente figura.

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

Figura 11.3.3.2. Tensión máxima admisible en función de la temperatura para el acero inoxidable.

Se sustituyen los valores en la ecuación:

$$t_{\text{cab.}} = \frac{4.22 \text{ bar} \cdot 3000 \text{ mm} \cdot 1.54}{2 \cdot 1082.48 \text{ bar} \cdot 0.85 - 0.2 \cdot 4.22 \text{ bar}} + 2 \text{ mm} = 12.59 \text{ mm}$$

Además, se le suma una tolerancia de fabricación del 10% al espesor de cabezal. De esta manera el espesor será:

$$t_{cab.} = 1.10 \cdot 12.59 \text{ mm} = 13.85 \text{ mm}$$

El valor del espesor del cabezal será de **13.85 mm**. Se elige un valor estándar de chapa **15 mm**.

A partir del valor del espesor de los cabezales y mediante la siguiente *Ecuación 11.3.3.8* se puede calcular el diámetro externo del cabezal.

$$D_{ext,cab.} = D_{int,cab.} + 2 \cdot t_{cab.} \quad Ecuación 11.3.3.8$$

Dónde:

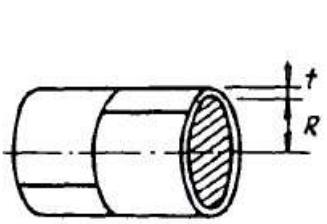
- $D_{ext, cab.}$: Diámetro externo del cabezal (mm).
- $D_{int, cab.}$: Diámetro interno del cabezal (mm).
- $t_{cab.}$: Espesor del cabezal (mm).

Sustitución de valores:

$$D_{ext,cab.} = 3000 \text{ mm} + 2 \cdot 15 \text{ mm} = 3030 \text{ mm} = 3.03 \text{ m}$$

Espesor del cilindro

De la misma manera que para el espesor de los cabezales se procede para calcular el espesor del cilindro siguiendo el código ASME, a partir de la ecuación de la siguiente *Figura 11.3.3.3*.



CYLINDRICAL SHELL (LONG SEAM) ¹	
$t = \frac{PR}{SE - 0.6P}$	$P = \frac{SE t}{R + 0.6t}$
1. Usually the stress in the long seam is governing. See preceding page. 2. When the wall thickness exceeds one half of the inside radius or P exceeds 0.385 SE , the formulas given in the Code UA 2 shall be applied.	

Figura 11.3.3.3 .Espesor para el cilindro según ASME.

Se utiliza la siguiente *Ecuación 11.3.3.9* para el cálculo del espesor del cuerpo cilíndrico:

$$t_c = \frac{P_c \cdot R_{int,c}}{S \cdot E - 0.6 \cdot P_c} + C. A. \quad Ecuación 11.3.3.9$$

Dónde:

- t_c : Espesor del cilindro (mm).
- P_c : Presión interna del cilindro (atm).
- $R_{int,c}$: Radio interno del cilindro (mm).
- S : Esfuerzo del material (atm).
- E : Factor de soldadura (0.85).
- C.A.: Tolerancia de corrosión (2 mm).

La temperatura de diseño es de $94.92^\circ\text{C} = 202.86^\circ\text{F}$, de la misma manera que en el cálculo del esfuerzo del material para el cabezal se hace para el cilindro que conforma el tanque. Por lo tanto corresponde a una $S = 1082.48$ bar.

$$t_c = \frac{4.22 \text{ bar} \cdot 1500 \text{ mm}}{1082.48 \text{ atm} \cdot 0.85 - 0.6 \cdot 4.22 \text{ bar}} + 2 \text{ mm} = 8.90 \text{ mm}$$

Para disminuir costes y que el diseño no sea complejo se decide un grosor estándar de **10 mm**.

Para que el diseño, montaje y mantenimiento sea más fácil y con el objetivo de aminorar costes se decide utilizar un mismo grosor de chapa para todo el diseño, utilizando el espesor más grande entre el cabezal y el cilindro, un valor de **15 mm**.

Una vez conocido el espesor que se usará para el diseño de todo el equipo, se determina el diámetro externo del tanque comprobando que se corresponde con el diámetro externo del cabezal con la misma expresión *Ecuación 11.3.3.8* anterior:

$$D_{ext,tanque} = D_{tanque} + 2 \cdot t_c$$

Dónde:

- $D_{ext, tanque}$: Diámetro externo del tanque (m).
- D_{tanque} : Diámetro interno del tanque (m).
- t_c : Espesor del cilindro (m).

Por lo tanto se sustituyen los valores:

$$D_{ext,tanque} = 3 \text{ m} + 2 \cdot 0.015 \text{ m} = 3.03 \text{ m}$$

Altura de los cabezales

Se determina la altura de los cabezales según las ecuaciones de proporcionadas por la página web de “Koenig-co”, proveedora de cabezales.

$$DH = 0.1935 \cdot D_{tanque} - 0.455 \cdot t_{cab.} \quad Ecuación 11.3.3.10$$

$$SF = 3.5 \cdot t_{cab.} \quad Ecuación 11.3.3.11$$

$$TH = SF + DH \quad Ecuación 11.3.3.12$$

Dónde:

D_{tanque} : Diámetro interno del tanque (m).

$t_{cab.}$: Espesor del cabezal (m).

Se sustituyen los valores en las ecuaciones:

$$DH = 0.1935 \cdot 3000 \text{ mm} - 0.455 \cdot 15 \text{ mm} = 573.68 \text{ mm}$$

$$SF = 3.5 \cdot 15 \text{ mm} = 52.50 \text{ mm}$$

$$TH = 573.68 \text{ mm} + 52.50 \text{ mm} = 626.18 \text{ mm} = 0.63 \text{ m}$$

Se obtiene una altura de los cabezales de **0.63 m**.

Altura del tanque

Se procede a calcular la altura del tanque a partir de la siguiente *Ecuación 11.3.3.13*:

$$H_{Total} = H + 2 \cdot H_{cab.} \quad Ecuación 11.3.3.13$$

Dónde:

- H_{Total} : Altura total del tanque (m).
- H : Altura del tanque (m).
- $H_{cab.}$: Altura del cabezal (m).

Se obtiene la altura total del tanque:

$$H_{Total} = 5 \text{ m} + 2 \cdot 0.63 \text{ m} = 6.26 \text{ m}$$

11.3.3.5. Agitación

Debido a que se trata de un tanque de mezcla donde su contenido está en estado líquido, por lo tanto, se instala un sistema de agitación para mantener el contenido homogeneizado.

Los principales tipos de agitadores que se usan en la industria son el de hélice, de paletas y de turbina.

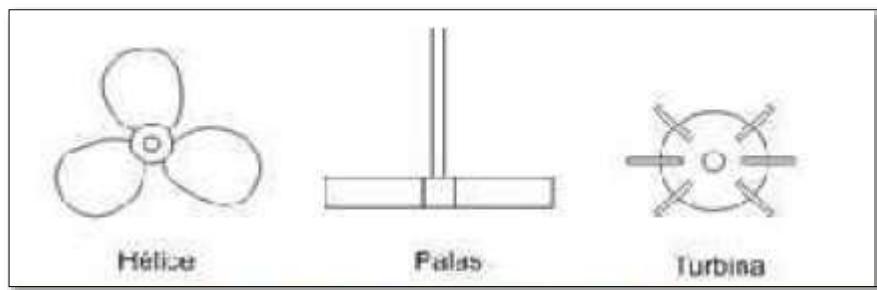


Figura 11.3.3.4. Tipos de agitadores.

Se escoge un agitador de turbina, ya que es adecuado para este proceso y que trabaja en un amplio rango de viscosidad y que favorece a que la mezcla se lo más homogénea posible. Este tipo de agitador trabaja entre 30 - 500 rpm y puede tener entre 4 y 14 palas de mezcla. En este caso se decide trabajar a **200 rpm y 6 palas de mezcla**. Además, se colocan 4 placas deflectoras, siendo este un valor estándar, y de esta manera se evitan posibles formaciones de vórtices.

Una vez escogido el tipo de agitador se calculan sus dimensiones teniendo en cuenta las relaciones geométricas de la siguiente figura obtenida bibliográficamente:

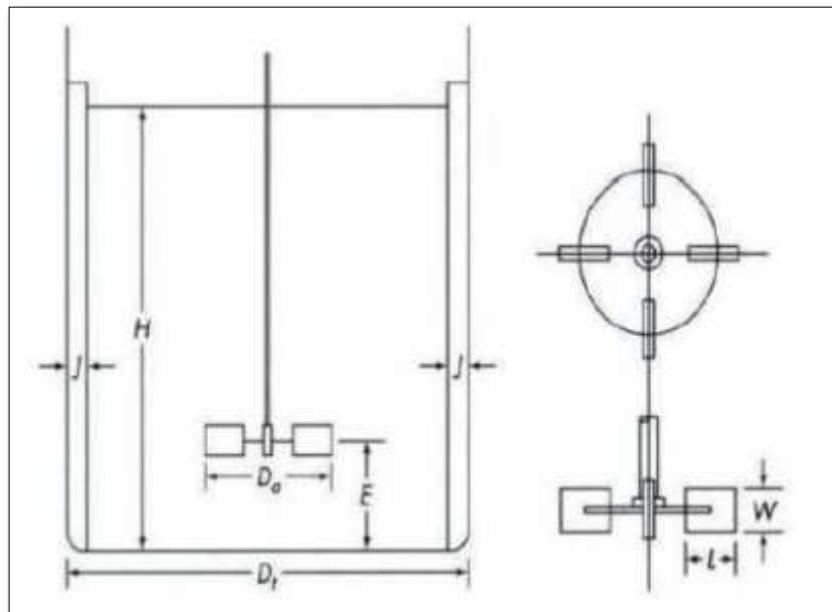


Figura 11.3.3.5. Agitador de turbina de palas.

Relaciones geométricas:

$$D_a/D_t = \frac{1}{3}$$

$$j/D_t = \frac{1}{12}$$

$$E/D_t = \frac{1}{3}$$

$$W/D_a = \frac{1}{5}$$

$$L/D_a = \frac{1}{4}$$

Dónde:

- D_a : Diámetro del agitador (m).
- D_t : Diámetro interno del reactor (m).
- j : Ancho de las placas deflectoras (m).
- E : Altura desde la turbina hasta el fondo del reactor (m).
- W : Altura de las palas de la turbina (m).
- L : Ancho de las palas de la turbina (m).

Se sustituyen los valores en las relaciones para el dimensionamiento del tanque:

$$D_a = \frac{1}{3} \cdot 3000 \text{ mm} = 1000 \text{ mm} = 1 \text{ m}$$

$$j = \frac{1}{12} \cdot 3000 \text{ mm} = 250 \text{ mm} = 0.25 \text{ m}$$

$$E = \frac{1}{3} \cdot 3000 \text{ mm} = 1000 \text{ mm} = 1 \text{ m}$$

$$W = \frac{1}{5} \cdot 1 \text{ m} = 0.20 \text{ m}$$

$$L = \frac{1}{4} \cdot 1 \text{ m} = 0.25 \text{ m}$$

A continuación se calcula la potencia que tendrá el agitador a partir del número de Reynolds de agitación con la siguiente *Ecuación 11.3.3.14*:

$$Re = \frac{\rho \cdot n \cdot Da^2}{\mu} \quad Ecuación 11.3.3.14$$

Dónde:

- Re: Número de Reynolds.
- ρ : Densidad de la mezcla (kg/m^3).
- n: Revoluciones del agitador, 200 rpm (rps).
- Da: Diámetro del agitador (m).
- μ : Viscosidad de la mezcla ($\text{kg}/\text{m} \cdot \text{s}$)

$$Re = \frac{975.4 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 3.33 \text{ rps} \cdot (1 \text{ m})^2}{6.04 \cdot 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}} = 5377619.21$$

Conocido el valor de Re, gráficamente se puede obtener el número de potencia (Np) que permitirá conocer la potencia necesaria requerida por el agitador del tanque de mezcla.

La siguiente *Figura 11.3.3.6* se obtiene Np a partir del valor de $Re = 5.38 \cdot 10^6$.

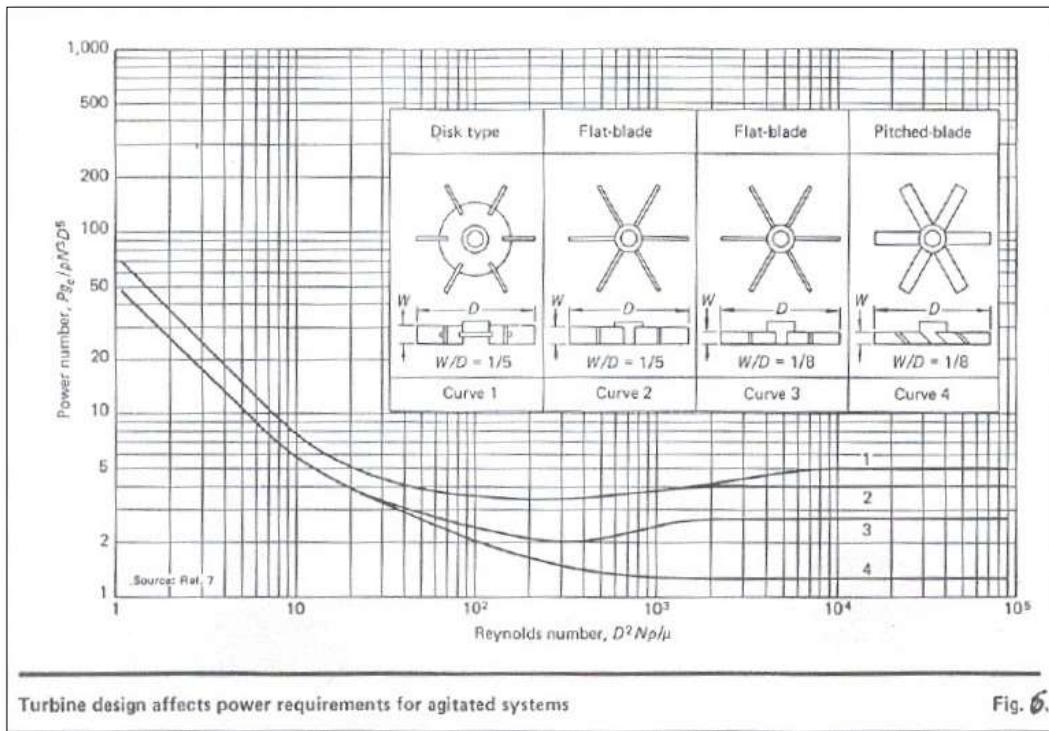


Fig. 6.

Figura 11.3.3.6. Número de potencia en función de Reynolds.

El tipo de agitador que se utiliza corresponde a la Curva 1 y debido a que el número de Re es mayor a 10^5 , se considera un valor constante siendo este un valor de $Np=5$.

Seguidamente se calcula la potencia del agitador a partir de la ecuación que se obtiene de la *Figura 11.3.3.6* anterior. Se hace mediante la siguiente expresión:

$$P = \frac{Np \cdot D a^5 \cdot n^3 \cdot \rho}{g} \quad \text{Ecuación 11.3.3.15}$$

Dónde:

- P: Potencia del agitador (kW).
- Da: Diámetro del agitador (m).
- n: Revoluciones del agitador, 200 rpm (rps).
- ρ : Densidad de la mezcla (kg/m^3).
- g: Aceleración de la gravedad (m/s^2).

Se sustituyen los valores en la ecuación:

$$P = \frac{5 \cdot (1 \text{ m})^5 \cdot (3.33 \text{ rps})^3 \cdot 975.4 \text{ kg/m}^3}{9.81 \text{ m/s}^2} \cdot \frac{1 \text{ kW}}{1000 \text{ W}} = 18.36 \text{ kW}$$

Se obtiene una potencia de **18.36 kW**.

Finalmente, se comprueba que el diseño será el correcto calculando la relación entre la potencia del agitador y el volumen de la mezcla según la ecuación:

$$\text{Power} = \frac{P}{V_{\text{mezcla}}} \quad \text{Ecuación 11.3.3.16}$$

Dónde:

- V_{mezcla} : Volumen de la mezcla (m^3).

$$\text{Power} = \frac{18.36 \text{ kW}}{16.57 \text{ m}^3} = 1.11 \frac{\text{kW}}{\text{m}^3}$$

Se verifica que el valor corresponda al rango de valores cuando su aplicación es una mezcla de líquidos, siendo este rango de 1 -1.5, tal y como se puede observar en la siguiente *Figura 11.3.3.7*.

Agitation	Applications	Power, kW/m^3
Mild	Blending, mixing	0.04–0.10
	Homogeneous reactions	0.01–0.03
Medium	Heat transfer	0.03–1.0
	Liquid-liquid mixing	1.0–1.5
Severe	Slurry suspension	1.5–2.0
	Gas absorption,	1.5–2.0
	Emulsions	1.5–2.0
Violent	Fine slurry suspension	> 2.0

Figura 11.3.3.7. Potencia de agitación.

El valor obtenido se encuentra dentro del rango, por lo tanto se da por válido el diseño de la agitación del tanque.

11.3.3.6. Peso del tanque

Peso del tanque vacío

Se ha de conocer el volumen del tanque para poder calcular el peso en vacío. Por eso, primero se calcula el volumen de los cabezales de la siguiente manera:

→ Cálculo del volumen interno del cabezal:

$$V_{\text{int,cab.}} = 0.1 \cdot (D_{\text{tanque}})^3 \quad \text{Ecuación 11.3.3.17}$$

Dónde:

- $V_{\text{int,cab.}}$: Volumen interior del cabezal (m^3).
- D_{tanque} : Diámetro interno del tanque (m).

$$V_{\text{int,cab.}} = 0.1 \cdot (3 \text{ m})^3 = 2.70 \text{ m}^3$$

→ Se calcula el volumen externo de los cabezales:

$$V_{\text{ext,cab.}} = 0.1 \cdot (D_{\text{tanque}} + t_{\text{cab.}})^3 \quad \text{Ecuación 11.3.3.18}$$

Dónde:

- $V_{\text{ext,cab.}}$: Volumen interior del cabezal (m^3).
- D_{tanque} : Diámetro interno del tanque (m).
- $t_{\text{cab.}}$: Espesor del cabezal (m).
-

$$V_{\text{ext,cab.}} = 0.1 \cdot (3 \text{ m} + 0.015 \text{ m})^3 = 2.741 \text{ m}^3$$

La diferencia de estos valores será el volumen que ocupa la pared del cabezal:

$$V_{\text{pared cab.}} = V_{\text{ext,cab.}} - V_{\text{int,cab.}} \quad \text{Ecuación 11.3.3.19}$$

Dónde:

- $V_{\text{pared cab.}}$: Volumen de la pared del cabezal (m^3).
- $V_{\text{ext,cab.}}$: Volumen exterior del cabezal (m^3).
- $V_{\text{int,cab.}}$: Volumen interior del cabezal (m^3).

$$V_{\text{pared cab.}} = 2.74 \text{ m}^3 - 2.70 \text{ m}^3 = 0.041 \text{ m}^3$$

De la misma manera se calcula el volumen interno del cilindro que conforma el tanque:

→ Cálculo del volumen interno del cilindro:

$$V_{\text{int},c} = \pi \cdot \left(\frac{D_{\text{tanque}}}{2}\right)^2 \cdot H \quad \text{Ecuación 11.3.3.20}$$

Dónde:

- $V_{\text{int},c}$: Volumen interior del cilindro (m^3).
- D_{tanque} : Diámetro interno del tanque (m).
- H : Altura del cilindro (m).

$$V_{\text{int},c} = \pi \cdot \left(\frac{3 \text{ m}}{2}\right)^2 \cdot 5 \text{ m} = 35.34 \text{ m}^3$$

→ Se calcula el volumen externo de los cabezales:

$$V_{\text{ext},c} = \pi \cdot \left(\frac{D_{\text{ext,tanque}}}{2}\right)^2 \cdot H \quad \text{Ecuación 11.3.3.21}$$

Dónde:

- $V_{\text{ext},c}$: Volumen interior del cilindro (m^3).
- $D_{\text{ext,tanque}}$: Diámetro interno del tanque (m).
- H : Altura del cilindro (m).

$$V_{\text{ext},c} = \pi \cdot \left(\frac{3.03 \text{ m}}{2}\right)^2 \cdot 5 \text{ m} = 36.05 \text{ m}^3$$

La diferencia entre estos dos volúmenes es el volumen de la pared del cilindro:

$$V_{\text{pared cil.}} = V_{\text{ext,cil.}} - V_{\text{int,cil.}} \quad \text{Ecuación 11.3.3.22}$$

Dónde:

- $V_{\text{pared cil.}}$: Volumen de la pared del cilindro (m^3).
- $V_{\text{ext,cil.}}$: Volumen exterior del cilindro (m^3).
- $V_{\text{int,cil.}}$: Volumen interior del cilindro (m^3).

Los valores en la ecuación:

$$V_{\text{pared cil.}} = 36.05 \text{ m}^3 - 35.34 \text{ m}^3 = 0.71 \text{ m}^3$$

A continuación se calcula el volumen de la pared del equipo, mediante la siguiente expresión:

$$V_{\text{pared tanque}} = V_{\text{pared,cil.}} + 2 \cdot V_{\text{pared,cab.}} \quad \text{Ecuación 11.3.3.23}$$

Dónde:

- $V_{\text{pared tanque}}$: Volumen de la pared del tanque (m^3).
- $V_{\text{pared, cil.}}$: Volumen pared del cilindro (m^3).
- $V_{\text{pared, cab.}}$: Volumen pared del cabezal (m^3).
-

$$V_{\text{pared tanque}} = 0.71 \text{ m}^3 + 2 \cdot 0.041 \text{ m}^3 = 0.792 \text{ m}^3$$

Se obtiene el peso del tanque en vacío a partir de la densidad del acero inoxidable AISI 316L que es 7960 kg/m^3 , de la siguiente manera:

$$M_{\text{tanque vacío}} = 1.1 \cdot V_{\text{pared tanque}} \cdot \rho_{\text{acero inox.}} \quad \text{Ecuación 11.3.3.24}$$

Dónde:

- $M_{\text{tanque vacío}}$: Peso del equipo lleno de agua (kg).
- $V_{\text{pared tanque}}$: Volumen de la pared del tanque (m^3).
- $\rho_{\text{acero inox.}}$: Densidad del acero inoxidable AISI 316L (kg/m^3).

$$M_{\text{tanque vacío}} = 1.1 \cdot 0.792 \text{ m}^3 \cdot 7960 \text{ kg/m}^3 = 6934.75 \text{ kg}$$

En toneladas:

$$M_{\text{tanque vacío}} = 6.93 \text{ Tn}$$

Peso del tanque lleno de agua

Para conocer el peso del tanque lleno de agua a modo de prueba, se calcula el volumen del tanque de la siguiente manera:

$$V_{\text{tanque}} = V_{\text{int,c}} + 2 \cdot V_{\text{int,cab.}} \quad \text{Ecuación 11.3.3.25}$$

Dónde:

- V_{tanque} : Volumen del tanque (m^3).
- $V_{\text{int,c.}}$: Volumen interior del cilindro (m^3).
- $V_{\text{int, cab.}}$: Volumen interior del cabezal (m^3).

$$V_{\text{tanque}} = 35.34 \text{ m}^3 + 2 \cdot 2.70 \text{ m}^3 = 40.74 \text{ m}^3$$

A continuación, se calcula el peso del tanque con agua:

$$M_{\text{tanque con agua}} = M_{\text{tanque vacío}} + V_{\text{tanque}} \cdot \rho_{\text{agua}} \quad \text{Ecuación 11.3.3.26}$$

Dónde:

- $M_{\text{tanque con agua}}$: Peso del equipo lleno de agua (kg).
- $M_{\text{tanque vacío}}$: Masa total del equipo vacío (kg).
- V_{tanque} : Volumen del tanque (m^3).
- ρ_{agua} : Densidad del agua (kg/m^3).

$$M_{\text{tanque con agua}} = 6934.75 \text{ kg} + 40.74 \text{ m}^3 \cdot 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 47674.75 \text{ kg}$$

En toneladas:

$$M_{\text{tanque con agua}} = 47.67 \text{ tn}$$

Peso del tanque en operación

Se procede a calcular el peso del tanque en operación, teniendo en cuenta la densidad del fluido y el volumen del tanque.

$$M_{\text{tanque en op.}} = M_{\text{tanque vacío}} + V_{\text{tanque}} \cdot \rho_{\text{mezcla}} \quad \text{Ecuación 11.3.3.27}$$

Dónde:

- $M_{\text{tanque en op.}}$: Peso del equipo en operación (kg).
- $M_{\text{tanque vacío}}$: Masa total del tanque vacío (kg).
- V_{tanque} : Volumen del tanque (m^3).
- ρ_{mezcla} : Densidad de la mezcla (kg/m^3).

$$M_{\text{tanque en op.}} = 6934.75 \text{ kg} + 40.74 \text{ m}^3 \cdot 975.4 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 46672.55 \text{ kg}$$

En toneladas:

$$M_{\text{tanque en op.}} = 46.67 \text{ tn}$$

11.3.3.7. Aislamiento

Hacer uso de un aislante es necesario debido a que la temperatura del tanque es 74.92 °C y se ha de usar como medida de seguridad, ya que las paredes pueden ser un peligro para los operarios y demás trabajadores. Para asegurar que no haya intercambio de calor con el exterior se decide aislar el equipo con una lana mineral. Por ello, se elige aislar el equipo con lana de roca, debido a que es más aislante.

El espesor requerido para el aislante se calcula con la siguiente ecuación:

$$X = \frac{30}{3.6 \cdot \left(\frac{\Delta T}{D_{ext,c}} \right)^{\frac{1}{4}}} \quad \text{Ecuación 11.3.3.28}$$

Dónde:

- X: Espesor del aislante (cm).
- ΔT : Diferencia de temperaturas entre el interior y exterior del reactor, siendo 20°C la temperatura media en Martorell, y la temperatura en el interior del tanque es 74.92°C.
- $D_{ext,c}$: Diámetro externo del cilindro (m).

Por lo tanto,

$$X = \frac{30}{3.6 \cdot \left(\frac{74.92^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}}{3.03 \text{ m} \cdot 100 \text{ cm}} \right)^{\frac{1}{4}}} = 12.77 \text{ cm}$$

El aislamiento se recubre con una capa de aluminio (0.6 mm) para protegerlo de las condiciones meteorológicas de Martorell.

Finalmente, se necesita conocer el volumen aislante necesario para todo el equipo:

$$V_{aislante} = S_{ext,reactor} \cdot X \quad \text{Ecuación 11.3.3.29}$$

$$S_{ext,tanque} = S_{ext,c} + S_{ext,cab.} \quad \text{Ecuación 11.3.3.30}$$

Dónde:

- $V_{aislante}$: Volumen del aislante para todo el equipo (m^3)
- $S_{ext,tanque}$: Sección externa del tanque (m^2)
- X: Espesor del aislante (cm)
- $S_{ext,c}$: Sección externa del cilindro (m^2)

$$S_{ext,c} = \pi \cdot D_{ext,c} \cdot H_{tanque} = \pi \cdot 3.03 \text{ m} \cdot 5 \text{ m} = 47.60 \text{ m}^2$$

- $S_{ext,cab.}$: Sección externa del cabezal (m^2)

$$S_{ext,cab.} = 0.931 \cdot (D_{ext,c})^2 = 0.931 \cdot (3.03 \text{ m})^2 = 8.55 \text{ m}^2$$

Por lo tanto:

$$S_{ext,tanque} = 47.60 \text{ m}^2 + 8.55 \text{ m}^2 = 56.15 \text{ m}^2$$

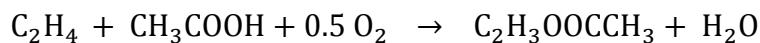
Seguidamente se obtiene el volumen del aislante necesario:

$$V_{aislante} = 56.15 \text{ m}^2 \cdot \left(12.77 \text{ cm} \cdot \frac{1 \text{ m}}{100 \text{ cm}} \right) = 7.17 \text{ m}^3$$

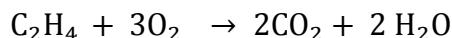
11.4. DISEÑO DEL REACTOR MULTITUBULAR DE LECHO FIJO R-201

11.4.1. Introducción

La formación del VAM se lleva a cabo a partir de la oxoacetilación del etileno que reacciona con el ácido acético además de oxígeno. La reacción estequiométrica se define en la siguiente ecuación:



La combustión de etileno a CO_2 es una reacción no deseada, ya que disminuye el rendimiento y complica la eliminación del calor de reacción. Esta reacción se describe de la siguiente forma:



Las condiciones de reacción se obtienen a partir del documento “*Vinyl Acetate Monomer Process*” que se lleva a cabo a una presión de 10 bares y una temperatura de 150°C. La conversión de la reacción principal es baja, siendo esta del 24.9%. La segunda reacción tiene una conversión de 0.55 %, de esta manera se reduce la producción de CO_2 .

La reacción se produce en fase gas debido a un mejor rendimiento y así se evitan problemas de corrosión. La mayor parte de reacciones que son en fase gas se llevan a cabo en reactores tubulares, pudiendo ser constituidos por uno o múltiples tubos.

Tratándose de un sistema versátil en cuanto al diseño en el que se puede personalizar la longitud y diámetro de los tubos, así como también permite operar a diferentes presiones y temperaturas. En este proyecto se utiliza un reactor catalítico multitubular.

REACTOR DE LECHO FIJO MULTITUBULAR

Para reacciones que tienen lugar en un lecho fijo catalítico es habitual el uso de reactores multitubulares como se ha mencionado anteriormente. Estos reactores están constituidos por diferentes tubos empacados con partículas de catalizados en su interior y operan en posición vertical.

El catalizador que promueve esta reacción es el Paladio, un catalizador moderno que contiene Au en su formulación química, con un 0.2% - 1.5 % en peso, el cual se manifiesta con mayor actividad y selectividad. La presencia de un poco de agua es necesaria para activar el catalizador.

En el apartado de especificaciones 1.5, se introduce ampliamente las propiedades que caracterizan al catalizador. A continuación, en la *Tabla 11.4* se muestran algunas de las propiedades que se tendrán en cuenta para el diseño del reactor.

Tabla 11.4.1. Propiedades del catalizador.

Propiedades Catalizador	
Peso molecular (g/mol)	106.4
Densidad (kg/ m ³)	1000
% Peso	0.01
Dispersión	0.4
Diámetro partícula (mm)	5
Fracción de vacío, ϵ	0.45

En cuanto a la formación del VAM, se trata de un proceso exotérmico, por lo tanto, requiere de un sistema de intercambio de calor para asegurar que la temperatura de operación se mantenga constante.

Debido a la necesidad de eliminar calor no es posible utilizar un solo tubo asumiendo que sería de un diámetro elevado, es por eso que se diseña un reactor conformado por varios tubos en un mismo cuerpo cilíndrico. El intercambio de calor se lleva a cabo haciendo circular el fluido térmico entre los tubos dentro de la coraza del reactor. El fluido térmico será agua a una temperatura de 145°C a una presión de 4.2 atm.

Una de las desventajas del reactor multitubular es el difícil control de la temperatura de su interior. Por lo tanto, debido a este inconveniente se modeliza que el flujo es

turbulento ($Re > 3000$), de manera que se asume una operación como un reactor flujo pistón.

Este hecho implica que la sección transversal en cualquier punto en cuanto a condiciones como la velocidad, la presión, la temperatura y composición son uniformes y no existen variaciones radiales.

Por lo tanto, para definir los parámetros de diseño del reactor R-201, se toma como referencia el documento “*Vinyl Acetate Monomer Process*” (consultar bibliografía); a partir del cual se obtienen las condiciones de operación mencionadas anteriormente y que servirá como guía para la realización de todo el proceso. Dicho documento hace referencia al diseño de una planta de VAM con una capacidad de 100 mil toneladas/año durante un tiempo de funcionamiento efectivo de 8400 h. El proceso a seguir se hace de forma análoga; manteniendo las conversiones, así como la temperatura y la presión de operación. No obstante, para el cálculo de algunos parámetros de diseño del reactor se parte escalando estos valores a fin de obtener un resultado similar al de referencia.

Un dato relevante para el diseño es la cinética, pero debido a que no se dispone de datos suficientes, se toma la productividad del catalizador ya que es un valor que relaciona la actividad del catalizador con respecto a la producción. De esta manera se obtiene que:

Productividad del catalizador de 326.6 kg VAM/ h·m³ catalizador

Partiendo de esta relación y de los balances de materia que se exponen a continuación se obtiene una producción de 9728.283 kg VAM/h, se calcula la cantidad de catalizador sin porosidad de la siguiente manera:

$$V_{\text{cat. poroso}} = 9728.283 \frac{\text{kg VAM}}{\text{h}} \cdot \frac{1 \text{ m}^3 \text{ catalizador}}{326.6 \frac{\text{kg VAM}}{\text{h}}}$$

$$V_{\text{cat. poroso}} = 29.786 \text{ m}^3 \text{ catalizador poroso}$$

A partir de este valor se puede obtener el volumen de catalizador teniendo en cuenta su porosidad. Se obtiene de esta forma:

$$V_{\text{cat. sin porosidad}} = V_{\text{cat. poroso}} \cdot (1 - \varepsilon) \quad \text{Ecuación 11.4.1}$$

Se sustituyen los valores en la ecuación:

$$V_{\text{cat. sin porosidad}} = 29.786 \text{ m}^3 \text{ catalizador} \cdot (1 - 0.45)$$

$$V_{\text{cat. sin porosidad}} = 16.382 \text{ m}^3 \text{ de catalizador sin porosidad}$$

Por lo tanto, se calcula la cantidad de catalizador necesaria a la entrada del reactor:

$$W_{\text{catalizador}} = V_{\text{cat. poroso}} \cdot \rho_{\text{cat.}} \quad \text{Ecuación 11.4.2}$$

Donde:

- $W_{\text{catalizador}}$: Cantidad de catalizador (kg).
- $V_{\text{cat. poroso}}$: Volumen catalizador poroso (m^3).
- $\rho_{\text{cat.}}$: Densidad del catalizador (kg/m^3).

$$W_{\text{catalizador}} = 29.786 \text{ m}^3 \cdot \frac{1000 \text{ kg}}{1 \text{ m}^3} = 29786 \text{ kg de catalizador}$$

11.4.2. Balance de Materia

Antes de proceder con el diseño del reactor, se ha comprobar que se cumple el balance de materia en función de su conversión y composiciones a la entrada, datos que son proporcionados por la patente. Se ha de cumplir:

$$E + G = S + A$$

Cada término quede definido y se obtiene como:

- **Entrada (E)** : La corriente de entrada al reactor proviene del mezclador M-202, donde se homogeneízan 4 corrientes y posteriormente pasan por un intercambiador de calor E-202, antes de la entrada al reactor:
 - Corriente de etileno del tanque de almacenamiento.
 - Corriente de oxígeno del tanque de almacenamiento.
 - Corriente de ácido acético procedente de un mezclador donde se une el ácido acético de los tanques de almacenamiento y de la recirculación desde la torre de destilación.
 - Corriente de recirculación de gases, el cual contiene etileno, CO_2 , oxígeno y una mínima cantidad de ácido acético.

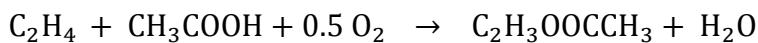
El valor final de producción anual es 70000 Tn/año, por lo tanto a partir de este valor se calcula el caudal molar que se ha producir de VAM, para cumplir con la cantidad deseada. De manera que:

$$70000 \frac{\text{Tn VAM}}{\text{año}} \cdot \frac{1 \text{ año}}{300 \text{ días}} \cdot \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ h}} \cdot \frac{1000 \text{ kg}}{1 \text{ tn}} \cdot \frac{1 \text{ kmol}}{86.09 \text{ kg VAM}} = 112.93 \frac{\text{kmol}}{\text{h}} \approx 113 \frac{\text{kmol VAM}}{\text{h}}$$

Se calcula el caudal molar a partir del caudal molar obtenido, teniendo en cuenta que $\text{PM}_{\text{VAM}} = 86.09 \text{ Kg/kmol}$.

$$113 \frac{\text{kmol VAM}}{\text{h}} = 9728.283 \frac{\text{kg VAM}}{\text{h}}$$

Las reacciones que se llevan a cabo en el reactor, se conoce que son las siguientes:



Por lo tanto, a partir de relación estequiometria se obtiene el caudal molar de ácido acético a la entrada del reactor, ya que es el reactivo limitante de la primera reacción. De la siguiente forma se obtiene la cantidad de ácido acético que entra al reactor que proviene de los tanques de almacenamiento, sea del tanque T101 o T102, conociendo la relación 1:1 entre ácido acético y VAM.

$$70000 \frac{\text{Tn VAM}}{\text{año}} \cdot \frac{1 \text{ año}}{300 \text{ días}} \cdot \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ h}} \cdot \frac{1000 \text{ kg}}{1 \text{ tn}} \cdot \frac{1 \text{ kmol VAM}}{86.09 \text{ kg VAM}} \cdot \frac{1 \text{ kmol Ac. acético}}{1 \text{ kmol VAM}}$$

$$= 112.93 \frac{\text{kmol Ac. acético}}{\text{h}} \approx 113 \frac{\text{kmol Ac. acético}}{\text{h}}$$

Teniendo en cuenta que $\text{PM}_{\text{Ácido Acético}} = 60 \text{ kg/kmol}$, se obtiene el caudal molar:

$$113 \frac{\text{kmol Ac. acético}}{\text{h}} = 6781.77 \frac{\text{kg Ac. acético}}{\text{h}}$$

También se tiene en cuenta el ácido acético que sale de la columna de destilación hacia un mezclador (M-202) donde se mezcla con el acético del tanque de almacenamiento. La corriente 40, que contiene ácido acético de la mencionada columna C-402 que cuenta con un caudal de 18903.855 kg Ac. acético/h.

Para el cálculo de la cantidad de etileno que entra al reactor, como etapa preliminar se presenta como referencia una selectividad del 94%, tal y como muestra el documento

antes descrito, a pesar de ello, para este proyecto se decide tomar un valor más conservador, seleccionado un valor del 92%.

La selectividad representa la cantidad del etileno con respecto a la cantidad que reacciona del ácido acético, es decir, el 92% del caudal másico del ácido acético que entra al reactor será la cantidad de etileno de entrada al mismo. Por lo tanto:

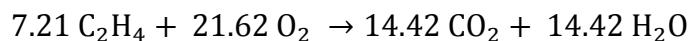
$$\frac{113 \text{ kmol Ác. acético/h}}{0.92} = 123.43 \frac{\text{kmol Etileno}}{\text{h}}$$

Teniendo en cuenta que $\text{PM}_{\text{Etileno}} = 28 \text{ kg/kmol}$, se obtiene el caudal másico:

$$123.43 \frac{\text{kmol Etileno}}{\text{h}} = 3454.477 \frac{\text{kg Etileno}}{\text{h}}$$

Debido a la relación estequiométrica se puede obtener el caudal molar de etileno que reacciona en la segunda reacción, sabiendo que la relación es 1:1 de ácido acético y etileno. Siendo el valor **7.21 kmol/h**.

Por lo tanto, la segunda reacción queda de la siguiente manera:



De la misma forma que el ácido acético se calcula el caudal de entrada de oxígeno:

$$70000 \frac{\text{tn VAM}}{\text{año}} \cdot \frac{1 \text{ año}}{300 \text{ días}} \cdot \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ h}} \cdot \frac{1000 \text{ kg}}{1 \text{ tn}} \cdot \frac{1 \text{ kmol VAM}}{86.09 \text{ kg VAM}} \cdot \frac{0.5 \text{ kmol O}_2}{1 \text{ kmol VAM}} = 56.44 \frac{\text{kmol O}_2}{\text{h}}$$

Y teniendo en cuenta el caudal de la segunda reacción, se obtiene:

$$\text{O}_2 = 56.44 \frac{\text{kmol O}_2}{\text{h}} + 21.62 \frac{\text{kmol O}_2}{\text{h}} = 78.06 \frac{\text{kmol O}_2}{\text{h}} = 2391.065 \frac{\text{kg O}_2}{\text{h}}$$

Por último, se considera la recirculación de gases a partir de la Black Box (B501), que contiene los siguientes compuestos y caudales:

Tabla 11.4.2. Corriente de recirculación de gases.

Recirculación Gases		
Corriente	Compuesto	Caudal (kg/h)
30	Etileno	27478.4853
	CO ₂	22004.8504
	Oxígeno	2088.9345
	Ácido Acético	1541.6017

Por lo tanto, a la entrada del reactor los caudales son los siguientes:

Tabla 11.4.3. Caudal de entrada al reactor.

Entrada			
Compuesto	Caudal molar	% Molar	Caudal (kg/h)
Ácido Acético	453.397	0.206	27227.228
Oxígeno	140.000	0.064	4480.000
Etileno	1102.630	0.502	30932.962
CO ₂	500.000	0.228	22004.850
TOTAL	2196.027	1	84645.041

- Generación (G):** El término de generación incluye todas las formaciones o descomposiciones de los productos. Este hecho se da debido a las conversiones que se llevan a cabo las cuales se muestran en la siguiente *Tabla 11.4.4*, de manera que la generación será la diferencia entre el caudal másico de entrada y de la salida de cada componente.

Tabla 11.4.4. Conversiones de los componentes.

Conversión	
Etileno	0.108
Ácido acético	0.249
O ₂	0.534

Expresión de la generación de cada componente:

$$G_i = M_{i,E} - M_{i,S} \quad \text{Ecuación 11.4.3}$$

Dónde:

- G_i : Generación del componente i (kg/h).
- $M_{i,E}$: Caudal másico del componente i a la entrada del reactor (kg/h).
- $M_{i,S}$: Caudal másico del componente i a la salida del reactor (kg/h).

La generación total será la suma de todos estos caudales, tendría que ser 0 la cual cosa significaría que se cumple el balance de materia, ya que la masa no se genera, ni se destruye.

- **Salida (S):** La corriente de salida del reactor contiene el caudal de los productos formados en las dos reacciones, además de los reactivos que no han reaccionado. Se realizan los siguientes cálculos para encontrar los caudales de salida de cada componente:

➤ Ácido acético:

$$M_{\text{AC.ACÉTICO},S} = M_{\text{AC.ACÉTICO},E} \cdot (1 - X_{\text{AC.ACÉTICO}}) \quad \text{Ecuación 11.4.4}$$

Dónde:

- $M_{\text{AC.ACÉTICO},S}$: Caudal másico del ácido acético a la salida (kg/h).
- $M_{\text{AC.ACÉTICO},E}$: Caudal másico del ácido acético a la entrada (kg/h).
- $X_{\text{AC.ACÉTICO}}$: Conversión del ácido acético.

$$M_{\text{AC.ACÉTICO},S} = 27227.22 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot (1 - 0.249) = 20441.386 \frac{\text{kg Ác. acético}}{\text{h}}$$

➤ Etileno:

$$M_{\text{ETILENO},S} = M_{\text{ETILENO},E} \cdot (1 - X_{\text{ETILENO}}) \quad \text{Ecuación 11.4.5}$$

Dónde:

- $M_{\text{ETILENO},S}$: Caudal másico del etileno a la salida (kg/h).
- $M_{\text{ETILENO},E}$: Caudal másico del etileno a la entrada (kg/h).
- X_{ETILENO} : Conversión del etileno.

$$M_{\text{ETILENO},S} = 30932.962 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot (1 - 0.108) = 27592.751 \frac{\text{kg Etileno}}{\text{h}}$$

➤ Oxígeno:

$$M_{\text{OXÍGENO},S} = M_{\text{OXÍGENO},E} \cdot (1 - X_{\text{OXÍGENO}}) \quad \text{Ecuación 11.4.6}$$

Dónde:

- $M_{\text{OXÍGENO},S}$: Caudal másico del oxígeno a la salida (kg/h).
- $M_{\text{OXÍGENO},E}$: Caudal másico del oxígeno a la entrada (kg/h).
- $X_{\text{OXÍGENO}}$: Conversión del oxígeno.

$$M_{Oxígeno,S} = 4480 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot (1 - 0.534) = 2089.811 \frac{\text{kg Oxígeno}}{\text{h}}$$

- Agua: a partir de la relación estequiométrica se puede obtener el caudal molar y posteriormente el másico.

$$70000 \frac{\text{tn VAM}}{\text{año}} \cdot \frac{1 \text{ año}}{300 \text{ días}} \cdot \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ h}} \cdot \frac{1000 \text{ kg}}{1 \text{ tn}} \cdot \frac{1 \text{ kmol VAM}}{86.09 \text{ kg VAM}} \cdot \frac{1 \text{ kmol H}_2\text{O}}{1 \text{ kmol VAM}} = 112.93 \frac{\text{kmol H}_2\text{O}}{\text{h}}$$

También se tendrá en cuenta el caudal de agua (14.42kmol/h) de la segunda reacción:

$$H_2\text{O} = 112.93 \frac{\text{kmol H}_2\text{O}}{\text{h}} + 14.42 \frac{\text{kmol H}_2\text{O}}{\text{h}} = 127.35 \frac{\text{kmol H}_2\text{O}}{\text{h}}$$

Teniendo en cuenta que $\text{PM}_{\text{Agua}} = 18 \text{ kg/kmol}$, se obtiene el caudal másico:

$$127.35 \frac{\text{kmol H}_2\text{O}}{\text{h}} = 2254.210 \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{h}}$$

- CO_2 : a partir de la relación estequiométrica se obtiene los moles que se forman en la segunda reacción.

$$14.42 \frac{\text{kmol CO}_2}{\text{h}} = 533.79 \frac{\text{kg CO}_2}{\text{h}}$$

Además, se suma el caudal que proviene de dióxido de carbono en la corriente de recirculación:

$$M_{\text{CO}_2,S} = M_{\text{CO}_2,R} + M_{\text{CO}_2,P} \quad \text{Ecuación 11.4.7}$$

Dónde:

- $M_{\text{CO}_2,S}$: Caudal másico del CO_2 a la salida (kg/h).
- $M_{\text{CO}_2,R}$: Caudal másico del CO_2 a la entrada desde la corriente de recirculación de gases (kg/h).
- $M_{\text{CO}_2,P}$: Caudal másico del CO_2 que se forma en la segunda reacción (kg/h).

$$M_{\text{CO}_2,S} = 22004.850 \frac{\text{kg}}{\text{h}} + 533.79 \frac{\text{kg}}{\text{h}} = 22538.640 \frac{\text{kg CO}_2}{\text{h}}$$

- **Acumulación (A):** Debido a que el proceso es en continuo, este término es igual a 0.

Una vez obtenidos todos los caudales, quedan reflejados en la siguiente *Tabla 11.4.5*, donde se observa que se cumple el balance de materia:

Tabla 11.4.5.Balance de materia del reactor.

	Entrada	Salida	Generación
	Caudal (kg/h)		
Etileno	30932.96	27592.75	-3340.21
CO ₂	22004.85	22538.64	533.79
Oxígeno	4480.00	2089.81	-2390.19
Acetato Vinilo	0.00	9728.28	9728.28
Ácido Acético	27227.23	20441.39	-6785.84
Agua	0.00	2254.21	2254.21
TOTAL	84645	84645	0

11.4.3. Dimensionamiento

Para el diseño y dimensionamiento del reactor se dispone en un principio de datos proporcionados por el documento “*Vinyl Acetate Monomer Process*” (consultar bibliografía) . Se parte de las siguientes propiedades de tubos que se pueden ver en la siguiente *Tabla 11.4.6*:

Tabla 11.4.6. Propiedades de los tubos.

Propiedades de tubos	
Nº tubos	4900
Diámetro interno	37 mm
Longitud	7.5 m

Se parte de los datos que corresponden a una producción de VAM de 100 mil Tn/año, escalándolos para el 70% de esta producción, este supuesto corresponde a un número de tubos de 3430, de donde se obtiene un volumen de reactor inicial de 27.66 m³; el cual posteriormente será sobredimensionado por temas de seguridad. Asumiendo que el volumen del reactor tiene que ser como mínimo mayor o igual al volumen que ocupa el catalizador, que corresponde a 29.79 m³, se prevé que a la hora de hacer el sobredimensionamiento de los tubos se obtenga un volumen mayor al del catalizador.

Seguidamente se vuelve a calcular de manera iterativa para obtener el valor real del tiempo de residencia.

En cuanto a la longitud de los tubos, se decide mantenerla ya que al tratarse de un flujo pistón, donde la composición de cada diferencial de volumen va variando con respecto a la longitud del tubo, es decir, la conversión en función de la posición.

Previamente a la aplicación de estos valores, se determina el tiempo de contacto entre el reactivo y el catalizador. Se calcula de la siguiente manera:

$$\tau = \frac{V_{\text{cat,p}} - V_{\text{cat,sp}}}{Q} \quad \text{Ecuación 11.4.8}$$

Dónde:

- τ : Tiempo de residencia (s).
- Q : Caudal volumétrico de entrada al reactor (m^3/h).
- $V_{\text{cat,p}}$: Volumen del catalizador poroso (m^3).
- $V_{\text{cat,sp}}$: Volumen del catalizador sin porosidad (m^3).

$$\tau = \frac{29.786 \text{ m}^3 - 16.382 \text{ m}^3}{84645.041 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{10.96 \text{ kg}}} = 1.74 \cdot 10^{-3} \text{ h} \cdot \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}} = 6.25 \text{ s}$$

De forma equivalente se puede hacer el cálculo del tiempo de residencia de la siguiente manera:

$$\tau = \frac{H}{v} \quad \text{Ecuación 11.4.9}$$

Dónde:

- τ : Tiempo de residencia (s).
- H : Longitud del tubo (m).
- v : Velocidad del fluido en el tubo (m/s).

De esta manera se puede obtener el valor de la velocidad de los reactivos que circulan por los tubos del reactor a partir de la longitud de tubos.

Por lo tanto, se calcula la velocidad del fluido con la siguiente expresión:

$$v_{\text{tubo}} = \frac{H}{\tau} \quad \text{Ecuación 11.4.10}$$

$$v_{tubo} = \frac{7.5 \text{ m}}{6.25 \text{ s}} = 1.20 \text{ m/s}$$

La velocidad obtenida depende de la presión y de la densidad del gas, a una presión de 10 bares, considerándose esta alta, se considera un rango de 1-10 m/s.

Con estos parámetros se pueden determinar el volumen del tubo y el caudal volumétrico del tubo para seguidamente conocer volumen del reactor a partir del número de tubos para llevarse a cabo la producción de VAM.

Para el cálculo del volumen del tubo se hace de la siguiente manera:

$$V_{tubo} = \frac{\pi}{4} \cdot D_{int,t}^2 \cdot L_t \quad Ecuación 11.4.11$$

Dónde:

- V_{tubo} : Volumen del tubo (m^3).
- $D_{int,t}$: Diámetro interno del tubo (m).
- L_t : Longitud del tubo (m).

$$V_{tubo} = \frac{\pi}{4} \cdot (0.037 \text{ m})^2 \cdot 7.5 \text{ m} = 0.0081 \text{ m}^3$$

Seguidamente, se calcula el caudal de reactor que circula por un tubo, de manera que el tiempo de residencia se mantenga. Se obtiene con la siguiente ecuación:

$$Q_{tubo} = \frac{V_{tubo}}{\tau} \quad Ecuación 11.4.12$$

Dónde:

- Q_{tubo} : Caudal volumétrico de los reactivos por tubo (m^3/h).
- V_{tubo} : Volumen del tubo (m^3).
- τ : Tiempo de residencia (h).

$$Q_{tubo} = \frac{0.0081 \text{ m}^3}{6.25 \text{ s} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}}} = 4.67 \text{ m}^3/\text{h}$$

A continuación, se calcula el volumen del reactor mediante la siguiente ecuación:

$$V_{reactor} = N_t \cdot L_t \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D_i^2 \quad Ecuación 11.4.13$$

Dónde:

- V_{reactor} : Volumen del reactor (m^3).
- N_t : Número de tubos.
- L_t : Longitud de los tubos (m).
- D_{int} : Diámetro interno de los tubos (m).

$$V_r = 3430 \cdot 7.5 \text{ m} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (0.037\text{m})^2 = 27.66 \text{ m}^3$$

Se obtiene un volumen del reactor de **27.66 m³**.

Debido a que no se puede superar un 8% molar de oxígeno dentro del reactor, como precaución a posibles accidentes que puedan darse, se toma como medida de seguridad añadir nitrógeno cuando la concentración de oxígeno exceda la mencionada anteriormente. Por lo tanto, el volumen del tubo ha de sobredimensionar. Se aplica un factor de seguridad del 10%.

$$V_{\text{tubo,sobredimensionado}} = 1.10 \cdot V_{\text{tubo}}$$

$$V_{\text{tubo,sobredimensionado}} = 1.10 \cdot 0.0081 \text{ m}^3 = 0.0089 \text{ m}^3$$

A partir del volumen sobredimensionado se puede obtener el nuevo diámetro de tubo con el cual se hará el diseño, ya que la longitud de tubo será la misma para que se cumpla la conversión. Se utiliza la anterior *Ecuación 11.4.11* :

$$V_{\text{tubo}} = \frac{\pi}{4} \cdot D_{\text{int,t}}^2 \cdot L_t$$

La ecuación queda de la siguiente manera:

$$D_{\text{int,t}} = \sqrt{\frac{V_{\text{tubo}}}{\pi/4 \cdot L_t}}$$

Se sustituyen los valores en la anterior ecuación:

$$D_{\text{int,t}} = \sqrt{\frac{0.0089 \text{ m}}{\pi/4 \cdot 7.5 \text{ m}}} = 0.039 \text{ m}$$

Obtenido el nuevo valor del diámetro de tubo se recalcula el volumen del reactor. Se estima que el volumen sea mayor que el volumen del catalizador. Se hace mediante la siguiente expresión:

$$V_{\text{reactor}} = N_t \cdot L_t \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D_t^2 \quad \text{Ecuación 11.4.14}$$

Se sustituyen los valores, siendo $D_{\text{int},t} = 0.039 \text{ m}$.

$$V_{\text{reactor}} = 3430 \cdot 7.5 \text{ m} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (0.039 \text{ m})^2 = 30.73 \text{ m}^3$$

Finalmente, el volumen del reactor será **30.73 m³**.

De esta manera también se obtiene el volumen del catalizador, siendo este 30,73 m³. Seguidamente se obtiene el tiempo de residencia calculado a partir de este valor teniendo en cuenta que es volumen del catalizador poroso. Entonces, utilizando las anteriores ecuaciones:

$$V_{\text{cat, sin porosidad}} = V_{\text{cat, poroso}} \cdot (1 - \varepsilon)$$

$$V_{\text{cat, sin porosidad}} = 30.73 \text{ m}^3 \text{ catalizador} \cdot (1 - 0.45) = 16.90 \text{ m}^3$$

Se determina el tiempo de residencia a partir de la *Ecuación 11.4.8*:

$$\tau = \frac{V_{\text{cat,p}} - V_{\text{cat,sp}}}{Q}$$

$$\tau = \frac{30.73 \text{ m}^3 - 16.90 \text{ m}^3}{84645.041 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{10.96 \text{ kg}}} = 1.79 \cdot 10^{-3} \text{ h} = 6.45 \text{ s}$$

Como se puede observar no varía de forma notable respecto al obtenido inicialmente, siendo este el tiempo de residencia del reactor.

A continuación, antes de proceder con el diseño, es importante conocer el área de intercambio de calor que proporcionan los tubos que operan para asegurar que se produzca la eliminación del calor generada por las reacciones en el reactor. De esta manera se calcula el área de intercambio según la *Ecuación 11.4.15*:

$$\text{Área}_{\text{intercambio}} = \pi \cdot D_{\text{ext,t}} \cdot L_t \cdot N_t \quad \text{Ecuación 11.4.15}$$

Dónde:

- $D_{ext,t}$: Diámetro externo del tubo (m).
- L_t : Longitud del tubo (m).
- N_t : Número de tubos.

El diámetro externo será calculado a partir del código ASME en el siguiente apartado en el diseño mecánico. Pero en este caso, se usará un grosor de tubo estándar, siendo este $\Delta X=3$ mm. De esta manera se calcula el diámetro externo del tubo con la siguiente ecuación:

$$D_{ext,t} = D_{int,t} + 2 \cdot \Delta X \quad \text{Ecuación 11.4.16}$$

$$D_{ext,t} = 0.039 \text{ m} + 2 \cdot 0.003 = 0.045 \text{ m}$$

El diámetro externo de tubos es de **45 mm**.

Se sustituyen los valores en la *Ecuación 11.4.15*:

$$\text{Área}_{intercambio} = \pi \cdot 0.045 \text{ m} \cdot 7.5 \text{ m} \cdot 3430 = 3636.79 \text{ m}^2$$

Por lo tanto, el área de intercambio será **3636.79 m²**.

11.4.4. Balance de energía

Seguidamente, es importante conocer el balance de energía que se produce en el reactor. Debido a que se trata de una reacción exotérmica será necesario eliminar la energía producida para que la operación se mantenga a una temperatura constante. Se considera que el reactor es isotermo y, además, se diseña un intercambiador de calor y un control del mismo para llevar a cabo el proceso.

A partir de la patente se obtiene el calor de reacción producida por las dos reacciones y por lo tanto, el calor necesario a eliminar. El valor de dicho parámetro : -250 kJ/mol.

A partir del balance de materia se determina el caudal molar del reactivo limitante de la reacción principal, por lo tanto:

1^a reacción: Reactivo limitante → Ácido acético = 113 kmol/h

A partir de este valor se puede calcular el calor total generado, el cálculo del cual se obtendrá con la siguiente expresión:

$$Q_{\text{gen}} = F_{\text{ÁCIDO ACÉTICO}} \cdot \Delta H_{\text{REACCIÓN,1}} \quad \text{Ecuación 11.4.17}$$

Dónde:

- Q_{gen} : Calor generada (J/s).
- $F_{\text{ÁCIDO ACÉTICO}}$: Caudal molar del ácido acético que se ha formado (kmol/h).
- $\Delta H_{\text{REACCIÓN,1}}$: Entalpia de las reacciones producidas (kJ/mol).

Se sustituyen los valores en la *Ecuación 11.4.17*:

$$Q_{\text{gen}} = 113 \frac{\text{kmol}}{\text{h}} \cdot -250 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \cdot \frac{1000 \text{ mol}}{1 \text{ kmol}}$$

$$Q_{\text{gen}} = -28250000 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}$$

$$Q_{\text{gen}} = -28250000 \frac{\text{kJ}}{\text{h}} \cdot \frac{1000 \text{ J}}{1 \text{ kJ}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} = -7847222.22 \frac{\text{J}}{\text{s}}$$

Una vez conocido el valor de la energía producida y el área de intercambio se calcula el valor del coeficiente de transferencia de calor (U), con el cual se asegura la eliminación de calor.

Además, es importante mencionar que no existe salto térmico entre la entrada y la salida del fluido del proceso, así como tampoco la entrada y salida del refrigerante, por eso la expresión queda reducida de la siguiente manera:

$$Q = U \cdot A \cdot (T' - T'') \quad \text{Ecuación 11.4.18}$$

Dónde:

- Q : Flujo de calor (J/s = W).
- U : Coeficiente de transferencia de calor ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$).
- A : Área de intercambio (m^2).
- $(T' - T'')$: Diferencia entre la temperatura del fluido por tubos (150°C) y la temperatura del fluido que circula por carcasa (145°C), respectivamente (K).

A partir de la *Ecuación 11.4.18*, la expresión para calcular el coeficiente de transferencia es la siguiente:

$$U = \frac{Q}{A \cdot (T' - T'')}$$

$$U = \frac{7847222.22 \text{ J/s}}{3636.79 \text{ m}^2 \cdot (423 \text{ K} - 418 \text{ K})} = 431.55 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

El valor del coeficiente de transferencia de calor obtenido es **431.55 W/m²·K**.

Para verificar este valor, se compara con datos bibliográficos de coeficientes típicos de transferencia de calor, tal y como muestra la siguiente figura:

TABLE 11.1. Typical overall coefficients		
Hot fluid	Cold fluid	U (W/m ² ·C)
Shell and tube exchangers		
Water	Water	800-1500
Organic solvents	Organic solvents	100-300
Light oils	Light oils	100-400
Heavy oils	Heavy oils	50-300
Gases	Gases	10-30
Others		
Organic solvents	Water	250-750
Light oils	Water	250-900
Heavy oils	Water	10-700
Gases	Water	20-300
Organic solvents	Brine	150-300
Water	Brine	900-1300
Gases	Brine	15-250
Boilers		
Water	Water	1500-4000
Steam	Organic solvents	500-1000
Steam	Light oils	300-900
Steam	Heavy oils	80-450
Steam	Gases	30-300
Downcomers	Heavy oils	50-300
Downcomers	Gases	25-200
Flue gases	Steam	30-100
Flue	Hydrocarbons vapours	30-100
Condensers		
Aqueous vapours	Water	1000-1300
Organic vapours	Water	700-1000
Organic (some non-condensable)	Water	500-700
Vacuum condensers	Water	250-500
Piping		
Steam	Aqueous solutions	1000-1500
Steam	Light vapours	900-1200
Steam	Heavy vapours	600-900

Figura 11.4.1. Coeficientes típicos de transferencia de calor.

Para el sistema del cual se dispone, en el que el fluido caliente que pasa por los tubos es una mezcla de gases y el fluido frío que pasa por carcasa es agua, se presenta un valor de U para intercambiadores de carcasa y tubos entre 1500 y 4000 W/m²·°C.

En comparación al obtenido mediante el balance de energía (431.55 W/ m²·°C), este difiere mucho indicando que el obtenido es más que suficiente para llevar a cabo la reacción. En caso contrario, se tendría que recalcular ya que no se tendría el área suficiente para realizar el intercambio de energía.

Se procede a conocer el caudal del refrigerante y para ello se utiliza la siguiente ecuación:

$$Q = m \cdot cp \cdot \Delta T + m \cdot \lambda \quad \text{Ecuación 11.4.19}$$

Dónde:

- Q : Flujo de calor (J/s).
- m : Caudal másico del refrigerante (kg/s).
- cp : Capacidad calorífica del refrigerante (J/kg·K).
- ΔT : Salto térmico del refrigerante entre la entrada y la salida (°C).
- λ : Calor latente del refrigerante (J/kg).

De la misma manera que ocurre antes, por el hecho de no haber salto térmico solo se produce un cambio de fase, es decir, hay calor latente debido al calor que desprende la reacción. El calor latente se obtiene bibliográficamente $\lambda=508 \text{ kcal/kg}$.

De esta manera la anterior ecuación queda reducida a la siguiente expresión:

$$Q = m \cdot \lambda \quad \text{Ecuación 11.4.20}$$

Como se conoce la Q , que es el calor generado y el calor latente, se obtiene la siguiente expresión que permite calcular el caudal de refrigerante:

$$m = \frac{Q}{\lambda}$$

Se sustituyen los valores:

$$m = \frac{7847222,22 \text{ J/s}}{508 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \cdot \frac{4184 \text{ J}}{1 \text{ kcal}}} = 3.692 \text{ kg/s}$$

Por lo tanto, el caudal mísico del refrigerante del reactor, en este caso agua de servicio, tiene un valor de **3.692 kg/s = 13291.2 kg/h**.

11.4.5. Diseño mecánico

El diseño mecánico del reactor multitubular se hará teniendo en cuenta el código ASME (*Code for pressure vessels*) para cuerpos cilíndricos en el caso de los tubos, como se ha mencionado anteriormente, y además, se utilizará para el caso de la carcasa el método de Kern para el diseño de intercambiadores de carcasa y tubos.

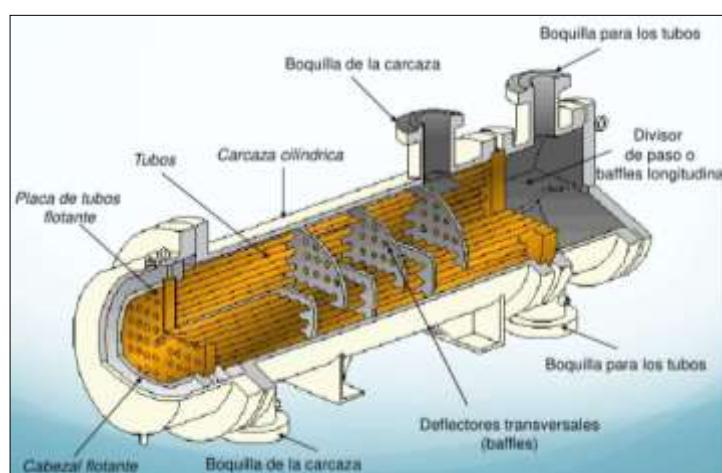


Figura 11.4.2. Intercambiador de carcasa y tubos.

Se decide que el diseño se hará con acero inoxidable, AISI 316L, debido a su propiedades a la resistencia a la corrosión.

Antes se ha de conocer las condiciones de diseño a partir de la temperatura y presión de operación tanto de carcasa como de tubos. Se calcula de la siguiente manera:

TUBOS

Presión de diseño

Hay dos formas de calcular la presión de diseño, se escogerá el valor más alto.

$$P_{\text{diseño},1} = 1.1 \cdot P_{\text{operación}}$$

$$P_{\text{diseño},2} = P_{\text{operación}} + 2 \text{ bar}$$

Dónde:

- $P_{\text{operación}}$: Presión de operación (10 bar = 9.869 atm).
-

$$P_{\text{diseño},1} = 1.1 \cdot 10 \text{ bar} = 11 \text{ bar}$$

$$P_{\text{diseño},2} = 10 \text{ bar} + 2 \text{ bar} = 12 \text{ bar}$$

La presión de diseño mayor es la 2, por lo tanto para el diseño se utilizará una presión de 12 bar = 11.84 atm.

Temperatura de diseño

La temperatura de diseño se establece 20°C por encima de la temperatura de operación del reactor.

$$T_{\text{diseño}} = T_{\text{operación}} + 20 \text{ °C}$$

Dónde:

- $T_{\text{operación}}$: Temperatura de operación en los tubos (150°C)

$$T_{\text{diseño}} = 150 \text{ °C} + 20 \text{ °C} = 170 \text{ °C}$$

CARCASA

Presión de diseño

De la misma manera, se escogerá el valor más alto.

$$P_{\text{diseño},1} = 1.1 \cdot P_{\text{operación}}$$

$$P_{\text{diseño},2} = P_{\text{operación}} + 2 \text{ bar}$$

Dónde:

- $P_{\text{operación}}$: Presión de operación (4.2 atm = 4.26 bar)

$$P_{\text{diseño},1} = 1.1 \cdot 4.26 \text{ bar} = 4.68 \text{ bar}$$

$$P_{\text{diseño},2} = 4.26 \text{ bar} + 2 \text{ bar} = 6.26 \text{ bar}$$

La presión de diseño mayor es la 2, por lo tanto para el diseño se utilizará una presión de 6.26 bar = 6.17 atm.

Temperatura de diseño

La temperatura de diseño se establece 20°C por encima de la temperatura de operación del reactor.

$$T_{\text{diseño}} = T_{\text{operación}} + 20 \text{ °C}$$

Dónde:

- $T_{\text{operación}}$: Temperatura de operación en la carcasa (145°C)

$$T_{\text{diseño}} = 145 \text{ °C} + 20 \text{ °C} = 165 \text{ °C}$$

Características de los tubos

Tal como se había especificado anteriormente, el diámetro de los tubos es de 39 mm y la longitud de 7.5 m. A partir de estos datos se procede a calcular el espesor de las paredes de los tubos mediante el código ASME. Se calcula tal como se muestra a continuación la *Figura 11.4.3*.

CYLINDRICAL SHELL (LONG SEAM) ¹	
$t = \frac{PR}{SE - 0.6P}$	$P = \frac{SE t}{R + 0.6t}$
1. Usually the stress in the long seam is governing. See preceding page. 2. When the wall thickness exceeds one half of the inside radius or P exceeds 0.385 SE , the formulas given in the Code UA 2 shall be applied.	

Figura 11.4.3. Espesor para el cilindro según ASME.

A partir de la ecuación que proporciona el código ASME, se calcula el espesor de los tubos:

$$t_t = \frac{P_t \cdot R_{int,t}}{S \cdot E - 0.6 \cdot P_t} + C.A. \quad \text{Ecuación 11.4.21}$$

Dónde:

- t_t : Espesor de los tubos (mm).
- P_t : Presión interna de los tubos (atm).
- $R_{int,t}$: Radio interno de los tubos (mm).
- S : Esfuerzo del material (atm).
- E : Factor de soldadura (0.85).
- C.A.: Tolerancia de corrosión (2 mm).

El valor de S (esfuerzo del material) se determina a partir del siguiente figura:

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

Figura 11.4.4. Tensión máxima admisible en función de la temperatura para el acero inoxidable.

La temperatura de diseño es de $170^{\circ}\text{C} = 338^{\circ}\text{F}$, por lo tanto corresponde a una $S=15.624$ ksi que en atmósferas corresponde a 1063.15 atm.

$$t_t = \frac{11.84 \text{ atm} \cdot 19.5 \text{ mm}}{1063.15 \text{ atm} \cdot 0.85 - 0.6 \cdot 11.84 \text{ atm}} + 2 \text{ mm} = 2.26 \text{ mm}$$

Se elige un valor del espesor estándar de **3 mm**, ya que su obtención será más económica.

Conociendo el valor del espesor de los tubos, mediante la siguiente ecuación se puede calcular el diámetro externo para los posteriores cálculos para el diseño mecánico.

$$D_{ext,t} = D_{int,t} + 2 \cdot t_t \quad Ecuación 11.4.22$$

Dónde:

- $D_{ext,t}$: Diámetro externo del tubo (mm).
- $D_{int,t}$: Diámetro interno del tubo (mm).
- t_t : Espesor del tubo (mm).

$$D_{ext,t} = 39 \text{ mm} + 2 \cdot 3 \text{ mm} = 45 \text{ mm}$$

El diámetro externo de los tubos tiene un valor de 45 mm (0.045m).

Distribución de los tubos

La distribución de los tubos sigue tres esquemas típicos: triangular, cuadrado y romboidal. Tal como se muestra en la siguiente figura.

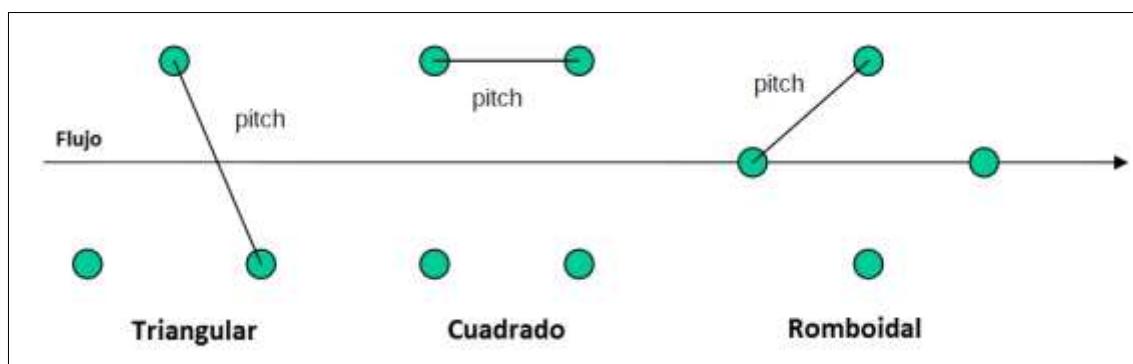


Figura 11.4.5. Distribución de los tubos, pitch.

Se define *Pitch* como la distancia entre los centros de los dos tubos consecutivos. El *pitch* triangular y romboidal proporciona altas velocidades de transferencia de calor, pero en cambio la pérdida de presión es elevada en comparación con el *pitch* cuadrado. El valor del *pitch* aconsejable es 1.25 el diámetro externo de los tubos.

Por lo tanto el valor del *pitch* se calcula con la siguiente ecuación:

$$Pitch = 1.25 \cdot D_{ext,t} \quad Ecuación 11.4.23$$

$$Pitch = 1.25 \cdot 45 \text{ mm} = 56.25 \text{ mm}$$

Características de la carcasa

Diámetro de la carcasa (Dc). Para calcular el diámetro de carcasa se ha de sumar el diámetro del haz de tubos (Db: *Bundle diameter*), el espacio que ha de existir entre el haz de los tubos y la pared externa de la carcasa que dependerá del tipo de carcasa utilizada. Se utiliza el tipo de carcasa E y seguidamente se escoge el tipo de cabezal, ya que están relacionados para el buen funcionamiento del sistema.

Fixed and U-tube	Tipus U/L/M/N
Outside packed head	Tipus P
Split – ring floating head	Tipus S/W
Pull-through floating head	Tipus T

Figura 11.4.6. Tipos de cabezales.

En este proyecto se escoge el Tipo T, siendo este tipo de cabezal la que proporciona un mayor espacio entre la carcasa y el haz de los tubos. Una ventaja es que no está fijada y de esta manera facilita su mantenimiento.

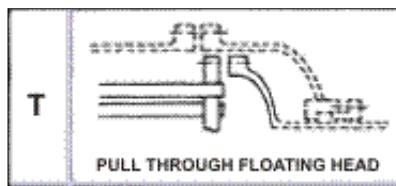


Figura 11.4.7. Tipos de cabezal T.

Para continuar con el cálculo se ha de conocer el diámetro del haz de los tubos de la siguiente manera:

$$D_b = D_{ext,t} \cdot \left(\frac{N_t}{K_1} \right)^{1/n_1} \quad Ecuación 11.4.24$$

Dónde:

- Db: Diámetro del haz de los tubos (m).
- Dext, t: Diámetro externo del tubo (m).
- Nt: Número de tubos.
- N1 y K1: son valores fijados a partir del tipo del pitch elegido y del número de pasos por tubos (en este caso, nps = 1). En la siguiente Figura quedan expuestos dichos valores.

Pitch triangular $p_t = 1.25 D_E$					
Passos per tub	1	2	4	6	8
K_1	0.319	0.249	0.175	0.0743	0.0365
n_1	2.142	2.207	2.285	2.499	2.675
Pitch quadrat $p_t = 1.25 D_E$					
Passos per tub	1	2	4	6	8
K_1	0.215	0.156	0.158	0.0402	0.0331
n_1	2.207	2.291	2.263	2.617	2.643

Figura 11.4.8. Valores de K_1 y n_1 según el tipo de pitch.

Una vez conocidos los valores, se procede a calcular el valor de D_b :

$$D_b = 0.045 \text{ m} \cdot \left(\frac{3430}{0.319} \right)^{1/2.142} = 3.430 \text{ m}$$

Con el valor del diámetro del haz de los tubos, y la gráfica de la Figura **xxx** que se muestra a continuación se obtiene en el eje de las $y=D_{int,c}-D_b$. Como se ha determinado antes, el tipo de cabezal elegido es el Tipo T, es decir, Pull-through floating head.

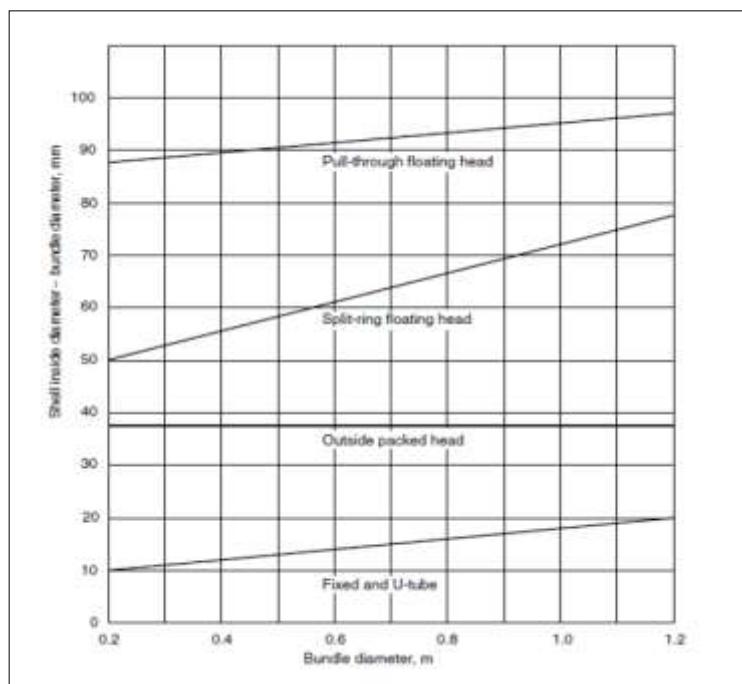


Figura 11.4.9. Tipos de cabezal para determinar el diámetro de carcasa.

Tal como se puede observar tiene una tendencia lineal y debido a que no está el valor en el gráfico se calcula mediante la ecuación de la recta y se tiene un valor de:

$$D_{int,c} - D_b = 117.70 \text{ mm}$$

De esta manera se puede calcular el diámetro interno de la carcasa.

$$D_{int,c} = 117.70 \text{ mm} + D_b$$

$$D_{int,c} = 117.70 \text{ mm} + 3430 \text{ mm} = 3547.70 \text{ mm} = 3.548 \text{ m} \approx 3.55 \text{ m}$$

Determinación del número de pantallas deflectoras y su separación

Para determinar las características geométricas de las pantallas deflectoras hay dos parámetros, tal como muestra la siguiente figura:

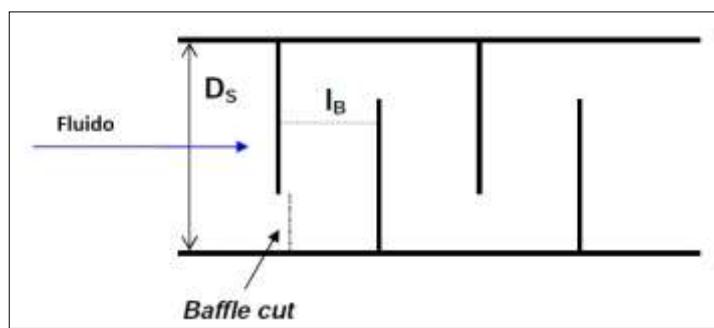


Figura 11.4.10. Distribución del interior de un intercambiador de calor.

- *Baffle cut*, es el espacio que queda entre la pantalla y la carcasa, por donde pasa el fluido del costado de la carcasa. Se expresa en porcentaje, en un valor que oscila entre el 15 y 45 % del diámetro interno de la carcasa. Siendo los valores óptimos entre 20 y 25 %. Se escoge un valor del 25% para el cálculo.
- l_B , es el espaciado entre pantallas con un valor entre un rango de 0.2 y 1 veces el diámetro interno de la carcasa, siendo los valores óptimos entre 0.3 y 0.5 veces el diámetro de carcasa. Se elige un valor de 0,4.

Los cálculos de los dos parámetros son los siguientes:

$$\text{Baffle cut} = 25 \% \cdot D_{int,c}$$

$$\text{Baffle cut} = 0.25 \cdot 3.55 \text{ m} = 0.89 \text{ m}$$

$$l_B = 0.4 \cdot D_{int,c}$$

$$l_B = 0.4 \cdot 3.55 \text{ m} = 1.42 \text{ m}$$

Obtenidos estos valores se pueden calcular el número de pantallas deflectores con la siguiente ecuación:

$$Npd = \frac{L_t}{I_B} - 1$$

Dónde:

- Npd : Número de pantallas deflectoras.
- L_t : Longitud de los tubos (m).
- I_B : Espaciado entre pantallas (m).

$$Npd = \frac{7.5 \text{ m}}{1.42 \text{ m}} - 1 = 4.28 \text{ pantallas deflectoras}$$

Número de pantallas deflectoras = 5

Los valores obtenidos por estos parámetros afectaran la velocidad de circulación del fluido por la carcasa.

A continuación, se hace el cálculo del área transversal de la carcasa según la ecuación:

$$A_{Tc} = \frac{I_B \cdot D_{int,c} \cdot (Pitch - D_{ext,t})}{Pitch \cdot npc} \quad Ecuación 11.4.25$$

Dónde:

- A_{Tc} : Área transversal de carcasa (m^2).
- I_B : Espaciado entre pantallas (m).
- $D_{int, t}$: Diámetro interno del tubo (m).
- $Pitch$: Distancia entre los centros de dos tubos consecutivos (m).
- $D_{ext, t}$: Diámetro externo del tubo (m).
- npc : Número de pasos por carcasa, siendo este valor = 1.
-

Sustituyendo los valores en la ecuación,

$$A_{Tc} = \frac{1.42 \text{ m} \cdot 3.55 \text{ m} \cdot (0.05625 \text{ m} - 0.045 \text{ m})}{0.05625 \text{ m} \cdot 1} = 1.01 \text{ m}^2$$

A partir del área transversal de carcasa se puede calcular a partir de la *Ecuación 11.4.26* la velocidad del fluido que circula por la carcasa.

$$V_c = \frac{M_{agua}}{\rho_{agua} \cdot A_{Tc}} \quad Ecuación 11.4.26$$

Dónde:

- v_c : Velocidad de carcasa (m/s).
- M_g : Caudal másico del agua (kg/s).
- ρ_g : Densidad del agua en las condiciones de operación ($T=145^\circ\text{C}$) (kg/m^3).
- A_{tc} : Área transversal de carcasa (m^2).

Se sustituyen los valores:

$$v_c = \frac{3.692 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{921.63 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 1.01 \text{ m}^2} = 0,0039 \text{ m/s}$$

Espesor de la carcasa

La siguiente figura muestra los parámetros para el cálculo de la carcasa según el código ASME.

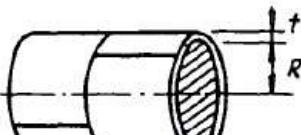
A	CYLINDRICAL SHELL (LONG SEAM) ¹	
	$t = \frac{PR}{SE - 0.6P}$	$P = \frac{SE t}{R + 0.6t}$
1. Usually the stress in the long seam is governing. See preceding page. 2. When the wall thickness exceeds one half of the inside radius or P exceeds 0.385 SE , the formulas given in the Code UA 2 shall be applied.		

Figura 11.4.11. Espesor para la carcasa según ASME.

A partir de la siguiente ecuación se calculará el espesor de la carcasa:

$$t_c = \frac{P_c R_{int,c}}{S \cdot E - 0.6 \cdot P_c} + \text{C. A.} \quad \text{Ecuación 11.4.27}$$

Dónde:

- t_c : Espesor de los tubos (mm).
- P_c : Presión interna de carcasa (atm).
- $R_{int,c}$: Radio interno de carcasa (mm).
- S : Esfuerzo del material (atm).
- E : Factor de soldadura (0.85).
- C.A.: Tolerancia de corrosión (2 mm).

La temperatura de diseño es de $165^{\circ}\text{C} = 329^{\circ}\text{F}$, de la misma manera que en el cálculo del esfuerzo del material para los tubos se hace en el caso de la carcasa. Por lo tanto corresponde a una $S = 1062.10 \text{ atm}$.

$$t_c = \frac{6.17 \text{ atm} \cdot 1774.01 \text{ mm}}{1062.10 \text{ atm} \cdot 0.85 - 0.6 \cdot 6.17 \text{ atm}} + 2 \text{ mm} = 14.17 \text{ mm}$$

Se elige un valor estándar de **15 mm**.

A partir del valor del espesor de la carcasa y mediante la siguiente ecuación se puede calcular el diámetro externo de carcasa.

$$D_{\text{ext},c} = D_{\text{int},c} + 2 \cdot t_c \quad \text{Ecuación 11.4.28}$$

Dónde:

- $D_{\text{ext},c}$: Diámetro externo de carcasa (mm).
- $D_{\text{int},c}$: Diámetro interno de carcasa (mm).
- t_c : Espesor de carcasa (mm).

$$D_{\text{ext},c} = 3548 \text{ mm} + 2 \cdot 15 \text{ mm} = 3578 \text{ mm} = 3.58 \text{ m}$$

Espesor de los cabezales

Para el diseño de equipos los tipos de cabezales más utilizados son el hemisférico, el toriesférico y el elipsoidal. En este proyecto se elige el tipo toriesférico que es el más utilizado y que facilitará el mantenimiento del equipo.

La siguiente figura muestra los parámetros para el cálculo del cabezal según el código ASME.

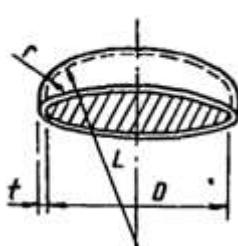
E		ASME FLANGED AND DISHED HEAD (TORSOSPHERICAL HEAD)															
		When $L/r = 16^{2/3}$															
		$t = \frac{0.885PL}{SE - 0.1P}$						$P = \frac{SEt}{0.885L + 0.1t}$									
		When L/r less than $16^{2/3}$															
		$t = \frac{PLM}{2SE - 0.2P}$						$P = \frac{2SEt}{LM + 0.2t}$									
VALUES OF FACTOR "M"																	
L/r	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50	2.75	3.00	3.25	3.50	4.00	4.50	5.00	5.50	6.00	6.50
M	1.00	1.03	1.06	1.08	1.10	1.13	1.15	1.17	1.18	1.20	1.22	1.25	1.28	1.31	1.34	1.36	1.39
L/r	7.00	8.00	9.00	9.50	10.0	10.5	11.0	11.5	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	16.3	*		
M	1.41	1.44	1.46	1.48	1.50	1.52	1.54	1.56	1.58	1.60	1.62	1.65	1.69	1.72	1.75	1.77	
* THE MAXIMUM ALLOWED RATIO : $L = D + 2t$ (see note 2 on facing page)																	

Figura 11.4.12. Espesor de los cabezales según ASME.

Dónde:

- L : Diámetro interno de la carcasa (mm) = 3548 mm
- r: $0,1 \cdot$ Diámetro interno de la carcasa (mm) = 354.8 mm

$$\frac{L}{r} = \frac{3548 \text{ mm}}{354.8 \text{ mm}} = 10$$

Con el valor de la relación L/r , se puede conocer el valor de $M = 1.54$, que será utilizada en la *Ecuación 11.4.29* para el cálculo del espesor de los cabezales del reactor.

A partir de la ecuación de calcula el espesor de los cabezales:

$$t_{\text{cab.}} = \frac{P_t \cdot L \cdot M}{2 \cdot S \cdot E - 0.2 \cdot P_t} + \text{C. A.} \quad \text{Ecuación 11.4.29}$$

Dónde:

- $t_{\text{cab.}}$: Espesor de los cabezales (mm).
- P_t : Presión interna de los tubos (atm).
- L: Diámetro interno de carcasa (mm).
- M: Factor que depende de la relación L/r .
- S: Esfuerzo del material (atm).
- E: Factor de soldadura (0.85).
- C.A.: Tolerancia de corrosión (2 mm).

La temperatura de diseño de los tubos es de $170^{\circ}\text{C} = 338^{\circ}\text{F}$. Por lo tanto corresponde a una $S = 1063.15 \text{ atm}$.

Se sustituyen los valores en la ecuación:

$$t_{\text{cab.}} = \frac{11.84 \text{ atm} \cdot 3548 \text{ mm} \cdot 1.54}{2 \cdot 1063.15 \text{ atm} \cdot 0.85 - 0.2 \cdot 11.84 \text{ atm}} + 2 \text{ mm} = 37.84 \text{ mm}$$

Además, se le suma una tolerancia de fabricación del 10% al espesor de cabezal. De esta manera el espesor será:

$$t_{\text{cab.}} = 1.10 \cdot 37.84 \text{ mm} = 41.63 \text{ mm}$$

Finalmente el valor del espesor del cabezal será un valor estándar para que sea viable económicamente. Se decide un espesor de **45 mm**.

Para que el diseño, montaje y mantenimiento sea más fácil y con el objetivo de aminorar costes se decide utilizar un mismo grosor de chapa para todo el diseño, utilizando el espesor más grande entre el cabezal y el cilindro, un valor de **45 mm**.

Una vez conocido el espesor que se usará para el diseño de todo el equipo, se determina el diámetro externo de todo el tanque con la siguiente *Ecuación 11.4.28*:

$$D_{\text{ext,tanque}} = D_{\text{tanque}} + 2 \cdot t_c$$

Dónde:

- $D_{\text{ext,tanque}}$: Diámetro externo del tanque (m).
- D_{tanque} : Diámetro interno del tanque (m).
- t_c : Espesor del cilindro (m).

Por lo tanto se sustituyen los valores:

$$D_{\text{ext,tanque}} = 3548 \text{ mm} + 2 \cdot 45 \text{ mm} = 3638 \text{ mm} \approx 3.64 \text{ m}$$

Altura del equipo

Para el cálculo de la altura del equipo se utilizaran las siguientes ecuaciones:

$$h = 3.5 \cdot t_{\text{cab.}}$$

$$f = 0.1955 \cdot D_{ext,c} - 0.455 \cdot t_{cab.}$$

$$H = h + f \quad Ecuación 11.4.30$$

Dónde:

- $t_{cab.}$: Espesor de los cabezales (m).
- $D_{ext,c}$: Diámetro externo de carcasa (m).
- H : Altura del cabezal (m).

$$h = 3.5 \cdot 0.045 \text{ m} = 0.158 \text{ m}$$

$$f = 0.1955 \cdot 3.64 \text{ m} - 0.455 \cdot 0.045 \text{ m} = 0.69 \text{ m}$$

$$H_{cab.} = 0.158 \text{ m} + 0.69 \text{ m} = 0.848 \text{ m}$$

La altura del cabezal es **0.848 m**.

Con la siguiente ecuación *Ecuación 11.4.31*, se calcula la altura del equipo:

$$H_{reactor} = H_{carcasa} + 2 \cdot H_{cab.} \quad Ecuación 11.4.31$$

Dónde:

- $H_{reactor}$: Altura del equipo (m).
- $H_{carcasa}$: Altura de la carcasa que equivale a la altura de los tubos (m).
- $H_{cab.}$: Altura de los cabezales (m).

Se sustituyen los valores:

$$H_{reactor} = 7.5 \text{ m} + 2 \cdot 0.848 \text{ m} = 9.20 \text{ m}$$

La altura del reactor será **9.20 m**.

Espesor de la placa tubular

El diseño de una placa tubular juega un papel fundamental en el intercambio de calor. Los tubos son sostenidos en ambos extremos por las placas tubulares en los orificios que llevan para que estos encajen. El conjunto de tubos forma una unidad contenida entre las placas tubulares.

Ecuación 11.4.32 para el cálculo:

$$t_p = \frac{D_{int,c}}{2} \cdot \sqrt{\frac{P_c}{S}} \quad Ecuación 11.4.32$$

Dónde:

- t_p : Espesor de la placa tubular (mm).
- $D_{int,c}$: Diámetro interno de carcasa (mm).
- P_c : Presión interna de los tubos (atm).
- S : Esfuerzo del material = 1063,15 atm.

$$t_p = \frac{3548 \text{ mm}}{2} \cdot \sqrt{\frac{11.84 \text{ atm}}{1063.15 \text{ atm}}} = 187.21 \text{ mm}$$

Tolerancia de fabricación del 10%:

$$t_p = 1.1 \cdot 187.21 \text{ mm} = 205.93 \text{ mm}$$

El vapor del espesor de la placa tubular se aproxima a un valor estándar con fines de disminuir costes, por eso se determina un espesor de **210 mm**.

Pérdida de carga

La pérdida de carga en un reactor de lecho fijo es de mucha importancia, por lo tanto, es necesario tenerlo en cuenta. Especialmente para el fluido que circula por los tubos, debido a que la mezcla reactiva ha de atravesar la resistencia que suponen las partículas del catalizador a lo largo del tubo. De esta forma, se asegura que la bomba que impulsa el fluido proporcione la suficiente fuerza para que la mezcla atraviese el lecho catalítico.

-Perdida de carga por tubos

Los cálculos se llevan a cabo siguiendo el método de Kern, donde se estima la perdida de carga de un solo tubo a partir de la siguiente expresión:

$$\Delta P_t = 8 \cdot j_h \cdot \frac{\rho_t \cdot v_{tubo}^2}{2} \cdot \left(\frac{L_t}{D_{int,t}} \right) \quad \text{Ecuación 11.4.33}$$

Dónde:

- ΔP_t : Perdida de presión (Pa).
- ρ_t : Densidad de la mezcla (kg/m^3).
- v_t : Velocidad de la mezcla por tubos (m/s).
- L_t : Longitud de los tubos (m).
- $D_{int,t}$: Diámetro interno del tubo (m).

- j_h : Factor de fricción, que se obtiene a partir de la siguiente *Figura 11.4.13* que es la gráfica de Coulson, a partir del valor de Reynolds.

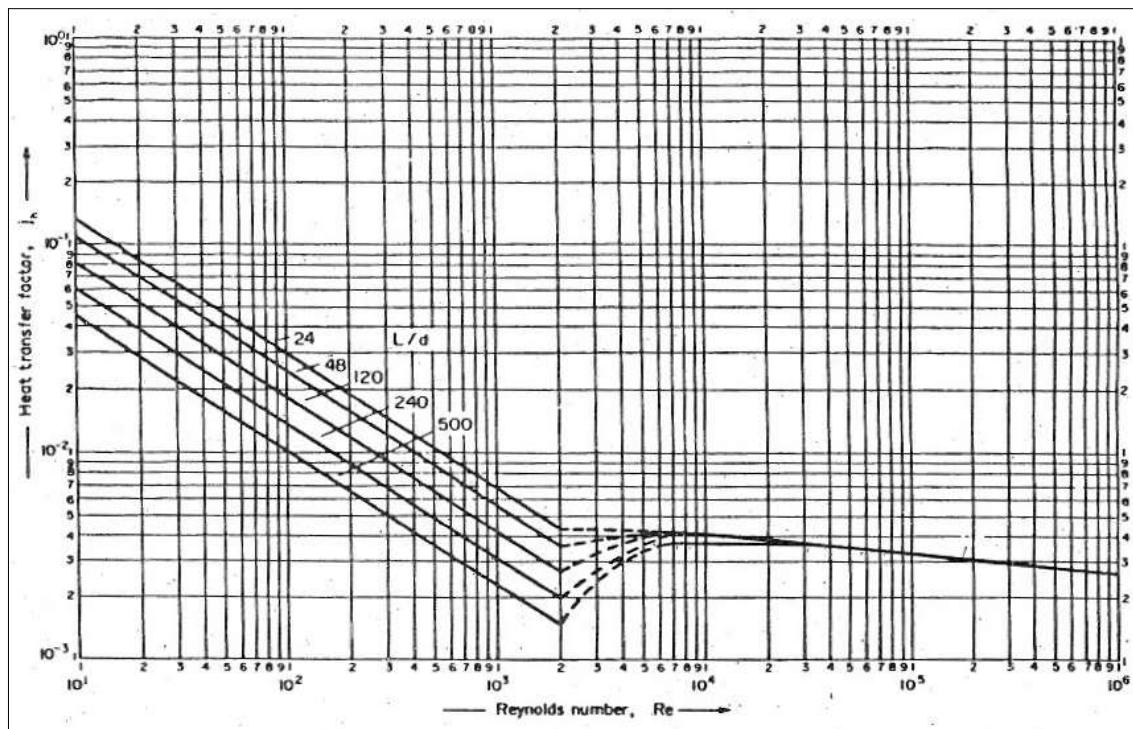


Figura 11.4.13: Factor de transferencia de calor por el costado de tubos a partir del número de Reynolds (Coulson and Richardson's, 3r Edition, 1999)

Antes se ha de conocer el valor de Reynolds, siguiendo una serie de pasos y ecuaciones.

1. Cálculo de la área de paso de un tubo:

$$A_{p1t} = \frac{\pi}{4} \cdot D_{int,t}^2 \quad \text{Ecuación 11.4.34}$$

Dónde:

- A_{p1t} : Área de paso de un tubo (m^2).
- $D_{int,t}$: Diámetro interno del tubo (m).

Sustituyendo los valores:

$$A_{p1t} = \frac{\pi}{4} \cdot (0.039 \text{ m})^2 = 1.195 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

2. Cálculo de la área de paso de todos los tubos:

$$A_{pt} = N_t \cdot \frac{A_{p1t}}{n_{pt}} \quad \text{Ecuación 11.4.35}$$

Dónde:

- A_{pt} : Área de paso por todos los tubos (m^2).
- N_t : Número de tubos.
- $A_{pt,t}$: Área de paso de un tubo (m^2).
- n_{pt} : Número de pasos por tubo = 1.

Sustituyendo los valores:

$$A_{pt} = 3430 \cdot \frac{1.195 \cdot 10^{-3} m^2}{1} = 4.09 m^2$$

3. Cálculo del caudal de la mezcla por área:

$$G_t = \frac{m_t}{A_{pt}} \quad \text{Ecuación 11.4.36}$$

Dónde:

- G_t : Caudal de la mezcla por área ($kg/h \cdot m^2$).
- m_t : Caudal másico de la mezcla por tubos (kg/h).
- A_{pt} : Área de paso por todos los tubos (m^2).

Se sustituyen los valores:

$$G_t = \frac{84645.041 \text{ kg/h}}{4.09 \text{ m}^2} = 20695.61 \frac{\text{kg}}{\text{h} \cdot \text{m}^2}$$

4. Finalmente, el cálculo del número de Reynolds:

$$Re = \frac{D_{int,t} \cdot G_t}{\mu} \quad \text{Ecuación 11.4.37}$$

Dónde:

- Re : Número de Reynolds.
- $D_{int,t}$: Diámetro interno del tubo (m).
- G_t : Caudal de la mezcla por área ($kg/h \cdot m^2$).
- μ : Viscosidad de la mezcla ($kg/h \cdot m$).

Sustitución de valores:

$$Re = \frac{0.039 \text{ m} \cdot 20695.61 \frac{\text{kg}}{\text{h} \cdot \text{m}^2}}{0.54 \frac{\text{kg}}{\text{h} \cdot \text{m}}} = 1494.68$$

Una vez obtenido el valor de Re , gráficamente se obtiene el valor de $j_h = 0.0055$.

También se necesita la velocidad de la mezcla que circula por los tubos, este valor ya se ha calculado anteriormente: $v_{tubo} = 1.20 \text{ m/s}$.

Seguidamente se sustituyen todos los valores en la ecuación de la perdida de carga:

$$\Delta P_t = 8 \cdot 0.0055 \cdot \frac{10.96 \text{ kg/m}^3 \cdot (1.20 \text{ m/s})^2}{2} \cdot \left(\frac{7.5 \text{ m}}{0.039 \text{ m}} \right) = 66.77 \text{ Pa}$$

$$\Delta P_t = 66.77 \text{ Pa} = 66.77 \text{ N/m}^2 = 0.067 \text{ kN/m}^2$$

El valor máximo aconsejable para gases es de 0.5 kN/m^2 , en este caso, el valor es de 0.067 kN/m^2 , por lo tanto la perdida de carga es menospreciable.

- Perdida de carga por carcasa

Los cálculos se llevan a cabo a partir de la siguiente expresión:

$$\Delta P_c = 8 \cdot j_F \cdot \frac{\rho_c \cdot v_c^2 \cdot \text{carcasa}}{2} \cdot \left(\frac{D_{int,c}}{D_{eq.}} \right) \cdot \left(\frac{L_c}{l_B} \right) \quad \text{Ecuación 11.4.38}$$

Dónde:

- ΔP_c : Perdida de presión (Pa).
- ρ_c : Densidad de agua, fluido térmico (kg/m^3).
- v_c : Velocidad del agua por la carcasa (m/s).
- $D_{int,c}$: Diámetro interno del tubo (m).
- $D_{eq.}$: Diámetro equivalente (m).
- L_c : Longitud de carcasa (m).
- l_B : Espaciado entre pantallas (m).
- j_F : Factor de fricción, que se obtiene a partir de la siguiente *Figura 11.4.14* que es la gráfica de Coulson, a partir del valor de Reynolds.

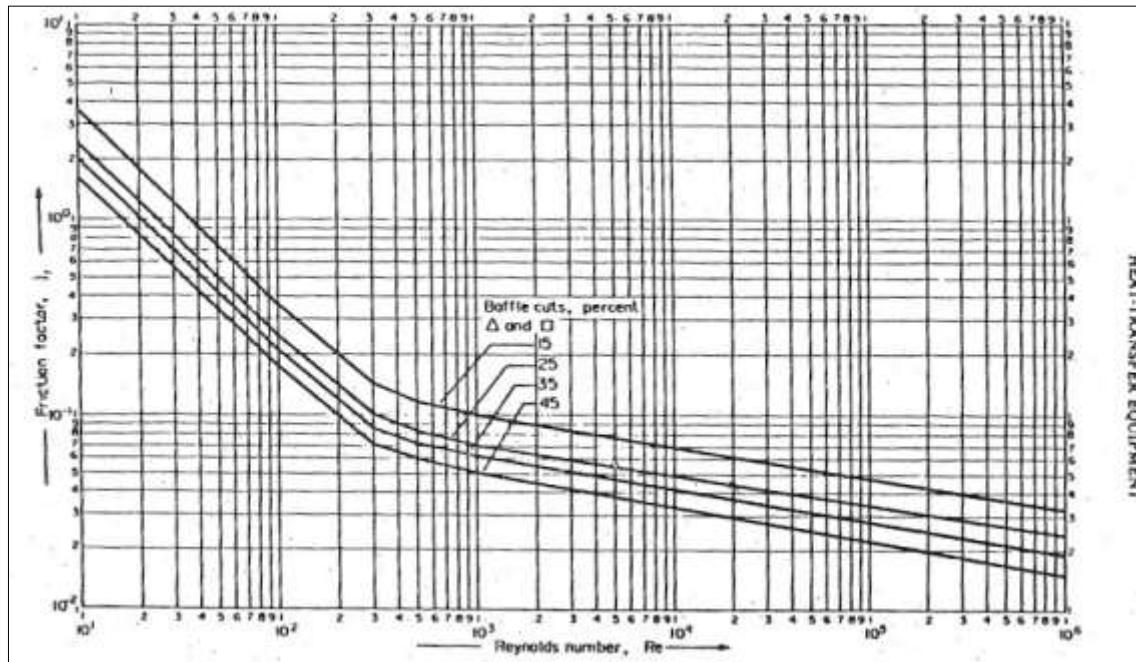


Figura 11.4.14. Factor de transferencia de calor por el costado de carcasa a partir del número de Reynolds (Coulson and Richardson's, 3r Edition, 1999)

Antes se ha de conocer el valor de Reynolds, siguiendo una serie de pasos y ecuaciones.

1. Cálculo del área transversal de carcasa.

El valor de este parámetro ya se ha calculado anteriormente, por lo tanto tenemos una **$A_{Tc} = 1.01 \text{ m}^2$** .

2. Cálculo del caudal del fluido térmico, agua:

$$G_c = \frac{M_c}{A_{Tc}} \quad \text{Ecuación 11.4.39}$$

Dónde:

- G_c : Caudal de agua por área ($\text{kg}/\text{h} \cdot \text{m}^2$).
- M_c : Caudal mísico del agua (kg/h).
- A_{Tc} : Área transversal de carcasa (m^2).

Se sustituyen los valores:

$$G_c = \frac{13291.2 \text{ kg}/\text{h}}{1.01 \text{ m}^2} = 13159.60 \frac{\text{kg}}{\text{h} \cdot \text{m}^2}$$

3. Cálculo del diámetro equivalente:

$$D_{eq} = \frac{1.10}{D_{ext,t}} \cdot (Pitch^2 - 0.917 \cdot D_{ext,t}^2) \quad Ecuación 11.4.40$$

Dónde:

- D_{eq} : Diámetro equivalente (m).
- $D_{ext,t}$: Diámetro externo del tubo (m).
- Pitch: Distancia entre los centros de dos tubos consecutivos (m).

Sustitución de los valores en la ecuación:

$$D_{eq} = \frac{1.10}{0.045 \text{ m}} \cdot ((0.05625 \text{ m})^2 - 0.917 \cdot (0.045 \text{ m})^2) = 0.032 \text{ m}$$

4. Por último, el cálculo del número de Reynolds:

$$Re = \frac{D_{eq} \cdot G_c}{\mu_c} \quad Ecuación 11.4.41$$

Dónde:

- Re: Número de Reynolds.
- D_{eq} : Diámetro equivalente (m).
- G_c : Caudal de agua por área (kg/h·m²).
- μ_c : Viscosidad del fluido de carcasa (kg/h·m).

Sustitución de valores:

$$Re = \frac{0.032 \text{ m} \cdot 13159.60 \text{ kg/h} \cdot \text{m}^2}{0.68 \text{ kg/h} \cdot \text{m}} = 619.28$$

El número de Reynolds consta de un régimen laminar.

Una vez obtenido el valor de Re y sabiendo que el *Baffle cut* es un 25%, se obtiene el valor de $j_f = 0.008$.

También se necesita la velocidad del fluido térmico que circula por la carcasa, este valor ya se ha calculado anteriormente: $v_{carcasa} = 0.0039 \text{ m/s}$.

Seguidamente se sustituyen todos los valores en la ecuación de la perdida de carga para la carcasa:

$$\Delta P_c = 8 \cdot 0.008 \cdot \frac{921.63 \text{ kg/m}^3 \cdot (0.0039 \text{ m/s})^2}{2} \cdot \left(\frac{3.55 \text{ m}}{0.032 \text{ m}} \right) \cdot \left(\frac{7.5 \text{ m}}{1.42 \text{ m}} \right) = 0.263 \text{ Pa}$$

$$\Delta P_c = 0.263 \text{ Pa} = 0.263 \text{ N/m}^2 = 0.00026 \text{ kN/m}^2$$

El valor máximo aconsejable para líquidos es de 70 kN/m^2 , en este caso el valor es de 0.00026 kN/m^2 . Por lo tanto, la perdida de cara es menospreciable como en el caso de los tubos.

Volumen del equipo

Seguidamente se calcula el volumen del equipo, teniendo en cuenta el volumen de la carcasa y de los fondos.

$$V_{\text{carcasa}} = \left(\frac{\pi}{4}\right) \cdot D_{\text{int,c}}^2 \cdot L_t \quad \text{Ecuación 11.4.42}$$

$$V_{\text{fondos}} = \left(\frac{\pi}{8}\right) \cdot 0.162 \cdot D_{\text{int,c}}^3 \quad \text{Ecuación 11.4.43}$$

$$V_{\text{equipo}} = V_{\text{carcasa}} + 2 \cdot V_{\text{fondos}} \quad \text{Ecuación 11.4.44}$$

Dónde:

- V_{carcasa} : Volumen de carcasa (m^3).
- $D_{\text{int,c}}$: Diámetro interno de la carcasa (m).
- L_t : Longitud de los tubos (m).
- V_{fondos} : Volumen de fondos del equipo (m^3).
- V_{equipo} : Volumen del equipo (m^3).

Sustitución de valores:

$$V_{\text{carcasa}} = \left(\frac{\pi}{4}\right) \cdot (3.55 \text{ m})^2 \cdot 7.5 \text{ m} = 74.23 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{fondos}} = \left(\frac{\pi}{8}\right) \cdot 0.162 \cdot (3.55 \text{ m})^3 = 2.85 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{equipo}} = 74.23 \text{ m}^3 + 2 \cdot 2.85 \text{ m}^3 = 79.93 \text{ m}^3$$

Peso del equipo

Vacio: Se calcula el peso del equipo en vacío conociendo el peso de la carca y de los fondos.

$$M_{\text{carcasa}} = \rho_{\text{Acero Inox.}} \cdot S_{\text{int,c}} \cdot t_c \quad \text{Ecuación 11.4.45}$$

$$M_{\text{tubos}} = \rho_{\text{Acero Inox.}} \cdot N_t \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (D_{\text{ext,t}}^2 - D_{\text{int,t}}^2) \cdot L_t \quad \text{Ecuación 11.4.46}$$

$$M_{\text{cabezal}} = \rho_{\text{Acero Inox.}} \cdot S_{\text{int,cab.}} \cdot t_{\text{cab.}} \quad \text{Ecuación 11.4.47}$$

$$M_{\text{placa tubular}} = \rho_{\text{Acero Inox.}} \cdot (V_{\text{pt}} - V_{t,p}) \quad \text{Ecuación 11.4.48}$$

$$M_{\text{total}} = 1.1 \cdot (M_{\text{carcasa}} + M_{\text{tubos}} + 2 \cdot M_{\text{cabezal}} + 2 \cdot M_{\text{placa tubular}}) \quad \text{Ecuación 11.4.49}$$

Dónde:

- M_{carcasa} : Peso de la carcasa (kg).
- $\rho_{\text{acero inox.}}$: Densidad del acero inoxidable (kg/m^3).
- $S_{\text{int, c}}$: Sección interna de la carcasa (m^2).

$$S_{\text{int,c}} = \pi \cdot D_{\text{int,c}} \cdot L_c = \pi \cdot 3.55 \text{ m} \cdot 7.5 \text{ m} = 83.64 \text{ m}^2$$

- t_c : Espesor de la carcasa (m).
- M_{tubos} : Peso de los tubos (kg).
- $D_{\text{ext, t}}$: Diámetro externo del tubo (m).
- $D_{\text{int, t}}$: Diámetro interno del tubo (m).
- L_t : Longitud de los tubos (m).
- M_{cabezal} : Peso del cabezal (kg).
- $S_{\text{int, cab}}$: Sección interna del cabezal (m^2).

$$S_{\text{int,cab}} = 0.931 \cdot D_{\text{int,cab}}^2 = 0.931 \cdot (3.55 \text{ m})^2 = 11.73 \text{ m}^2$$

- $t_{\text{cab.}}$: Espesor del cabezal (m).
- $M_{\text{placa tubular}}$: Peso de la placa tubular (kg).
- V_{pt} : Volumen de la placa tubular (kg).

$$V_{\text{pt}} = \left(\frac{\pi}{4}\right) \cdot D_{\text{int,c}} \cdot t_p = \left(\frac{\pi}{4}\right) \cdot (3.55 \text{ m})^2 \cdot 0.21 \text{ m} = 2.07 \text{ m}^3$$

- $V_{t,p}$: Volumen de los tubos en la placa tubular (kg).

$$V_{t,p} = \left(\frac{\pi}{4}\right) \cdot D_{\text{ext,t}} \cdot t_p \cdot N_t = \left(\frac{\pi}{4}\right) \cdot (0.045 \text{ m})^2 \cdot 0.21 \text{ m} \cdot 3430 = 1.15 \text{ m}^3$$

- M_{total} : Masa total del equipo (kg).

-

Se sustituyen los valores en las ecuaciones y se obtienen los siguientes resultados:

$$M_{\text{carcasa}} = 7960 \text{ kg/m}^3 \cdot 83.64 \text{ m}^2 \cdot 0.045 \text{ m} = 29959.85 \text{ kg}$$

$$M_{\text{tubos}} = 7960 \text{ kg/m}^3 \cdot 3430 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot ((0.045 \text{ m})^2 - (0.039 \text{ m})^2) \cdot 7.5 \text{ m} \\ = 81056.69 \text{ kg}$$

$$M_{\text{placa tubular}} = 7960 \text{ kg/m}^3 \cdot (2.07 \text{ m}^3 - 1.15 \text{ m}^3) = 7323.20 \text{ kg}$$

$$M_{cabezal} = 7960 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 11.73 \text{ m}^2 \cdot 0.045\text{m} = 4201.69 \text{ kg}$$

En el peso final se tiene en cuenta el 10% de sobredimensionamiento para tener en cuenta bridas, soldadura, entre otros posibles factores que influyan en el peso. Siendo el peso final del equipo en vacío, el siguiente:

$$M_{\text{total}} = 1.1 \cdot (29959.85 \text{ kg} + 81056.69 \text{ kg} + 2 \cdot 7323.20 \text{ kg} + 2 \cdot 4201.69 \text{ kg})$$

$$M_{\text{total}} = 147472.95 \text{ kg}$$

El peso en toneladas:

$$M_{\text{total}} = 147.47 \text{ Tn}$$

Lleno de agua: Se rellena el equipo con agua para determinar su peso en condiciones de prueba.

$$M_{\text{agua}} = M_{\text{total,vacio}} + \rho_{\text{agua}} \cdot (V_{\text{reactor}}) \quad \text{Ecuación 11.4.50}$$

Dónde:

- M_{agua} : Peso del equipo lleno de agua (kg).
- $M_{\text{total, vacío}}$: Masa total del equipo vacío (kg).
- ρ_{agua} : Densidad del agua (kg/m^3).
- V_{reactor} : Volumen del reactor (m^3).

Sustitución de los valores obtenidos en la ecuación:

$$M_{\text{agua}} = 147472.95 \text{ kg} + 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot (30.73 \text{ m}^3) = 178202.95 \text{ kg}$$

Peso en toneladas:

$$M_{\text{agua}} = 178.20 \text{ Tn}$$

Peso del reactor en operación

El peso total del equipo lo constituye el peso del equipo en vacío, el peso del fluido que circula por la carcasa, la mezcla que circula por los tubos y la masa del catalizador que hay dentro de los tubos. Por lo tanto, se obtiene la siguiente expresión:

$$M_{\text{op.}} = M_{\text{total,vacio}} + \rho_{\text{agua,145°C}} \cdot (V_{\text{reactor}} - V_{\text{tubos}}) + \rho_{\text{mezcla}} \cdot (V_{\text{tubos}} - V_{\text{catalizador}}) + M_{\text{catalizador}}$$

$$\text{Ecuación 11.4.51}$$

Dónde:

- $M_{op.}$: Peso del equipo en operación (kg).
- $M_{total, vacío}$: Masa total del equipo vacío (kg).
- $\rho_{agua, 145°C}$: Densidad del agua a la temperatura de operación (kg/m^3).
- $V_{reactor}$: Volumen del reactor (m^3).
- V_{tubos} : Volumen de los tubos (m^3).
- ρ_{mezcla} : Densidad de la mezcla por tubos (kg/m^3).
- $V_{catalizador}$: Volumen del catalizador poroso (m^3).
- $M_{catalizador}$: Peso del catalizador contenido en los tubos (kg).
-

Cálculo del volumen de los tubos se hace de la siguiente manera:

$$V_{tubos} = V_{tubo, sobredimensionado} \cdot N_t = 0.0089 \text{ m}^3 \cdot 3430 = 30.53 \text{ m}^3$$

El resultado será el siguiente:

$$M_{op.} = 147472.95 \text{ kg} + 921.63 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot (30.73 \text{ m}^3 - 30.53 \text{ m}^3) + 10.96 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot (30.53 \text{ m}^3 - 29.786 \text{ m}^3) + 29786 \text{ kg}$$

$$M_{op.} = 177451.43 \text{ kg}$$

Peso en toneladas:

$$M_{op.} = 177.45 \text{ Tn}$$

11.4.6. Aislamiento de equipo

Hacer uso de un aislante es necesario debido a que las temperaturas de operación en carcasa y en tubos, 145°C y 150°C respectivamente, son elevadas. Por ello, se decide aislar el equipo con lana de roca.

El espesor requerido para el aislante se calcula con la siguiente ecuación:

$$X = \frac{30}{3.6 \cdot \left(\frac{\Delta T}{D_{ext,c}} \right)^{\frac{1}{4}}} \quad \text{Ecuación 11.4.52}$$

Dónde:

- X: Espesor del aislante (cm).

- ΔT : Diferencia de temperaturas entre el interior y exterior del reactor, siendo 20°C la temperatura media en Martorell, y la temperatura en el interior del reactor es 145°C.
- $D_{ext,c}$: Diámetro externo de la carcasa (m).

Por lo tanto,

$$X = \frac{30}{3.6 \cdot \left(\frac{145^{\circ}\text{C} - 20^{\circ}\text{C}}{3.58 \text{ m} \cdot 100 \text{ cm}} \right)^{\frac{1}{4}}} = 10.84 \text{ cm}$$

El aislamiento se recubre con una capa de aluminio (0.6 mm) para protegerlo de las condiciones meteorológicas de Martorell.

Finalmente, se necesita conocer el volumen aislante necesario para todo el equipo:

$$V_{aislante} = S_{ext,reactor} \cdot X \quad \text{Ecuación 11.4.53}$$

$$S_{ext,reactor} = S_{ext,c} + S_{ext,cab.} \quad \text{Ecuación 11.4.54}$$

Dónde:

- $V_{aislante}$: Volumen del aislante para todo el equipo (m^3).
- $S_{ext, reactor}$: Sección externa del reactor (m^2).
- X : Espesor del aislante (cm).
- $S_{ext, c}$: Sección externa de la carcasa (m^2).

$$S_{ext,c} = \pi \cdot D_{ext,c} \cdot L_t = \pi \cdot 3.58 \text{ m} \cdot 7.5 \text{ m} = 84.35 \text{ m}^2$$

- $S_{ext, cab.}$: Sección externa del cabezal (m^2).

$$S_{ext,cab.} = 0.931 \cdot (D_{ext,c})^2 = 0.931 \cdot (3.58 \text{ m})^2 = 11.93 \text{ m}^2$$

Por lo tanto:

$$S_{ext,reactor} = 84.35 \text{ m}^2 + 11.93 \text{ m}^2 = 96.28 \text{ m}^2$$

Seguidamente se obtiene el volumen del aislante necesario:

$$V_{aislante} = 96.28 \text{ m}^2 \cdot \left(10.84 \text{ cm} \cdot \frac{1 \text{ m}}{100 \text{ cm}} \right) = 10.44 \text{ m}^3$$

11.4. DISEÑO DE COLUMNAS DE SEPARACIÓN

11.4.1. Introducción

11.4.1.1. Columna de absorción

La absorción es la operación unitaria en la que se eliminan uno o más componentes de una corrientes de gas al ser tomados, o absorbidos, por un líquido no volátil (solvente). El solvente líquido se agrega como agente separador. Como en la destilación, también es una operación de etapas de equilibrio con contacto de líquido-vapor para favorecer el contacto entre las dos fases, aumentando el rendimiento de la operación, por lo tanto, cabe esperar que los equipos sean bastante parecidos. La diferencia de concentración entre las dos fases es la fuerza impulsora, por lo tanto, cuando la concentración del componente en la fase líquida sea cero la transferencia será máxima.

Normalmente para favorecer la transferencia de materia entre el líquido y el gas, el líquido se distribuye por la parte superior de la columna y el gas por la parte inferior como se puede observar en la siguiente *Figura 11.5.1*. La absorción se puede efectuar en torres empacadas o de platos.

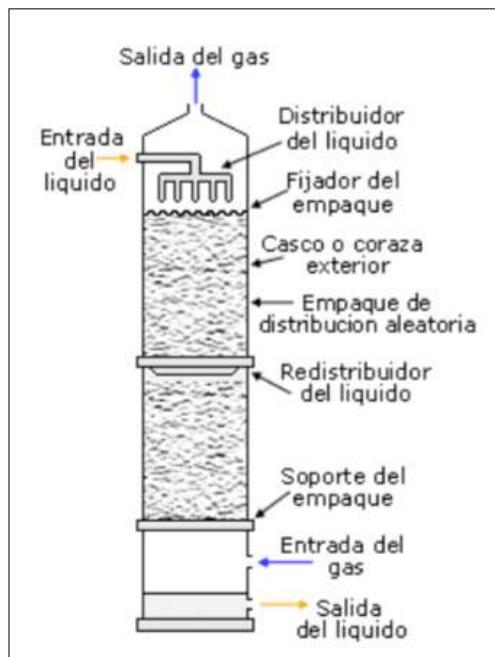


Figura 11.5.1. Esquema general de una columna de absorción.

11.4.1.2. Columna de destilación

La destilación es la operación de separación más común en la industria de procesos químicos. Esta técnica de separación permite separar las mezclas de compuestos que tienen diferentes puntos de ebullición.

La destilación consiste en calentar la mezcla hasta el punto de ebullición, momento en el que el vapor entra en equilibrio con el líquido que se enriquecen del componente más volátil.

El vapor que se encuentra en la parte superior de la columna pasa por un condensador que enfriá el vapor y pasa a estado líquido. De esta manera se obtiene por el destilado un líquido enriquecido con el componente más volátil y otro con el componente menos volátil, que saldrá por la parte inferior de la columna, es decir por el residuo.

La destilación puede ser simple, donde el ciclo de evaporación-condensación solo se realiza una vez, o puede ser fraccionada, que se basa en realizar varias veces el ciclo. La destilación fraccionada es más eficiente que la simple y permite separar los componentes de la mezcla de puntos de ebullición más próximos.

Normalmente, la operación de una unidad de separación no conduce a la pureza deseada de un determinado producto, por eso, en su lugar, se realiza la operación en múltiples etapas de equilibrio. El aumento de etapas de equilibrio hace que la pureza del componente sea mayor aunque se obtiene en cantidades pequeñas.

El equipo que se utiliza es la columna de platos, que como su nombre dice está constituida por un conjunto de platos (o etapas) que favorecen el contacto entre la fase vapor y líquida, las cuales circulan en contracorriente. La siguiente *Figura 11.5.2* muestra una columna de platos:

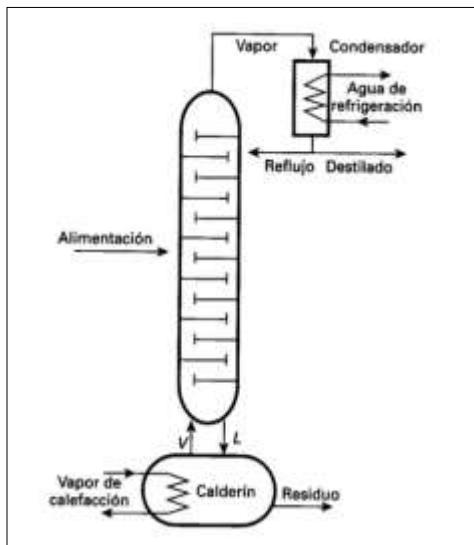


Figura 11.5.2. Esquema general de una columna de destilación.

Una alternativa a estas columnas es sustituir los platos por un relleno, que de la misma manera mejora el contacto entre el vapor y líquido.

El diseño de la columna se compone de un condensador y un reboiler. El condensador enfriá el vapor y mejora la eficacia de la destilación, y el líquido resultante se divide en dos fracciones, una es el producto que se extrae por la parte superior de la columna y la otra parte, llamado reflujo, vuelve a la columna y por lo tanto, mantiene el flujo descendente a través de la recirculación. De esta manera se obtiene el contacto necesario con la fase vapor que asciende. El condensador puede ser total, que significa que todo el vapor se condensa o también puede ser parcial, donde solo una parte se condensa.

En cuanto al reboiler, se ocupa de transferir calor al líquido que emerge de la etapa de equilibrio que corresponde a los fondos de la columna para vaporizarla parcialmente, de manera que este vapor se recircula a la columna manteniendo el flujo ascendente.

11.4.1.3. Tipos de columnas

Las columnas de destilación y las columnas de absorción pueden ser de platos o empacadas. El objetivo de los dos dispositivos es favorecer el contacto entre las dos fases; vapor y líquido.

A continuación se presentan las principales características de las columnas mencionadas.

Columnas de platos

El tipo más común de columnas de platos son los de platos circulares (*bubble cap*), de platos de válvulas (*valve tray*) y las de platos de orificios (*sieve tray*). En la siguiente figura se muestran los diferentes tipos de platos.

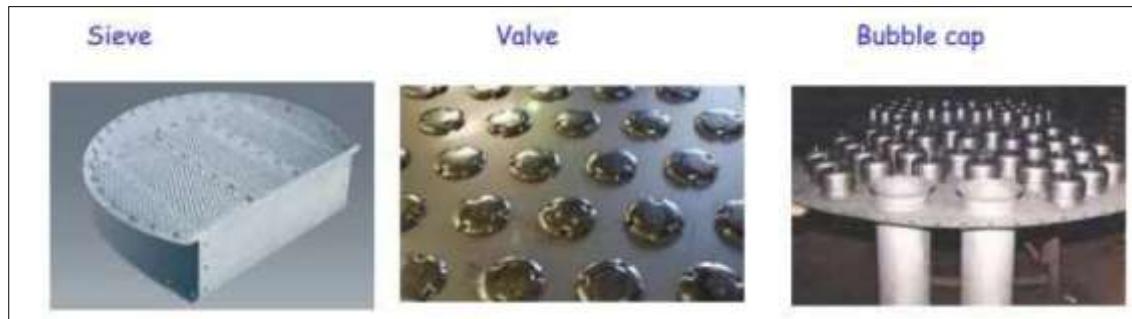


Figura 11.5.3. Tipos de platos.

Los platos han de ser capaces de tratar grandes cantidades de líquido y vapor sin problemas de inundación o arrastre excesivo de líquido. También es importante que la caída de presión en el plato no sea muy alta y la instalación de éstos no sea muy complicada. El número de platos viene determinado por la operación, dependiendo de la separación que se va a llevar a cabo, si el número de platos es más grande, la separación será más eficiente. El tipo de plato más utilizado es el plato de orificios debido a su buen funcionamiento en relación con su precio.

Columnas de relleno

Las columnas de relleno a contracorriente, en las que nos centramos en este apartado, son equipos cilíndricos que contienen en su interior un relleno cuyo objetivo es maximizar el área de contacto entre gas y líquido. Las torres empacadas tienen eficiencias de gases más altas que otros equipos manejando caudales de gas residual más altos y menor cantidad de líquido de limpieza, aunque las pérdidas de presión son altas y los costos del equipo, de operación y de mantenimiento también pueden ser bastante altos.

Los rellenos han de ser químicamente inertes, tener una resistencia mecánica elevada y permitir el paso de las corrientes con un buen contacto entre las fases.

A continuación se presenta la estructura.

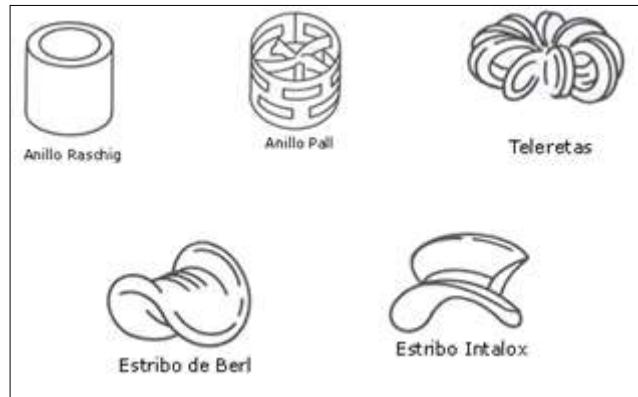


Figura 11.5.4. Tipos de rellenos más comunes.

11.4.1.4. Comparación entre columnas de platos y de relleno

Para poder decidir el tipo de columna se tendrán en cuenta diferentes situaciones.

- Si el flux de líquido es pequeño comparado con el del gas es preferible utilizar columnas de platos.
- Para evitar el taponamiento, es preferible utilizar las columnas de platos.
- Las columnas de platos pueden tratar un caudal más amplio sin inundación.
- Si los líquidos tienen sólidos en suspensión es preferible la torre de platos debido a su facilidad de limpieza.
- En caso de grandes cambios de temperatura es preferible una torre de platos, ya que el incremento de temperatura puede deteriorar el relleno.
- Para columnas con poca altura y diámetro inferior a un metro es preferible una columna de platos.
- Las torres de relleno tienen menor perdida de carga que la de platos.
- Los costos iniciales de las columnas de platos son menores.

11.4.2. Columna de absorción C-401

Para el diseño de la columna de absorción C-401 se ha utilizado el simulador de procesos *Aspentech "Hysys V8.0"*. Para el caso del cálculo del diámetro de la columna se compara el resultado obtenido por Hysys con el calculado a partir de correlaciones empíricas.

11.4.2.1. Diseño funcional

La finalidad de la columna de absorción C-401 es la de separar los gases como el etileno, dióxido de carbono, oxígeno los cuales provienen de la corriente de gases del decantador T-301. Una parte de los gases recuperados en la absorción, por medio del ácido acético como solvente, se recircularan al mezclador M-202 para volver a ser utilizados en el proceso.

Los datos que requiere el subprograma para funcionar son las siguientes:

- Caudal y composición de la corriente de entrada
- Número de etapas de equilibrio
- Presión por cabeza y colas de columna
- Temperatura aproximada por cabeza y cola

Se definen las corrientes de entrada de gas y líquido por medio del balance de materia, por lo tanto, también se conoce la temperatura de la mezcla a absorber, que proviene del decantador T-301 a 110 kPa. No obstante no tiene las condiciones de presión ni temperatura óptimas para la columna, por lo tanto se necesita de otros equipos como un compresor e intercambiador de calor para definir las condiciones a las que la absorción sea más efectiva.

Para el caso del solvente, ácido acético, también se modifica la presión de entrada la columna, teniendo ya una temperatura adecuada para enfriar la mezcla y poder absorber los componentes a separar.

A continuación se introducen las corrientes en el absorbéador y se considera una presión de salida de 800kPa. Se introducen los datos en Hysys y se resuelve la columna de manera rigurosa. Si la separación no es la deseada se vuelve a iterar cambiando los parámetros de la columna, así como el número de platos o el caudal de disolvente.

En la siguiente figura se representa el esquema general utilizado por Hysys para realizar el diseño de la columna de absorción C-401.

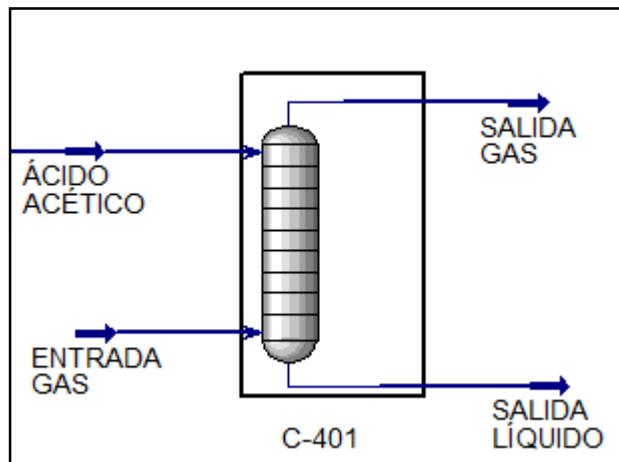


Figura 11.5.6 Esquema general de la columna de absorción C-401 en Hysys.

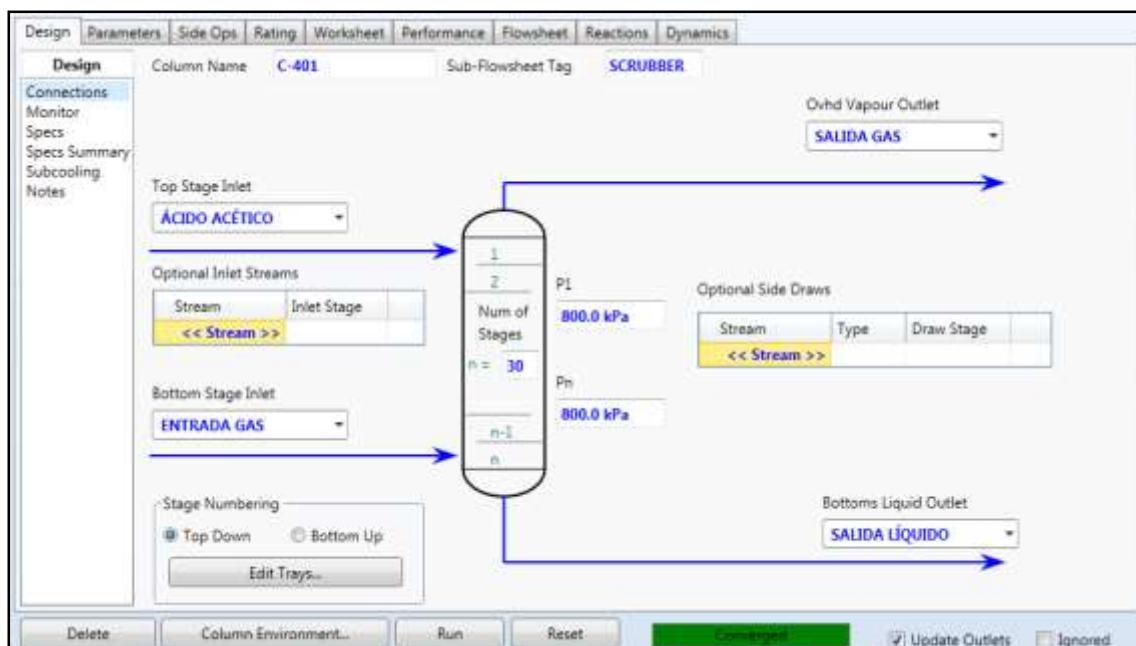


Figura 11.5.7. Página principal del diseño de la columna de absorción C-401

Si el diseño es correcto y Hysys ha encontrado una solución, éste presenta un ícono verde donde se lee “converged”. Se puede observar que para llevar a cabo la separación deseada se necesitan 28 etapas de equilibrio.

A continuación se representan en tablas las condiciones de trabajo y las corrientes con sus respectivas composiciones, es decir, el balance de materia en la columna.

Tabla 11.5.1. Balance de materia y condiciones de trabajo en la columna de absorción C-401.

Corriente	Entrada Ácido acético	Entrada Gas	Salida Gas	Salida Líquido
Fracción de vapor	0.00	1.00	1.00	0.00
Temperatura (C)	20.58	54	62.1	64.35
Presión (kPa)	800	803.7	800	800
Caudal molar (kmol/h)	400	1688	1579	508.6
Caudal másico (kg/h)	2.40E+04	6.16E+04	5.35E+04	3.21E+04
Caudal de líquido (m ³ /h)	22.84	111.1	102.2	31.76
Entalpia molar (kJ/kmol)	-4.61E+05	-1.11E+05	-9.98E+04	-4.24E+05
Entropía molar (kJ/kmol·°C)	85.41	173.7	206.3	135.2
Flujo de calor (kJ/h)	-1.84E+08	-1.88E+08	-1.58E+08	-2.15E+08

Tabla 11.5.2. Composiciones molares de los caudales en la columna de absorción C-401.

Corriente	Entrada Ácido acético	Entrada Gas	Salida Gas	Salida Líquido
Etileno	0.0000	0.5826	0.6203	0.0075
CO ₂	0.0000	0.3033	0.3216	0.0078
O ₂	0.0000	0.0387	0.0413	0.0000
Acetato de vinilo	0.0000	0.0605	0.0005	0.1992
Ácido Acético	1.0000	0.002	0.0163	0.7427
H ₂ O	0.0000	0.0129	0.0000	0.0428

El objetivo de la columna de absorción C-401 es eliminar en su gran mayoría componentes como el acetato de vinilo, ácido acético y agua. Como se puede observar en la *Tabla 11.5.2.* gran parte de estos son absorbidos por el ácido acético fresco que entra a la columna y salen por la corriente líquida del吸收edor, mientras que los otros gases salen por la parte superior de la columna para un tratamiento posterior.

Una vez se ha diseñado la columna, el programa Hysys permite obtener diferentes gráficos, tales como temperatura, caudal y composición en función de la etapa de equilibrio. Éstos se representan en los siguientes gráficos:

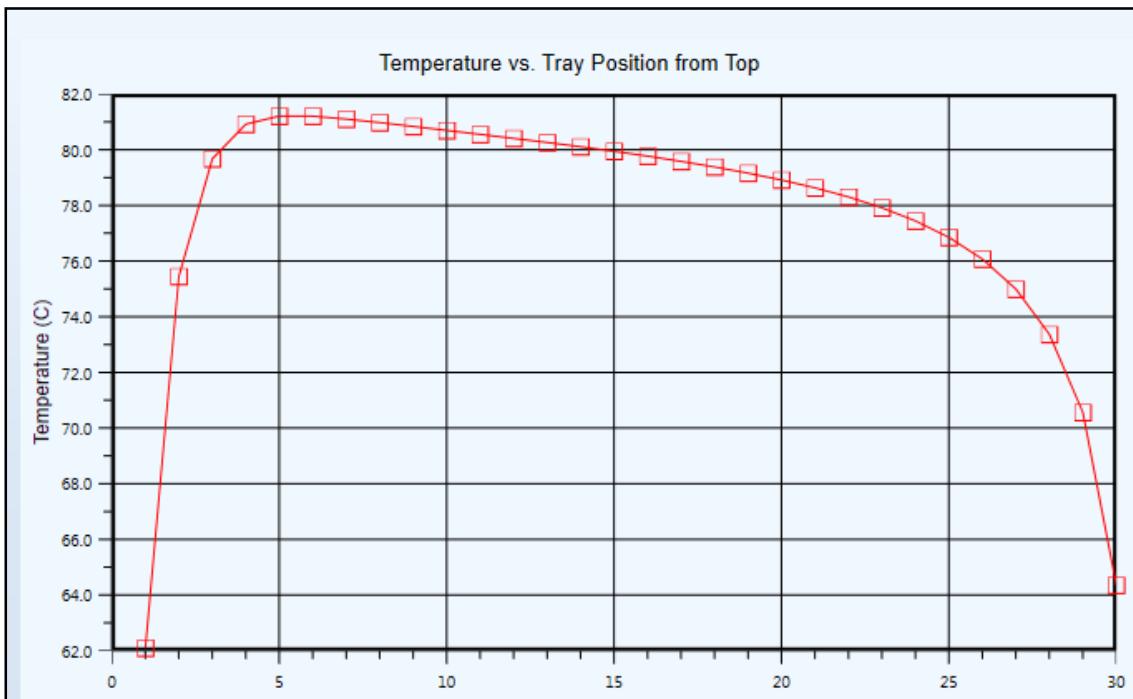


Figura 11.5.8. Temperatura en función del número de etapas de equilibrio en la columna C-401.



Figura 11.5.9. Caudal molar del vapor y del líquido en función del número de etapas de equilibrio en la columna de absorción C-401.

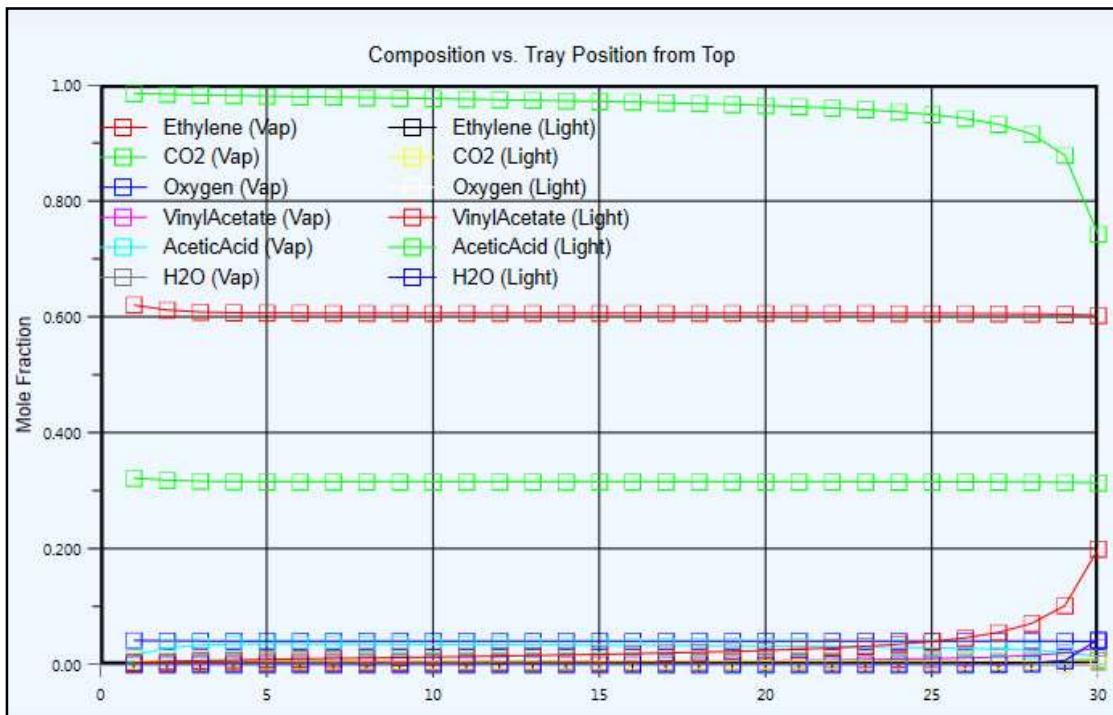


Figura 11.5.10. Composición de los diferentes componentes en función del número de etapas de equilibrio en la columna de absorción C-401.

11.4.2.2. Dimensionado

Una vez realizados todos los cálculos, se procede al dimensionado de la columna. Por defecto, el método riguroso trabaja con un diámetro de 1.5 m, con un espacio entre platos de 0.50 m. A pesar de ser unos valores bastante lógicos para las columnas de absorción, se realiza un diseño más preciso con la opción “*Tray Sizing*” que contiene el programa Hysys.

Esta aplicación permite calcular el diámetro y la altura de la columna tanto si es de platos como si es de relleno. Para este caso, se opta por utilizar la columna de platos ya que el diámetro calculado según el “*Tray Sizing*” es de 1.676 m.

Para llevar a cabo la separación deseada se necesitan 29 platos.

Hysys, por defecto, trabaja con platos en flujo cruzado ya que también presenta mayor eficacia en la transferencia y un intervalo de condiciones de operación más amplio que los platos de flujo cruzado.

En la siguiente tabla se presentan los parámetros del diseño de Hysys para la columna:

Tabla 11.5.3. Parámetros de diseño de Hysys del dimensionado de la columna C-401.

Elementos internos de la columna	
Tipo de plato	Sieve
Número de trayectorias del flujo	1
Método inundación	Glitsch
Geometría de la columna	
Diámetro (m)	1.676
Área transversal (m ²)	2.207
Área vacía (m ²)	0.1931
Área activa (m ²)	1.917
Área bajante (m ²)	0.1453
Espacio entre platos (m)	0.6096
Altura (m)	17.68
Resultados hidráulicos	
Inundación máxima (%)	66.58
Perdida de carga por plato (kPa)	0.761
Carga máxima vertedero (m ³ /h·m)	26.37
Detalles del plato	
Longitud total del vertedero (m)	1.079
Altura del vertedero (m)	0.0508
Espacio bajante (m)	0.0381
Número de espacios	6098
Longitud de flujo (m)	1.283
Ancho de flujo (m)	1.494

Como ya se ha mencionado antes, para comprobar los resultados obtenidos en Hysys, se calcula el diámetro de la columna a partir de correlaciones empíricas. Debido a que los caudales de líquido y de gas no son constantes en la columna, se calcula el diámetro en dos partes, la parte superior e inferior.

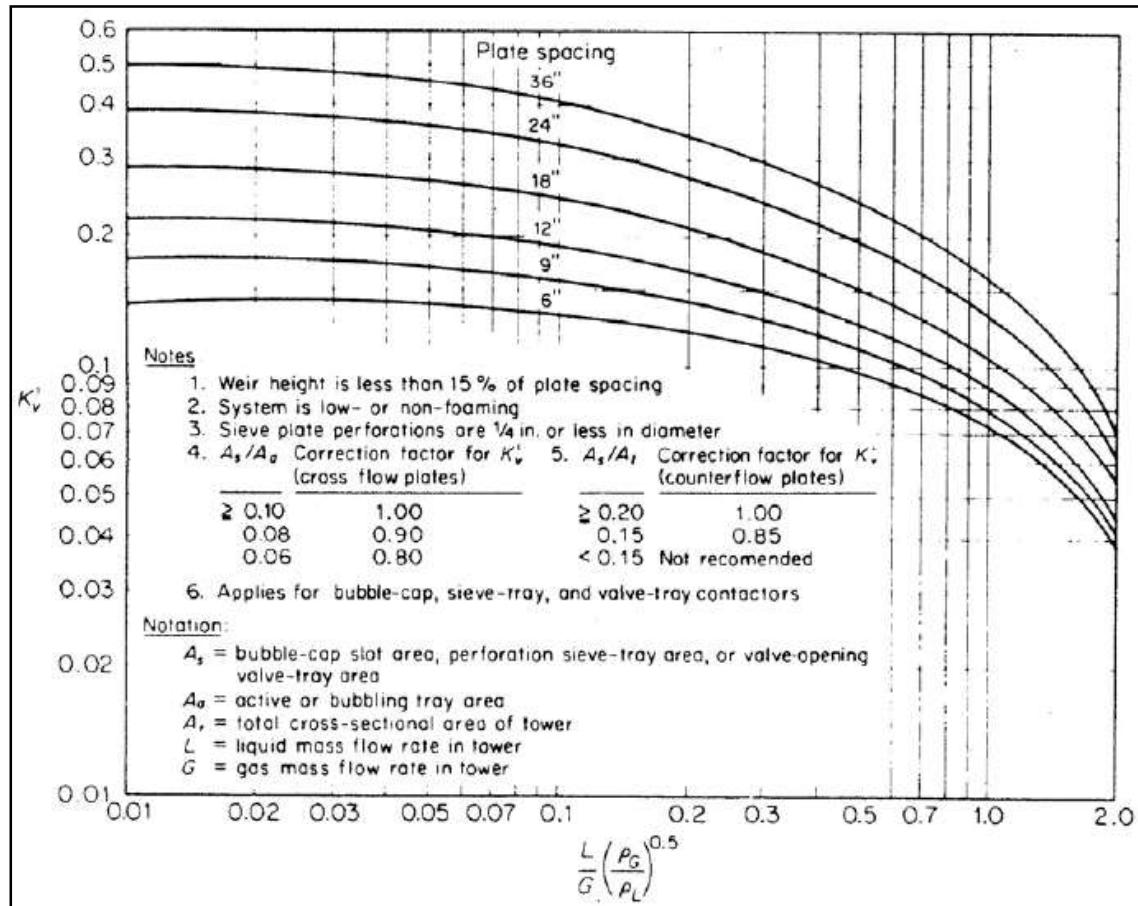


Figura 11.5.11. Gráfica de correlación de inundación por arrastre de Fair para columnas de flujo cruzado.

Para calcular el valor del diámetro, primero se encuentra el valor del eje de las abscisas, definido por la siguiente ecuación:

$$\frac{L}{G} \left(\frac{\rho_G}{\rho_L} \right)^{0.5} \quad \text{Ecuación 11.5.1}$$

Dónde:

- L' : Caudal de líquido en la torre (lb/h).
- G' : Caudal de gas en la torre (lb/h).
- ρ_G : Densidad del gas (lb/pie³).
- ρ_L : Densidad del líquido (lb/pie³).

- Para la zona superior:

Se encuentra L y G:

$$L = 25493.79 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot \frac{2.205 \text{ lb}}{1 \text{ kg}} = 56213.81 \frac{\text{lb}}{\text{h}}$$

$$G = 53523.52 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot \frac{2.205 \text{ lb}}{1 \text{ kg}} = 118019.36 \frac{\text{lb}}{\text{h}}$$

Se sustituyen los valores en la *Ecuación 11.5.1*:

$$\frac{56213.81}{118019.36} \cdot \left(\frac{0.5906}{63.28} \right)^{0.5}$$

Obteniéndose un valor de abscisa de **0.04602** \cong **0.05**

Generalmente, el espaciamiento entre los platos se escoge con base en la facilidad para la construcción, mantenimiento y costo. La tabla X.X2 resume algunos valores recomendados.

1. Espaciamiento de los platos			
Diámetro de la torre, T		Espaciamiento de la torre, t	
m	ft	m	in
		0.15	6 mínimo
1 menos	4 menos	0.50	20
1-3	4-10	0.60	24
3-4	10-12	0.75	30
4-8	12-24	0.90	36

Figura 11.5.12. Condiciones y dimensiones generales recomendadas para las torres de platos.

Por lo tanto, se elige un espaciamiento entre platos de 24", valor que también coincide con el diseño en Hysys. De esta manera, se obtiene que $K_v' = 0.37$

La velocidad de vapor en una columna de platos está limitada por el arrastre de gotas de líquidos en los gases ascendentes y por la capacidad de los vertederos para manejar el líquido. La torre debe tener la suficiente sección transversal para manejar los gases

ascendentes sin un transporte excesivo de líquido de una bandeja a otra. Para el diseño del diámetro de la torre con más precisión se utiliza la ecuación de Fair, que tiene en cuenta la tensión superficial del líquido.

$$V'_m = K'v \left(\frac{\rho_L - \rho_G}{\rho_G} \right)^{0.5} \left(\frac{\sigma}{20} \right)^{0.2} \quad \text{Ecuación 11.5.2}$$

Dónde:

- V'_m : Velocidad máxima permisible para el vapor considerando el área activa de burbujeo del plato A_a + área de vertedero A_d (pie/s)
- $K'v$: Constante empírica dada por la *Figura 11.5.11* con error del $\pm 10\%$
- σ : Tensión superficial (dyn/cm)

Se sustituyen los valores en la *Ecuación 11.5.2*:

$$V'_m = 0.37 \cdot \left(\frac{63.28 - 0.5906}{0.5906} \right)^{0.5} \left(\frac{27.02}{20} \right)^{0.2} = 4.048 \text{ ft/s}$$

En el diseño real, se utilizan valores apropiadamente pequeños de V (velocidad de operación); para líquidos que no hacen espuma, es normal un valor del 80 al 85% de V'_m . Para este sistema, se elige un valor del 80%. Por lo tanto, se calcula V :

$$V = 0.8 \cdot 4.048 = 3.238 \text{ pie/s}$$

A continuación, se calcula A_n partir de la siguiente ecuación:

$$A_n = \frac{Wv}{V \cdot \rho_G} \quad \text{Ecuación 11.5.3}$$

Dónde:

- A_n : sección transversal neta (ft^2)
- Wv : caudal másico del gas (lb/s)
- V : velocidad de operación (ft/s)
- ρ_G : densidad del gas (lb/ft^3)

Se sustituyen los valores en la *Ecuación 11.5.3*:

$$A_n = \frac{32.78}{3.238 \cdot 0.5906} = 17.14 \text{ ft}^2$$

Para calcular la sección transversal de la torre, A_t , se tiene en cuenta la siguiente aproximación : $A_d \sim 10-12\% A_t$.

$$A_n = A_T - A_d$$

Para este sistema se elige un 11%, por lo tanto:

$$A_T = \frac{A_n}{0.89} \rightarrow A_T = \frac{17.14}{0.89} = 19.26 \text{ ft}^2$$

Se calcula el diámetro de la columna a partir de la siguiente ecuación:

$$D = \left(\frac{4 \cdot A_T}{\pi} \right)^{0.5} \quad \text{Ecuación 11.5.4}$$

Dónde:

- D: diámetro (pie)
- A_T : sección transversal de la columna (pie^2)

Sustituyendo,

$$D = \left(\frac{4 \cdot 19.26}{\pi} \right)^{0.5} = 4.953 \text{ ft}$$

Para la zona inferior se procede de la misma manera, obteniéndose los siguientes parámetros de diseño en la *Tabla 11.5.4* a modo de resumen para ambas zonas:

Tabla 11.5.4. Parámetros de diseño para calcular el diámetro de la columna C-401.

	ZONA SUPERIOR	ZONA INFERIOR
L (lb/h)	5.62E+04	61863.61
G (lb/h)	1.18E+05	125551.79
ρ_G(lb/ft³)	0.59	0.63
ρ_L(lb/ft³)	63.28	61.57
t (m)	0.61	0.61
K'_v	0.37	0.37
σ (dyn/cm)	27.02	26.33
V'_m (ft/s)	4.05	3.85
V (ft/s)	3.24	3.08
A_n (ft²)	17.14	18.02
A_T (ft²)	19.26	20.25
D (ft)	4.95	5.08

Se compara el valor del diámetro obtenido por las dos zonas de manera teórica y con Hysys en la *Tabla 11.5.5*.

Tabla 11.5.5. Diámetro teórico y obtenido por Hysys de la columna C-401.

	ZONA SUPERIOR	ZONA INFERIOR	HYSYS
Diámetro (m)	1.509	1.548	1.676

Como valor final se elige el de Hysys ya que es el diámetro más grande y, por lo tanto, el más conservativo.

11.4.2.3. Diseño mecánico

Debido a las condiciones de operación de la columna, se opta por utilizar el plato perforado con el fin de tener un funcionamiento estable de la columna. A continuación se detallan sus características.

- Plato perforado (*Sieve Tray*)

El plato va a proporcionar una mezcla íntima entre las corrientes de líquido y vapor. Al plato se le exige que sea capaz de tratar las cantidades adecuadas de líquido y vapor sin una inundación o un arrastre excesivos, que sea estable en su funcionamiento y resulte relativamente simple en cuanto a instalación y mantenimiento. También es importante conseguir que la caída de presión en el plato sea mínima.

Así como ya se ha tenido en cuenta en el diseño en Hysys, se ha elegido el plato perforado ya que su construcción es más sencilla, requiriendo la perforación de pequeños agujeros en la bandeja, y por ello es el más empleado en la industria.



Figura 11.5.13. Plato perforado.

A continuación se procede con el diseño mecánico de la columna de absorción según el código ASME.

Para determinar el material adecuado para el diseño de la columna se tiene en cuenta las propiedades del fluido. Ya que la corriente contiene mayoritariamente ácido acético y este siendo un componente que produce alta corrosión, se necesita un material que sea resistente. Se elige el acero inoxidable AISI 316L, por sus propiedades.

Es importante conocer la presión y temperatura de diseño.

Presión de diseño

Para el cálculo de la presión de diseño se utilizan las siguientes ecuaciones y se escogerá el valor de presión más alto.

$$P_{\text{diseño},1} = 1.1 \cdot P_{\text{operación}}$$

$$P_{\text{diseño},2} = P_{\text{operación}} + 2 \text{ bar}$$

Dónde:

- $P_{\text{operación}}$: Presión de operación (800 kPa = 8 bar)

$$P_{\text{diseño},1} = 1.1 \cdot 8 \text{ bar} = 8.8 \text{ bar}$$

$$P_{\text{diseño},2} = 8 \text{ bar} + 2 \text{ bar} = 10 \text{ bar}$$

La presión de diseño mayor es la 2, por lo tanto para el diseño se utilizará una presión de **10 bar**.

Temperatura de diseño

La temperatura de diseño se establece 20°C por encima de la temperatura de operación de la columna. La columna tiene dos temperaturas, una en la parte superior (62.10°C) y otra en la parte inferior de la columna (64.35°C).

$$T_{\text{diseño,sup.}} = T_{\text{operación}} + 20 \text{ °C}$$

$$T_{\text{diseño,inf.}} = T_{\text{operación}} + 20 \text{ °C}$$

Dónde:

- $T_{\text{operación}}$: Temperatura de operación a cada zona de la columna.

$$T_{\text{diseño,sup.}} = 62.10 \text{ °C} + 20 \text{ °C} = 82.10 \text{ °C}$$

$$T_{\text{diseño,inf.}} = 64.35 \text{ °C} + 20 \text{ °C} = 84.35 \text{ °C}$$

Se elige la temperatura de diseño mayor, es decir, **84.35°C**.

Espesor de los cabezales

La siguiente *Figura 11.5.14* muestra los parámetros para el cálculo del cabezal según el código ASME.

E		ASME FLANGED AND DISHED HEAD (TORSOSPHERICAL HEAD)															
		When $L/r = 16\frac{2}{3}$															
		$t = \frac{0.885PL}{SE - 0.1P}$						$P = \frac{SEt}{0.885L + 0.1t}$									
		When L/r less than $16\frac{2}{3}$															
		$t = \frac{PLM}{2SE - 0.2P}$						$P = \frac{2SEt}{LM + 0.2t}$									
VALUES OF FACTOR "M"																	
L/r	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50	2.75	3.00	3.25	3.50	4.00	4.50	5.00	5.50	6.00	6.50
M	1.00	1.03	1.06	1.08	1.10	1.13	1.15	1.17	1.18	1.20	1.22	1.25	1.28	1.31	1.34	1.36	1.39
L/r	7.00	8.00	9.00	9.50	10.0	10.5	11.0	11.5	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	16.5	*		
M	1.41	1.44	1.46	1.48	1.50	1.52	1.54	1.56	1.58	1.60	1.62	1.65	1.69	1.72	1.75	1.77	
* THE MAXIMUM ALLOWED RATIO : $L = D + 2t$ (see note 2 on facing page)																	

Figura 11.5.14. Cabezal toriesférico de ASME.

Dónde:

- L : Diámetro interno del cilindro (mm) = 1676 mm
- r: $0,1 \cdot$ Diámetro interno del cilindro (mm) = 167.6 mm

$$\frac{L}{r} = \frac{1676 \text{ mm}}{167.6 \text{ mm}} = 10$$

Con el valor de la relación L/r , se puede conocer el valor de $M = 1.54$, que será utilizada en la *Ecuación 11.5.5* para el cálculo del espesor de los cabezales del tanque.

$$t_{\text{cab.}} = \frac{P_t \cdot L \cdot M}{2 \cdot S \cdot E - 0,2 \cdot P_t} + \text{C. A.} \quad \text{Ecuación 11.5.5}$$

Dónde:

- $t_{\text{cab.}}$: Espesor de los cabezales (mm).
- P_t : Presión de la columna (bar).
- L : Diámetro de la columna (mm).
- M: Factor que depende de la relación L/r .
- S: Esfuerzo del material (bar).

- E: Factor de soldadura (0.85).
- C.A.: Tolerancia de corrosión (2 mm).

La temperatura de diseño de la columna es $84.35^{\circ}\text{C} = 183.8^{\circ}\text{F}$. Por lo tanto corresponde a una $S = 1082.48$ bar, según la siguiente *Figura 11.5.15*.

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

Figura 11.5.15. Tensión máxima admisible en función de la temperatura para el acero inoxidable.

Se sustituyen los valores en la ecuación:

$$t_{\text{cab.}} = \frac{10 \text{ bar} \cdot 1676 \text{ mm} \cdot 1.54}{2 \cdot 1082.48 \text{ bar} \cdot 0.85 - 0.2 \cdot 10 \text{ bar}} + 2 \text{ mm} = 16.04 \text{ mm}$$

Además, se le suma una tolerancia de fabricación del 10% al espesor de cabezal. De esta manera el espesor será:

$$t_{\text{cab.}} = 1.10 \cdot 16.04 \text{ mm} = 17.6 \text{ mm}$$

Debido a que los espesores estándar de chapa en Europa son: 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 15, 20..., se elige un espesor de **20 mm**

A partir del valor del espesor de los cabezales y mediante la siguiente se puede calcular el diámetro externo del cabezal.

$$D_{\text{ext,cab.}} = D_{\text{int,cab.}} + 2 \cdot t_{\text{cab.}} \quad \text{Ecuación 11.5.6}$$

Dónde:

- $D_{\text{ext,cab.}}$: Diámetro externo del cabezal (mm).
- $D_{\text{int,cab.}}$: Diámetro interno del cabezal (mm).
- $t_{\text{cab.}}$: Espesor del cabezal (mm).

Sustitución de valores:

$$D_{ext,cab.} = 1676 \text{ mm} + 2 \cdot 20 \text{ mm} = 1716 \text{ mm} = 1.716 \text{ m}$$

Espesor de la columna

Para calcular el espesor del cilindro se procede de la misma manera que en el caso del espesor de los cabezales; siguiendo el código ASME, a partir de la ecuación de la *Figura 11.5.16*.

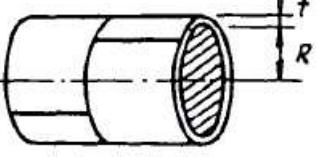
CYLINDRICAL SHELL (LONG SEAM) ¹	
	$t = \frac{PR}{SE - 0.6P}$ $P = \frac{SE t}{R + 0.6t}$
1. Usually the stress in the long seam is governing. See preceding page. 2. When the wall thickness exceeds one half of the inside radius or P exceeds 0.385 SE, the formulas given in the Code UA 2 shall be applied.	

Figura 11.5.16. Espesor para el cilindro según ASME.

Se utiliza la siguiente *Ecuación 11.5.7* para el cálculo del espesor del cuerpo cilíndrico:

$$t_c = \frac{P_c \cdot R_{int,c}}{S \cdot E - 0.6 \cdot P_c} + \text{C. A.} \quad \text{Ecuación 11.5.7}$$

Dónde:

- t_c : Espesor de la columna (mm).
- P_c : Presión de la columna (atm).
- $R_{int,c}$: Radio de la columna (mm).
- S : Esfuerzo del material (bar).
- E : Factor de soldadura (0.85).
- C.A.: Tolerancia de corrosión (2 mm).

Como se sabe, la temperatura de diseño de la columna es $84.35^\circ\text{C} = 138.8^\circ\text{F}$ y corresponde a una $S = 1082.48$ bar. Por lo tanto, la ecuación queda de la siguiente manera:

$$t_c = \frac{10 \text{ bar} \cdot 988 \text{ mm}}{1082.48 \text{ bar} \cdot 0.85 - 0.6 \cdot 10 \text{ bar}} + 2 \text{ mm} = 12.81 \text{ mm}$$

De igual manera que para el diseño del espesor del cabezal, mediante cálculo se obtiene un valor de 12.81 mm pero según los valores estándar de chapa, se decide un valor de espesor de columna de **15 mm**.

Una vez conocido el espesor que se usará para el diseño de todo el equipo, se determina el diámetro externo de toda la columna según la *Ecuación 11.5.6* anteriormente expresada.

Por lo tanto se sustituyen los valores:

$$D_{\text{ext, columna}} = 1.676 \text{ m} + 2 \cdot 0.015 \text{ m} = \mathbf{1.706 \text{ m}}$$

Altura de los cabezales

Se determina la altura de los cabezales según las ecuaciones proporcionadas por la página web de “Koenig-co”, proveedora de cabezales de los equipos.

$$DH = 0.1935 \cdot D_{\text{tanque}} - 0.455 \cdot t_{\text{cab.}} \quad \text{Ecuación 11.5.8}$$

$$SF = 3.5 \cdot t_{\text{cab.}} \quad \text{Ecuación 11.5.9}$$

$$TH = SF + DH \quad \text{Ecuación 11.5.10}$$

Dónde:

- D_{columna} : Diámetro interno de la columna (m)
- $t_{\text{cab.}}$: Espesor del cabezal (m)

Se sustituyen los valores en las ecuaciones:

$$DH = 0.1935 \cdot 1676 \text{ mm} - 0.455 \cdot 20 \text{ mm} = 315.21 \text{ mm}$$

$$SF = 3.5 \cdot 10 \text{ mm} = 70 \text{ mm}$$

$$TH = 315.21 \text{ mm} + 70 \text{ mm} = 385.2 \text{ mm} = 0.3852 \text{ m}$$

Se obtiene una altura de los cabezales de **0.3852 m**.

Altura de la columna

Se procede a calcular la altura de la columna de absorción a partir de la siguiente ecuación:

$$H_{\text{Total}} = H + 2 \cdot H_{\text{cab.}} \quad \text{Ecuación 11.5.11}$$

Dónde:

- H_{Total} : Altura total de la columna (m).
- H : Altura de la columna (m).
- $H_{\text{cab.}}$: Altura del cabezal (m).

Se obtiene la altura total del tanque:

$$H_{\text{Total}} = 17.68 \text{ m} + 2 \cdot 0.3852 \text{ m} = \mathbf{18.45 \text{ m}}$$

Peso del tanque vacío

Se ha de conocer el volumen de la columna para poder calcular el peso. Por eso, primero se calcula el volumen de los cabezales de la siguiente manera:

→ Cálculo del volumen interno del cabezal:

$$V_{\text{int,cab.}} = 0.1 \cdot (D_{\text{columna}})^3 \quad \text{Ecuación 11.5.12}$$

Dónde:

- $V_{\text{int,cab.}}$: Volumen interior del cabezal (m^3)
- D_{columna} : Diámetro de la columna (m)

$$V_{\text{int,cab.}} = 0.1 \cdot (1.676 \text{ m})^3 = 0.471 \text{ m}^3$$

→ Se calcula el volumen externo de los cabezales:

$$V_{\text{ext,cab.}} = 0.1 \cdot (D_{\text{columna}} + t_{\text{cab.}})^3 \quad \text{Ecuación 11.5.13}$$

Dónde:

- $V_{\text{ext,cab.}}$: Volumen interior del cabezal (m^3).
- D_{columna} : Diámetro interno de la columna (m).
- $t_{\text{cab.}}$: Espesor del cabezal (m).

$$V_{\text{ext,cab.}} = 0.1 \cdot (1.676 \text{ m} + 0.020 \text{ m})^3 = 0.488 \text{ m}^3$$

La diferencia de estos valores será el volumen que ocupa la pared del cabezal:

$$V_{\text{pared cab.}} = V_{\text{ext,cab.}} - V_{\text{int,cab.}} \quad \text{Ecuación 11.5.14}$$

Dónde:

- $V_{\text{pared cab.}}$: Volumen de la pared del cabezal (m^3).
- $V_{\text{ext,cab.}}$: Volumen exterior del cabezal (m^3).
- $V_{\text{int,cab.}}$: Volumen interior del cabezal (m^3).

$$V_{\text{pared cab.}} = 0.488 \text{ m}^3 - 0.471 \text{ m}^3 = 0.017 \text{ m}^3$$

De la misma manera se calcula el volumen interno del cilindro que conforma la columna:

$$V_{\text{int,c}} = \pi \cdot \left(\frac{D_{\text{columna}}}{2}\right)^2 \cdot H \quad \text{Ecuación 11.5.15}$$

Dónde:

- $V_{\text{int,c}}$: Volumen interior del cilindro de la columna (m^3).
- D_{columna} : Diámetro interno de la columna (m).
- H : Altura de la columna (m).

$$V_{int,c} = \pi \cdot \left(\frac{1.676 \text{ m}}{2} \right)^2 \cdot 17.68 \text{ m} = 39.00 \text{ m}^3$$

A continuación, se calcula también el volumen externo:

$$V_{ext,c} = \pi \cdot \left(\frac{D_{ext,columna}}{2} \right)^2 \cdot H \quad Ecuación 11.5.16$$

Dónde:

- $V_{ext,c}$: Volumen interior del cilindro de la columna (m^3).
- $D_{ext,columna}$: Diámetro interno de la columna (m).
- H : Altura de la columna (m).

$$V_{ext,c} = \pi \cdot \left(\frac{1.706 \text{ m}}{2} \right)^2 \cdot 17.68 = 40.41 \text{ m}^3$$

La diferencia entre estos dos volúmenes es el volumen de la pared del cilindro de la columna:

$$V_{pared cil.} = V_{ext,cil.} - V_{int,cil.} \quad Ecuación 11.5.17$$

Dónde:

- $V_{pared,cil.}$: Volumen de la pared del cilindro de la columna (m^3).
- $V_{ext,cil.}$: Volumen exterior del cilindro de la columna (m^3).
- $V_{int,cil.}$: Volumen interior del cilindro de la columna (m^3).

Los valores en la ecuación:

$$V_{pared cil.} = 40.41 \text{ m}^3 - 39.00 \text{ m}^3 = 1.41 \text{ m}^3$$

A continuación se calcula el volumen de la pared del equipo, mediante la siguiente expresión:

$$V_{pared column} = V_{pared,cil.} + 2 \cdot V_{pared,cab.} \quad Ecuación 11.5.17$$

Dónde:

- $V_{\text{pared column}}:$ Volumen de la pared de la columna (m^3).
- $V_{\text{pared, cil.}}$: Volumen pared del cilindro de la columna (m^3).
- $V_{\text{pared, cab.}}$: Volumen pared del cabezal (m^3).

$$V_{\text{pared column}} = 1.41 \text{ m}^3 + 2 \cdot 0.017 \text{ m}^3 = 1.44 \text{ m}^3$$

Para obtener el peso de la columna vacía, se considera que el peso de los elementos internos es del 10% del total del peso del equipo vacío y mediante la densidad del acero inoxidable AISI 316L que es 7960 kg/m^3 , la ecuación queda de la siguiente manera:

$$M_{\text{columna vacía}} = 1.1 \cdot V_{\text{pared column}} \cdot \rho_{\text{acero inox.}} \quad \text{Ecuación 11.5.18}$$

Dónde:

- $M_{\text{columna vacía}}$: Peso del equipo lleno de agua (kg).
- $V_{\text{pared column}}$: Volumen de la pared de la columna (m^3).
- $\rho_{\text{acero inox.}}$: Densidad del acero inoxidable AISI 316L (kg/m^3).
-

$$M_{\text{columna vacía}} = 1.1 \cdot 1.44 \text{ m}^3 \cdot 7960 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 12608.6 \text{ kg}$$

En toneladas:

$$M_{\text{tanque vacío}} = \mathbf{12.61 \text{ Tn}}$$

Peso del tanque lleno de agua

Para conocer el peso del equipo lleno de agua a modo de prueba, se calcula el volumen del mismo de la siguiente manera:

$$V_{\text{columna}} = V_{\text{int,c}} + 2 \cdot V_{\text{int,cab.}} \quad \text{Ecuación 11.5.19}$$

Dónde:

- V_{columna} : Volumen de la columna (m^3).
- $V_{\text{int,cil.}}$: Volumen interior del cilindro de la columna(m^3).

- $V_{int, cab.}$: Volumen interior del cabezal (m^3).

-

$$V_{columna} = 39.00 \text{ m}^3 + 2 \cdot 0.471 \text{ m}^3 = 39.94 \text{ m}^3$$

A continuación, se calcula el peso de la columna con agua:

$$M_{columna \text{ con agua}} = M_{columna \text{ vacía}} + V_{columna} \cdot \rho_{agua} \quad \text{Ecuación 11.5.20}$$

Dónde:

- $M_{columna \text{ con agua}}$: Peso del equipo lleno de agua (kg).
- $M_{columna \text{ vacía}}$: Masa total del equipo vacío (kg).
- $V_{columna}$: Volumen de la columna (m^3).
- ρ_{agua} : Densidad del agua (kg/m^3).

-

$$M_{tanque \text{ con agua}} = 12608.6 \text{ kg} + 39.94 \text{ m}^3 \cdot 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 52548.6 \text{ kg}$$

En toneladas:

$$M_{columna \text{ con agua}} = \mathbf{52.55 \text{ Tn}}$$

Peso de la columna en operación

Se procede a calcular el peso del equipo en operación, teniendo en cuenta la densidad del fluido y el volumen de la columna.

$$M_{columna \text{ en op.}} = M_{columna \text{ vacía}} + V_{columna} \cdot \rho_{mezcla} \quad \text{Ecuación 11.5.21}$$

Dónde:

- $M_{columna \text{ en op.}}$: Peso del equipo en operación (kg).
- $M_{columna \text{ vacía}}$: Masa total del equipo vacío (kg).
- $V_{columna}$: Volumen de la columna (m^3).

- ρ_{mezcla} : Densidad de la mezcla (kg/m^3).

A partir de la densidad media del fluido de operación se puede sustituir en la ecuación:

$$M_{\text{columna en op.}} = 12608.6 \text{ kg} + 39.94 \text{ m}^3 \cdot 988.0 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 52059.32 \text{ kg}$$

En toneladas:

$$M_{\text{tanque en op.}} = \mathbf{52.06 \text{ Tn}}$$

11.4.2.4. Aislamiento

Hacer uso de un aislante es necesario debido a que la temperatura de la columna consta de una parte a 64.35°C y se ha de usar como medida de seguridad, ya que las paredes pueden ser un peligro para los operarios y demás trabajadores. Para asegurar que no haya intercambio de calor con el exterior se decide aislar el equipo con una lana mineral. Por ello, se elige aislar el equipo con lana de vidrio.

El espesor requerido para el aislante se calcula con la siguiente ecuación:

$$X = \frac{30}{3.6 \cdot \left(\frac{\Delta T}{D_{ext,c}} \right)^{\frac{1}{4}}} \quad \text{Ecuación 11.5.22}$$

Dónde:

- X: Espesor del aislante (cm).
- ΔT : Diferencia de temperaturas entre el interior y exterior del reactor, siendo 20°C la temperatura media en Martorell, y la temperatura en el interior del tanque es 64.35°C .
- $D_{ext,c}$: Diámetro externo de la columna (m).

Por lo tanto,

$$X = \frac{30}{3.6 \cdot \left(\frac{64.35^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}}{1.706 \text{ m} \cdot 100 \text{ cm}} \right)^{\frac{1}{4}}} = 11.67 \text{ cm}$$

El aislamiento se recubre con una capa de aluminio para protegerlo de las condiciones meteorológicas de Martorell.

Finalmente, se necesita conocer el volumen aislante necesario para todo el equipo:

$$V_{\text{aislante}} = S_{\text{ext,columna}} \cdot X \quad \text{Ecuación 11.5.23}$$

$$S_{\text{ext,columna}} = S_{\text{ext,cil.}} + S_{\text{ext,cab.}} \quad \text{Ecuación 11.5.24}$$

Dónde:

- V_{aislante} : Volumen del aislante para todo el equipo (m^3).
- S_{ext} , column: Sección externa de la columna (m^2).
- X : Espesor del aislante (cm).
- $S_{\text{ext,cil.}}$: Sección externa del cilindro de la columna (m^2).

$$S_{\text{ext,cil.}} = \pi \cdot D_{\text{ext,columna}} \cdot H_{\text{tanque}} = \pi \cdot 1.706 \text{ m} \cdot 18.45 \text{ m} = 98.88 \text{ m}^2$$

- $S_{\text{ext,cab.}}$: Sección externa del cabezal (m^2).

$$S_{\text{ext,cab.}} = 0.931 \cdot (D_{\text{ext,columna}})^2 = 0.931 \cdot (1.706 \text{ m})^2 = 2.71 \text{ m}^2$$

Por lo tanto:

$$S_{\text{ext,columna}} = 98.88 \text{ m}^2 + 2.71 \text{ m}^2 = 101.6 \text{ m}^2$$

Seguidamente se obtiene el volumen del aislante necesario:

$$V_{\text{aislante}} = 101.6 \text{ m}^2 \cdot \left(11.67 \text{ cm} \cdot \frac{1 \text{ m}}{100 \text{ cm}} \right) = 11.8 \text{ m}^3$$

11.4.3. Columna de destilación C-402

Para el diseño de la columna de destilación se utiliza el simulador de procesos químicos Aspen HYSYS para realizar un diseño funcional (Short cut) y para el método riguroso.

11.4.3.1. Diseño funcional

El método *Shortcut Column* necesita los parámetros tales como la presión al condensador y al reboiler, los componentes clave pesado por el destilado (**Heavy Key**) y componente clave ligero por fondos o residuo (**Light Key**). Los componentes clave son aquellos en los que se basa la destilación y se obtienen tanto en el destilado como en el residuo. La presión se considera que no cambia a lo largo de la columna.

Para conocer estos componentes, se usa el Hysys para conocer las temperaturas de ebullición de cada componente puro y además la constante de equilibrio de cada componente, de esta manera se obtiene las volatilidades correspondientes a partir de la siguiente ecuación:

$$\alpha_{i,j} = \frac{K_i}{K_j} \quad \text{Ecuación 11.5.25}$$

Dónde:

- $\alpha_{i,j}$: Volatilidad relativa del componente *i* respecto del componente *j*.
- K_i : Constante de equilibrio del componente *i*.
- K_j : Constante de equilibrio del componente *j* (**Heavy Key**=Ácido acético).

A continuación, se presentan los componentes con las volatilidades correspondientes obtenidas:

Tabla 11.5.6. Volatilidad de los compuestos.

Compuesto	K	α , Volatilidad
Etileno	403.900	7822.971
CO ₂	171.000	3312.028
Oxígeno	4284.000	82975.015
VAM	0.451	8.737
Ácido acético	0.052	1.000
H ₂ O	0.126	2.448

Como se puede ver, la volatilidad del VAM es mayor que la del ácido acético, por lo tanto este será el componente clave ligero (**Light Key**) que se obtiene en el destilado. El ácido acético será el componente clave pesado (**Heavy Key**) que se obtiene por el residuo. Los demás componentes serán los no claves.

La patente del proceso proporciona las fracciones a recuperar de los componentes claves que se quieren obtener el destilado y en el residuo.

FR_{VAM}, D= 0.999

FR_{Ac. acético, B}= 0.979

A partir de las fracciones de recuperación y mediante la ecuación de *Fenske* se puede obtener el número mínimo de tapas necesarias para que se lleve a cabo la separación:

Ecuación de Fenske:

$$N_{\min} = \frac{\ln\left(\frac{FR_{LK,D} \cdot FR_{HK,B}}{(1-FR_{LK,D}) \cdot (1-FR_{HK,B})}\right)}{\ln \alpha_{LK-HK}} \quad Ecuación 11.5.26$$

Dónde:

- N_{\min} : Número mínimo de etapas necesarias.
- $FR_{LK,D}$: Fracción recuperada del componente clave ligero en el destilado.
- $FR_{HK,B}$: Fracción recuperada del componente clave pesado en el residuo.
- α_{LK-HK} : Volatilidad relativa del componente clave ligero respecto al pesado.

Sustituyendo los valores en la ecuación:

$$N_{\min} = \frac{\ln\left(\frac{0.999 \cdot 0.979}{(1-0.999) \cdot (1-0.979)}\right)}{\ln(8.737)} = 4.96 \approx 5 \text{ etapas de equilibrio}$$

Seguidamente se hace el balance de materia:

→ Balance de materia global:

$$F = B + D \quad Ecuación 11.5.27$$

$$V = L + D \quad Ecuación 11.5.28$$

→ Balance de materia del componente *i*:

$$F \cdot x_{F,i} = B \cdot x_{B,i} + D \cdot x_{D,i} \quad Ecuación 11.5.29$$

Se resuelve el balance de materia teniendo en cuenta que el 25% molar de agua se obtiene en el destilado. Es decir **37.44 kmol/h** de agua se obtiene en el destilado.

La tabla siguiente muestra el balance de materia teórico obtenido:

Tabla 11.5.7. Composiciones y caudales de los componentes.

		$z_i \cdot F$	F (kmol/h)	$D \cdot X_D$ (kmol/h)	X_D	$B \cdot X_B$ (kmol/h)	X_B
LNK	Etileno	0.0046	4.098	4.098	0.0238	0	0
LNK	CO ₂	0.0048	4.276	4.276	0.0249	0	0
LK	VAM	0.1261	112.326	111.203	0.6464	1.123	0.0016
HK	Ácido acético	0.8023	714.665	15.008	0.0872	699.657	0.9734
LNK/HNK	H ₂ O	0.0622	55.406	37.442	0.2177	17.964	0.0250
		890.77	172.03	1	718.74	1	

11.4.3.2. Diseño con Aspen Hysys

Método Shortcut Column

A partir de los datos obtenidos se pueden introducir los datos necesarios para el diseño de la columna de destilación C-402.

Las condiciones que se introducen para el diseño son las fracciones molares de los componentes clave pesado en el destilado (0.0872) y del componente clave ligero en el residuo (0.0016).

A continuación se presenta el esquema de entrada y salidas del Shortcut Column:

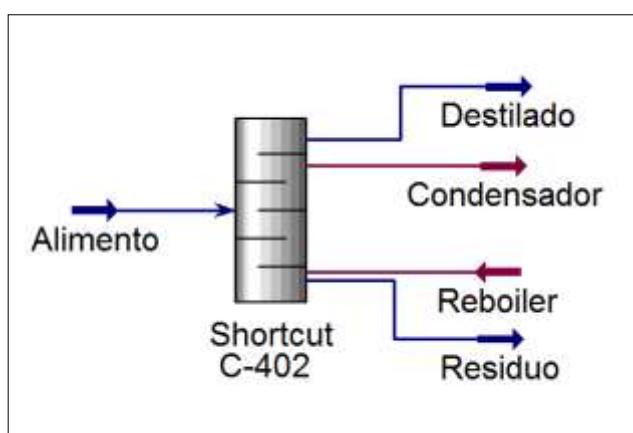


Figura 11.5.17. Diseño Short Column.

En la *Figura 11.5.18* se muestra las condiciones para el diseño de la columna, tanto las fracciones molares así como la presión del condensador y del reboiler. Además, la relación de reflujo.

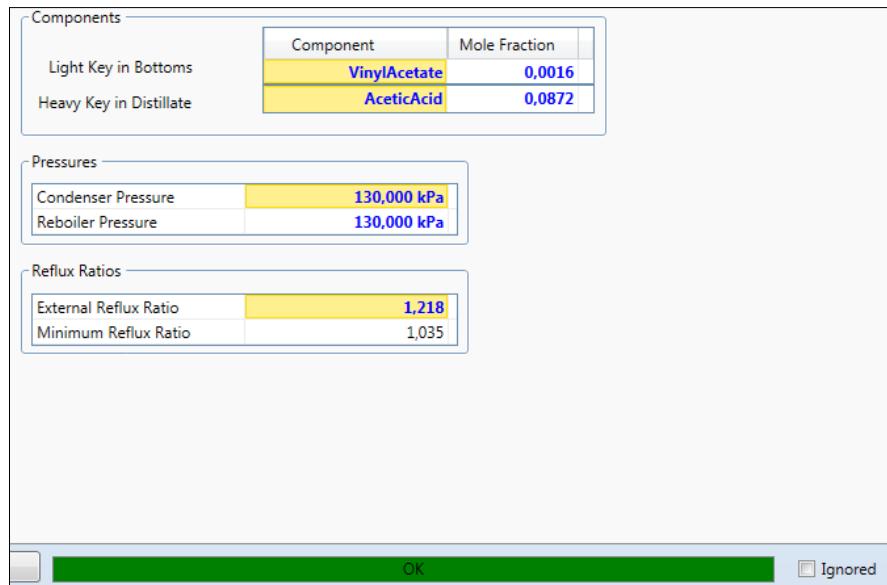


Figura 11.5.18. Condiciones de diseño de la Short Column.

Una vez impuestas las condiciones se procede al diseño de la columna y se obtiene como resultados la siguiente *Tabla 11.5.8*:

Tabla 11.5.8. Condiciones de diseño.

Platos	
Número mínimo de platos	5.098
Número de platos	11.748
Plato óptimo del alimento	3.283
Temperaturas	
Condensador (°C)	88.48
Reboiler (°C)	123.0
Caudales	
Rectificación vapor (kmol/h)	365.340
Rectificación líquido (kmol/h)	209.677
Stripping vapor (kmol/h)	359.445
Stripping líquido (kmol/h)	1094.558
Calor condensador (kJ/h)	-7374810.874
Calor reboiler (kJ/h)	18088627.24

Método Distillation Column

A partir de esta aproximación por el método *Shortcut Column* se procede a realizar el método riguroso *Distillation Column*, utilizando los parámetros obtenidos. Para la simulación en HYSYS de dicho método es necesario definir el caudal de entrada a partir del balance de materia, el número de platos y el plato del alimento. Además de la presión y temperatura que corresponde al condensador y al reboiler. Tener en cuenta la relación de reflujo y el caudal de destilado.

También, se ha de tener en cuenta si se trata de un condensador total o parcial. En este caso se simula con un diseño con condensador total.

La siguiente *Figura 11.5.19* muestra de forma esquemática el montaje de la columna de destilación, con sus respectivas salidas y entradas.

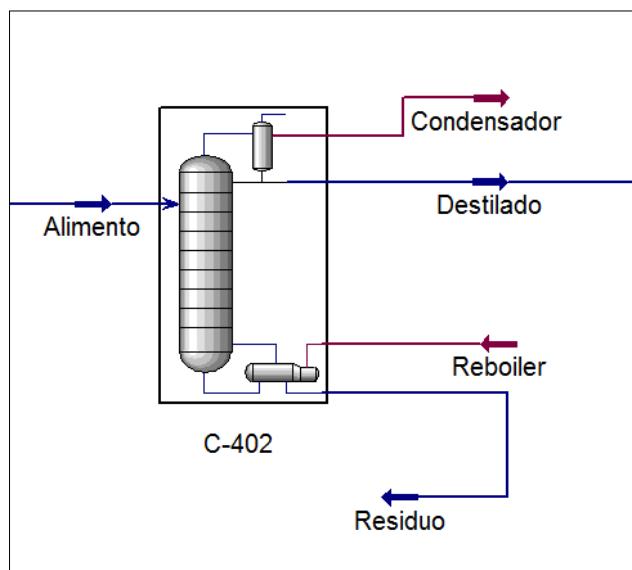


Figura 11.5.19. Diseño columna de destilación.

La siguiente *Figura 11.5.20* muestra las condiciones impuestas para el diseño de la columna de destilación.

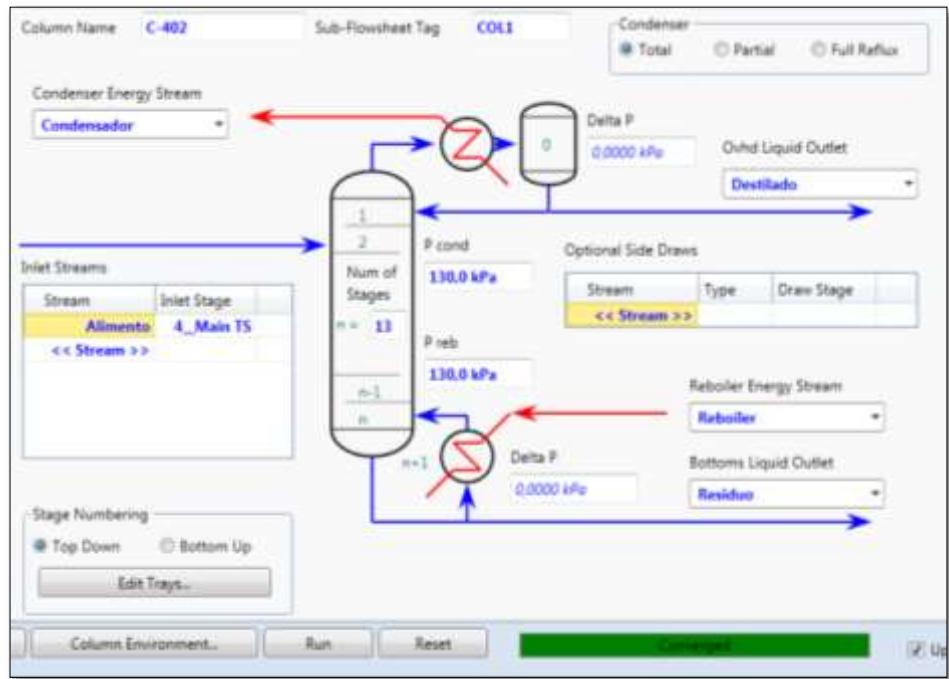


Figura 11.5.20. Condiciones de diseño de la columna de destilación C-402.

Se observa que el diseño converge por lo tanto se obtiene las condiciones de operación de la columna, tal como se puede observar en la siguiente *Tabla 11.5.9*:

Tabla 11.5.9. Condiciones de operación.

	Alimento		Destilado		Residuo
	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	
Fracción de fase	0.0066	0.9934	0.0002	0.9998	1
Temperatura (°C)		56		-142.4	123.1
Presión (kPa)		198		130	130
Densidad (kg/m ³)		398.5		1101	934
Caudal molar (kmol/h)		890.8		155.7	735.1
Caudal másico (kg/h)		53890		11200	42690
Entalpia molar (kJ/kg·mol)		-430500		-368400	-442800
Caudal de calor (kJ/kg)		-3.83E+08		-5.74E+07	-3.26E+08

También se obtiene las composiciones de los componentes en cada corriente, tal como se muestra en la siguiente *Tabla 11.5.10*:

Tabla 11.5.10. Composiciones resultantes de la destilación para cada caudal.

Componente	Alimento	Destilado	Residuo
Etileno	0.0046	0.0262	0.0000
CO ₂	0.0048	0.0274	0.0000
VAM	0.1261	0.7211	0.0001
Ácido acético	0.8023	0.0921	0.9527
H ₂ O	0.0622	0.1330	0.0472

Finalmente, se obtiene una columna de 13 etapas de equilibrio, donde la etapa de alimento es la 4 donde el objetivo es la separación de ácido acético y VAM, para su posterior purificación de este.

Como se puede observar en la *Tabla 11.5.10*, el destilado contiene mayormente VAM, con pequeñas cantidades de los otros componentes que en cantidades másicas con mínimas y como se ha dicho anteriormente se separan en el posterior proceso de purificación para por ultimo obtener el producto VAM. Por otro lado, por el residuo sale casi en su totalidad el ácido acético con una pequeña cantidad de agua, que esta será separada y el ácido acético se recirculará a la entrada del proceso.

Obtenido el diseño, el simulador HYSYS, permite obtener diferentes representaciones graficas tales como la temperatura, el caudal y composición de los componentes en función del plato de equilibrio. Las siguientes *Figuras 11.5.21, 11.5.22 y 11.5.23* muestran las mentadas representaciones:

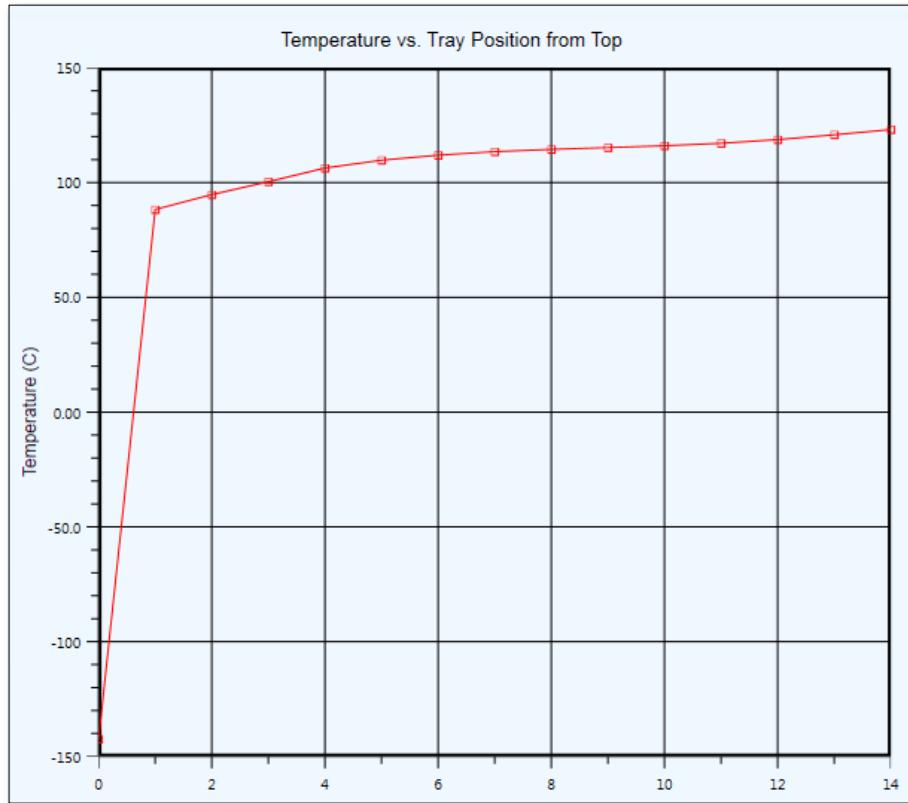


Figura 11.5.21 : Temperatura en función del número de etapas de equilibrio en la columna C-402.

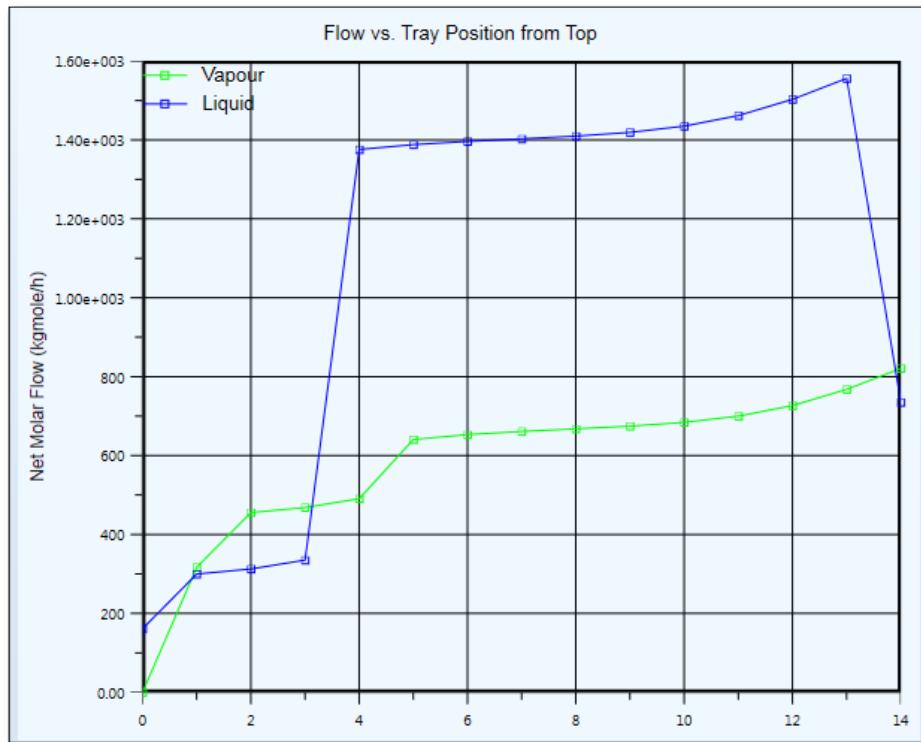


Figura 11.5.22: Caudal molar del vapor y líquido en función del número de etapas de equilibrio en la columna C-402.

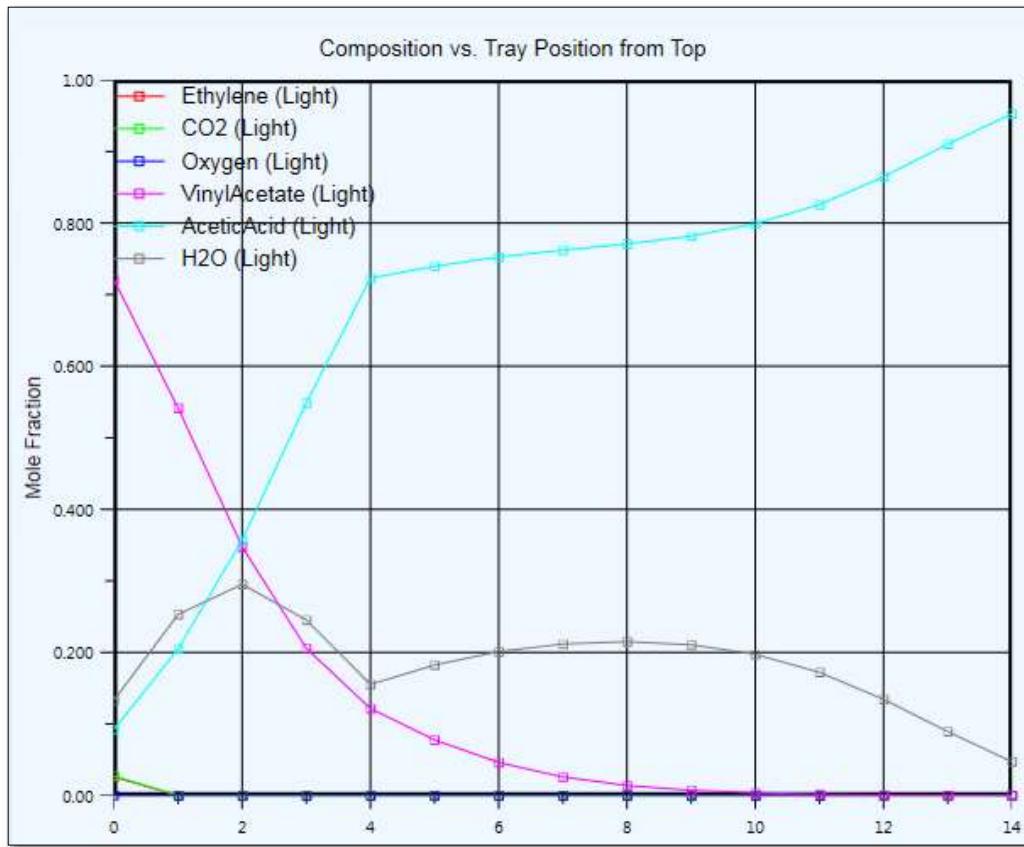


Figura 11.5.23 : Fracción molar de los componentes en función del número de etapas de equilibrio en la columna C-402.

11.4.3.3. Dimensionado

Obtenidos los resultados de los cálculos, a continuación se hace el dimensionado de la columna. Por defecto, el método riguroso mediante el simulador trabaja con un diámetro 1.5m y el espacio entre los platos 0.50 m. Se tratan de unos valores apropiados para las columnas de rectificación, sin embargo se decide realizar el diseño más preciso con la opción “Tray Sizing” del programa HYSYS.

El simulador de procesos químicos permite escoger el tipo de plato, se elige el Sieve Tray, es decir el plato con orificios.

A continuación, la siguiente *Tabla 11.5.11* muestra los parámetros del diseño obtenido a través de Hysys para la columna de destilación:

Tabla 11.5.11. Parámetros del diseño a partir de Hysys del dimensionado de la columna C-402.

Elementos internos de la columna	
Tipo de plato	Sieve
Numero de trayectoria de flujo	1
Método inundación	Glitsch
Geometría de la columna	
Diámetro (m)	1.981
Área transversal (m ²)	3.083
Área vacía (m ²)	0.2537
Área activa (m ²)	2.517
Área bajante (m ²)	0.2828
Espacio entre platos (m)	0.6096
Altura (m)	7.315
Resultados hidráulicos	
Inundación máxima (%)	76.33
Perdida de carga por plato (kPa)	0.866
Carga máxima de vertedero (m ³ /h·m)	62.18
Detalles del plato	
Longitud total del vertedero (m)	1.405
Altura del vertedero (m)	0.0508
Espacio bajante (m)	0.0381
Número de orificios	8010
Longitud de flujo (m)	1.397
Ancho de flujo (m)	1.802

Como comprobación de los resultados obtenidos anteriormente, se calcula el diámetro de la columna de destilación mediante unas correlaciones empíricas.

Se observa en la siguiente *Figura 11.5.24*, la correlación de *Fair* que se usa también en la columna de absorción y además para esta columna de destilación debido a que se considera que también opera en flujo cruzado, es decir, el vapor y líquido en contracorriente.

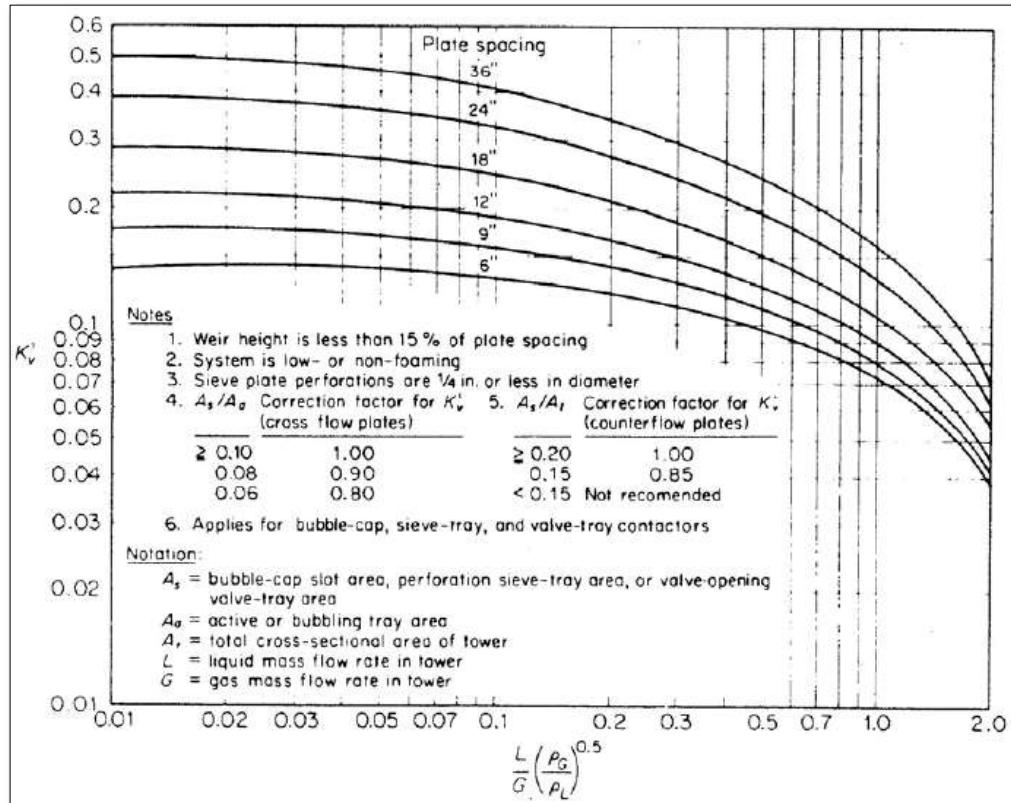


Figura 11.5.24. Gráfica de correlación de inundación por arrastre de Fair para columnas de flujo cruzado.

Para el cálculo del diámetro, primero se ha de encontrar el valor del eje de las abscisas según la siguiente ecuación:

$$\frac{L}{G} \left(\frac{\rho_G}{\rho_L} \right)^{0.5} \quad \text{Ecuación 11.5.1}$$

Dónde:

- L: Caudal del líquido en la torre (lb/h).
- G: Caudal del gas en la torre (lb/h).
- ρ_G : Densidad del gas (lb/pie³).
- ρ_L : Densidad del líquido (lb/pie³).

Mediante el simulador se obtiene los caudales de líquido y gas, por lo tanto se determina L y G en las unidades correspondientes al cálculo:

$$L = 81797.70 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot \frac{2.205 \text{ lb}}{1 \text{ kg}} = 180363.93 \frac{\text{lb}}{\text{h}}$$

$$G = 22811.42 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot \frac{2.205 \text{ lb}}{1 \text{ kg}} = 50299.18 \frac{\text{lb}}{\text{h}}$$

Seguidamente, se sustituyen los valores en la *Ecuación 11.5.1*:

$$\frac{180363.93 \text{ lb/h}}{50299.18 \text{ lb/h}} \left(\frac{2.822 \text{ kg/m}^3}{936.5 \text{ kg/m}^3} \right)^{0.5} = 0.197 \approx 0.20$$

Se obtiene un valor de abscisa de **0.20**.

A continuación se ha de escoger el espaciamiento entre platos en función de su mantenimiento, facilidad de construcción e instalación y su costo. La siguiente *Figura 11.5.25* presenta unos valores recomendados.

1. Espaciamiento de los platos			
Diámetro de la torre, T		Espaciamiento de la torre, t	
m	ft	m	in
1 menos	4 menos	0.15	6 mínimo
1-3	4-10	0.50	20
3-4	10-12	0.60	24
4-8	12-24	0.75	30
		0.90	36

Figura 11.5.25. Condiciones y dimensiones generales recomendadas para las torres de platos.

Por lo tanto, se elige un espaciamiento entre plato de 24" que además se corresponde con el espaciado entre platos que proporciona Hysys.

Se sitúan los valores gráficamente y se obtiene un valor de **K_{v'}=0.33**.

Tal como se ha mencionado en el apartado del diseño de la absorción, la torre ha de tener la suficiente sección transversal para manejar el vapor ascendente sin el transporte excesivo de líquido en el sí del gas.

La velocidad del vapor se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$V'_m = K'_v \left(\frac{\rho_L - \rho_G}{\rho_G} \right)^{0.5} \left(\frac{\sigma}{20} \right)^{0.2} \quad \text{Ecuación 11.5.2}$$

Dónde:

- V'_m : Velocidad máxima permisible para el vapor considerando el área activa de burbujeo del plato (A_a) y el área de vertedero (A_d) (pie/s).
- K'_v : Constante empírica obtenida por la *Figura 11.5.24* con error del $\pm 10\%$.
- ρ_G : Densidad del gas (lb/pie³).

- ρ_L : Densidad del líquido (lb/pie³).
- σ : Tensión superficial (Hysys: 29.29 dyn/cm).
-

Se sustituyen los valores en la ecuación:

$$V'm = 0.33 \cdot \left(\frac{936.5 \text{ kg/m}^3 - 2.822 \text{ kg/m}^3}{2.822 \text{ kg/m}^3} \right)^{0.5} \cdot \left(\frac{29.29}{20} \right)^{0.2} = 6.48 \frac{\text{pie}}{\text{s}}$$

En el diseño real de la columna se utilizan valores menores de la velocidad de operación (V). Para líquido que no producen espuma, se utiliza un valor entre el 80 y el 85% de V'm. Se elige un valor del 80%, para obtener el valor de V:

$$V = 0.80 \cdot 6.48 \frac{\text{pie}}{\text{s}} = 5.18 \frac{\text{pie}}{\text{s}}$$

A continuación se calcula la sección transversal neta (A_n) que se utilizará en el cálculo del diámetro según la siguiente expresión:

$$A_n = \frac{W_V}{V \cdot \rho_G} \quad \text{Ecuación 11.5.3}$$

Dónde:

- A_n : Sección transversal neta (pie²).
- W_V : Caudal másico del gas (lb/s).
- V : Velocidad de operación (pie/s).
- ρ_G : Densidad del gas (lb/pie³).

$$A_n = \frac{50299.18 \frac{\text{lb}}{\text{h}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}}}{5.18 \frac{\text{pie}}{\text{s}} \cdot 0.176 \frac{\text{lb}}{\text{pie}^3}} = 15.33 \text{ pie}^2$$

También es necesario calcular la sección transversal de la columna (A_T), teniendo en cuenta la siguiente aproximación: $A_d \approx 10-12\% A_T$. Se decide un valor del 11%.

Por lo tanto, mediante la Ecuación 11.5.30, se calcula la sección transversal:

$$A_n = A_T - A_d \quad \text{Ecuación 11.5.30}$$

Dónde:

- A_T : Sección transversal de la columna (pie²).

- Ad: Área del vertedero (pie²).

Entonces,

$$A_T = \frac{A_n}{0.89} = \frac{15.33 \text{ pie}^2}{0.89} = 17.22 \text{ pie}^2$$

Se procede a calcular el diámetro a partir de la siguiente *Ecuación 11.5.31*:

$$D = \left(\frac{4 \cdot A_T}{\pi} \right)^{0.5} \quad \text{Ecuación 11.5.31}$$

Dónde:

- D: Diámetro de la columna (pie).
- A_T: Sección transversal de la columna (pie²).

Se sustituyen los valores:

$$D = \left(\frac{4 \cdot 17.22 \text{ pie}^2}{\pi} \right)^{0.5} = 4.68 \text{ pie}$$

Se obtiene un diámetro de columna de **4.68 pie = 1.43 m.**

Como valor final de diseño se elige el obtenido en Hysys, siendo este el más grande (**1.981 m**), y por lo tanto, el más conservativo.

11.4.3.4. Diseño mecánico

Debido a las condiciones de operación de la columna, se opta por utilizar el plato perforado con el fin de tener un funcionamiento estable de la columna. A continuación se detallan sus características.

- Plato perforado (*Sieve Tray*)

El plato va a proporcionar una mezcla íntima entre las corrientes de líquido y vapor. Al plato se le exige que sea capaz de tratar las cantidades adecuadas de líquido y vapor sin una inundación o un arrastre excesivos, que sea estable en su funcionamiento y resulte relativamente simple en cuanto a instalación y mantenimiento. También es importante conseguir que la caída de presión en el plato sea mínima.

Así como ya se ha tenido en cuenta en el diseño en Hysys, se ha elegido el plato perforado ya que su construcción es más sencilla, requiriendo la perforación de pequeños agujeros en la bandeja, y por ello es el más empleado en la industria.



Figura 11.5.26. Plato perforado

A continuación se procede con el diseño mecánico de la columna de destilación según el código ASME.

Para determinar el material adecuado para el diseño de la columna se tiene en cuenta las propiedades del fluido. Ya que la corriente contiene mayoritariamente ácido acético y este siendo un componente que produce alta corrosión, se necesita un material que sea resistente. Se elige el acero inoxidable AISI 316L, por sus propiedades. Seguidamente es importante conocer la presión y temperatura de diseño.

Presión de diseño

Para el cálculo de la presión de diseño se utilizan las siguientes ecuaciones y se escogerá el valor de presión más alto.

$$P_{\text{diseño},1} = 1.1 \cdot P_{\text{operación}}$$

$$P_{\text{diseño},2} = P_{\text{operación}} + 2 \text{ bar}$$

Dónde:

- $P_{\text{operación}}$: Presión de operación (130 kPa = 1.30 bar)

$$P_{\text{diseño},1} = 1.1 \cdot 1.30 \text{ bar} = 1.43 \text{ bar}$$

$$P_{\text{diseño},2} = 1.30 \text{ bar} + 2 \text{ bar} = 3.30 \text{ bar}$$

La presión de diseño mayor es la 2, por lo tanto para el diseño se utilizará una presión de 3.30 bar.

Temperatura de diseño

La temperatura de diseño se establece 15°C por encima de la temperatura de operación de la columna. La columna tiene dos temperatura, una en la parte superior (88.28°C) y otra en la parte inferior de la columna (120.8°C).

$$T_{\text{diseño,sup.}} = T_{\text{operación}} + 15 \text{ °C}$$

$$T_{\text{diseño,inf.}} = T_{\text{operación}} + 15 \text{ °C}$$

Dónde:

- $T_{\text{operación}}$: Temperatura de operación de la columna a cada parte de la columna.

$$T_{\text{diseño,sup.}} = 88.28 \text{ °C} + 15 \text{ °C} = 103.28 \text{ °C}$$

$$T_{\text{diseño,inf.}} = 120.8 \text{ °C} + 15 \text{ °C} = 135.8 \text{ °C}$$

Se elige la temperatura de diseño mayor, es decir, 135.8°C.

Espesor de los cabezales

La siguiente *Figura 11.5.27* muestra los parámetros para el cálculo del cabezal según el código ASME.

E		ASME FLANGED AND DISHED HEAD (TORSOSPHERICAL HEAD)															
		When $L/r = 16^{2/3}$															
		$t = \frac{0.885PL}{SE - 0.1P}$						$P = \frac{SEt}{0.885L + 0.1t}$									
		When L/r less than $16^{2/3}$															
		$t = \frac{PLM}{2SE - 0.2P}$						$P = \frac{2SEt}{LM + 0.2t}$									
VALUES OF FACTOR "M"																	
L/r	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50	2.75	3.00	3.25	3.50	4.00	4.50	5.00	5.50	6.00	6.50
M	1.00	1.03	1.06	1.08	1.10	1.13	1.15	1.17	1.18	1.20	1.22	1.25	1.28	1.31	1.34	1.36	1.39
L/r	7.00	8.00	9.00	9.50	10.0	10.5	11.0	11.5	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	16.5	*		
M	1.41	1.44	1.46	1.48	1.50	1.52	1.54	1.56	1.58	1.60	1.62	1.65	1.69	1.72	1.75	1.77	
* THE MAXIMUM ALLOWED RATIO : $L = D + 2t$ (see note 2 on facing page)																	

Figura 11.5.27. Cabezal toriesférico de ASME.

Dónde:

- L : Diámetro interno del cilindro (mm) = 1981 mm
- r: $0,1 \cdot$ Diámetro interno del cilindro (mm) = 198.1 mm

$$\frac{L}{r} = \frac{1981 \text{ mm}}{198.1 \text{ mm}} = 10$$

Con el valor de la relación L/r , se puede conocer el valor de $M = 1.54$, que será utilizada en la *Ecuación 11.5.32* para el cálculo del espesor de los cabezales del tanque.

$$t_{\text{cab.}} = \frac{P_t \cdot L \cdot M}{2 \cdot S \cdot E - 0.2 \cdot P_t} + \text{C. A.} \quad \text{Ecuación 11.5.32}$$

Dónde:

- $t_{\text{cab.}}$: Espesor de los cabezales (mm).
- P_t : Presión de la columna (bar).
- L : Diámetro de la columna (mm).
- M: Factor que depende de la relación L/r .
- S: Esfuerzo del material (bar).
- E: Factor de soldadura (0.85).
- C.A.: Tolerancia de corrosión (2 mm).

La temperatura de diseño de la columna es $135.8^\circ\text{C} = 276.44^\circ\text{F}$. Por lo tanto corresponde a una $S = 1082.48$ bar, según la siguiente *Figura 11.5.28*:

MAXIMUM ALLOWABLE STRESS VALUES IN TENSION FOR HIGH-ALLOY STEEL (CAUTION: See UW-12 for vessels constructed under part UW)														
Specification		Maximum Allowable Stress, ksi (Multiply by 1000 to Obtain psi), for Metal Temp., °F, Not Exceeding												
Number	Grade	-20 to 100 200 300 400 500 600 650 700 750 800 850 900 950												
SA-240	304	18.8	17.8	16.6	16.2	15.9	15.9	15.9	15.9	15.5	15.2	14.9	14.7	14.4
SA-240	304L	15.7	15.7	15.3	14.7	14.4	14	13.7	13.5	13.3	13	—	—	—
SA-240	316	18.8	18.8	18.4	18.1	18.0	17.0	16.7	16.3	16.1	15.9	15.7	15.5	15.4
SA-240	316L	15.7	15.7	15.7	15.5	14.4	13.5	13.2	12.9	12.6	12.4	12.1	—	—

Figura 11.5.28. Tensión máxima admisible en función de la temperatura para el acero inoxidable.

Se sustituyen los valores en la ecuación:

$$t_{cab.} = \frac{3.30 \text{ bar} \cdot 1981 \text{ mm} \cdot 1.54}{2 \cdot 1082.48 \text{ bar} \cdot 0.85 - 0.2 \cdot 3.30 \text{ bar}} + 2 \text{ mm} = 7.47 \text{ mm}$$

Además, se le suma una tolerancia de fabricación del 10% al espesor de cabezal. De esta manera el espesor será:

$$t_{cab.} = 1.10 \cdot 7.47 \text{ mm} = 8.22 \text{ mm}$$

Se escoge un valor de espesor del cabezal estándar, por lo tanto, será de **10 mm**.

A partir del valor del espesor de los cabezales y mediante la siguiente *Ecuación 11.5.33* se puede calcular el diámetro externo del cabezal.

$$D_{ext,cab.} = D_{int,cab.} + 2 \cdot t_{cab.} \quad Ecuación 11.5.33$$

Dónde:

- $D_{ext, cab.}$: Diámetro externo del cabezal (mm).
- $D_{int, cab.}$: Diámetro interno del cabezal (mm).
- $t_{cab.}$: Espesor del cabezal (mm).

Sustitución de valores:

$$D_{ext,cab.} = 1981 \text{ mm} + 2 \cdot 10 \text{ mm} = 2001 \text{ mm} = 2.001 \text{ m}$$

Espesor del cilindro

De la misma manera que para el espesor de los cabezales se procede para calcular el espesor del cilindro siguiendo el código ASME, a partir de la ecuación de la siguiente *Figura 11.5.29*.

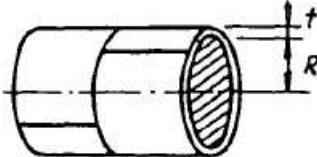
A		CYLINDRICAL SHELL (LONG SEAM) ¹	
	$t = \frac{PR}{SE - 0.6P}$	$P = \frac{SE t}{R + 0.6t}$	<ol style="list-style-type: none"> 1. Usually the stress in the long seam is governing. See preceding page. 2. When the wall thickness exceeds one half of the inside radius or P exceeds $0.385 SE$, the formulas given in the Code UA 2 shall be applied.

Figura 11.5.29. Espesor para el cilindro según ASME.

Se utiliza la siguiente ecuación para el cálculo del espesor del cuerpo cilíndrico:

$$t_c = \frac{P_c \cdot R_{int,c}}{S \cdot E - 0.6 \cdot P_c} + \text{C. A.} \quad \text{Ecuación 11.5.34}$$

Dónde:

- t_c : Espesor de la columna (mm).
- P_c : Presión de la columna (atm).
- $R_{int,c}$: Radio de la columna (mm).
- S : Esfuerzo del material (bar).
- E : Factor de soldadura (0.85).
- C.A.: Tolerancia de corrosión (2 mm).

Como se sabe, la temperatura de diseño de la columna es $140.8^\circ\text{C} = 276.44^\circ\text{F}$ y corresponde a una $S = 1082.48$ bar.

$$t_c = \frac{3.30 \text{ bar} \cdot 990.5 \text{ mm}}{1082.48 \text{ bar} \cdot 0.85 - 0.6 \cdot 3.30 \text{ bar}} + 2 \text{ mm} = 5.56 \text{ mm}$$

El espesor de la columna es de 5.56 mm, pero debido a los espesores estándar de chapa en Europa se elige un valor de espesor de columna de **6 mm**.

Para que el diseño, montaje y mantenimiento sea más fácil y con el objetivo de aminorar costes se decide utilizar el mismo grosor de chapa para todo el diseño, utilizando el espesor más grande, siendo este de **10 mm**.

Una vez conocido el espesor que se usará para el diseño de todo el equipo, se determina el diámetro externo de toda la columna según la *Ecuación 11.5.33*.

$$D_{ext,columna} = D_{columna} + 2 \cdot t_c$$

Dónde:

- $D_{ext, \text{columna}}$: Diámetro externo de la columna (m).
- $D_{columna}$: Diámetro interno de la columna (m).
- t_c : Espesor de la columna (m).

Por lo tanto se sustituyen los valores:

$$D_{ext,columna} = 1.981 \text{ m} + 2 \cdot 0.010 \text{ m} = 2.001 \text{ m}$$

Altura de los cabezales

Se determina la altura de los cabezales según las ecuaciones de proporcionadas por la página web de “Koenig-co”, proveedora de cabezales de los equipos.

$$DH = 0.1935 \cdot D_{tanque} - 0.455 \cdot t_{cab.} \quad Ecuación 11.5.35$$

$$SF = 3.5 \cdot t_{cab.} \quad Ecuación 11.5.36$$

$$TH = SF + DH \quad Ecuación 11.5.37$$

Dónde:

- $D_{columna}$: Diámetro interno de la columna (m)
- $t_{cab.}$: Espesor del cabezal (m)

Se sustituyen los valores en las ecuaciones:

$$DH = 0.1935 \cdot 1981 \text{ mm} - 0.455 \cdot 10 \text{ mm} = 378.77 \text{ mm}$$

$$SF = 3.5 \cdot 10 \text{ mm} = 35 \text{ mm}$$

$$TH = 378.77 \text{ mm} + 35 \text{ mm} = 413.77 \text{ mm} = 0.414 \text{ m}$$

Se obtiene una altura de los cabezales de **0.414 m**.

Altura de la columna

Se procede a calcular la altura de la columna de destilación a partir de la siguiente ecuación:

$$H_{Total} = H + 2 \cdot H_{cab.} \quad Ecuación 11.5.38$$

Dónde:

- H_{Total} : Altura total de la columna (m).
- H : Altura de la columna (m).
- $H_{\text{cab.}}$: Altura del cabezal (m).

Se obtiene la altura total del tanque:

$$H_{\text{Total}} = 7.315 \text{ m} + 2 \cdot 0.414 \text{ m} = 8.143 \text{ m}$$

Peso del tanque

- Peso del tanque vacío

Se ha de conocer el volumen de la columna para poder calcular el peso en vacío. Por eso, primero se calcula el volumen de los cabezales de la siguiente manera:

→ Cálculo del volumen interno del cabezal:

$$V_{\text{int,cab.}} = 0.1 \cdot (D_{\text{columna}})^3 \quad \text{Ecuación 11.5.39}$$

Dónde:

- $V_{\text{int,cab.}}$: Volumen interior del cabezal (m^3).
- D_{columna} : Diámetro de la columna (m).

$$V_{\text{int,cab.}} = 0.1 \cdot (1.981 \text{ m})^3 = 0.777 \text{ m}^3$$

→ Se calcula el volumen externo de los cabezales:

$$V_{\text{ext,cab.}} = 0.1 \cdot (D_{\text{columna}} + t_{\text{cab.}})^3 \quad \text{Ecuación 11.5.40}$$

Dónde:

- $V_{\text{ext,cab.}}$: Volumen exterior del cabezal (m^3).
- D_{columna} : Diámetro interno de la columna (m).
- $t_{\text{cab.}}$: Espesor del cabezal (m).

$$V_{\text{ext,cab.}} = 0.1 \cdot (1.981 \text{ m} + 0.010 \text{ m})^3 = 0.789 \text{ m}^3$$

La diferencia de estos valores será el volumen que ocupa la pared del cabezal:

$$V_{\text{pared cab.}} = V_{\text{ext,cab.}} - V_{\text{int,cab.}} \quad \text{Ecuación 11.5.41}$$

Dónde:

- $V_{pared\ cab.}$: Volumen de la pared del cabezal (m^3).
- $V_{ext, cab.}$: Volumen exterior del cabezal (m^3).
- $V_{int, cab.}$: Volumen interior del cabezal (m^3).

$$V_{pared\ cab.} = 0.789\ m^3 - 0.777\ m^3 = 0.012\ m^3$$

De la misma manera se calcula el volumen interno del cilindro que conforma la columna:

$$V_{int,c} = \pi \cdot \left(\frac{D_{columna}}{2}\right)^2 \cdot H \quad Ecuación\ 11.5.42$$

Dónde:

- $V_{int,c}$: Volumen interior del cilindro de la columna (m^3).
- $D_{columna}$: Diámetro interno de la columna (m).
- H : Altura de la columna (m).

$$V_{int,c} = \pi \cdot \left(\frac{1.981\ m}{2}\right)^2 \cdot 7.315\ m = 22.55\ m^3$$

A continuación, se calcula también el volumen externo:

$$V_{ext,c} = \pi \cdot \left(\frac{D_{ext,columna}}{2}\right)^2 \cdot H \quad Ecuación\ 11.5.43$$

Dónde:

- $V_{ext,c}$: Volumen exterior del cilindro de la columna (m^3).
- $D_{ext,columna}$: Diámetro interno de la columna (m).
- H : Altura de la columna (m).

$$V_{ext,c} = \pi \cdot \left(\frac{2.001\ m}{2}\right)^2 \cdot 7.315\ m = 23.00\ m^3$$

La diferencia entre estos dos volúmenes es el volumen de la pared del cilindro de la columna:

$$V_{pared\ cil.} = V_{ext,cil.} - V_{int,cil.} \quad Ecuación\ 11.5.44$$

Dónde:

- $V_{pared\ cil.}$: Volumen de la pared del cilindro de la columna (m^3).
- $V_{ext,cil.}$: Volumen exterior del cilindro de la columna (m^3).
- $V_{int, cil.}$: Volumen interior del cilindro de la columna (m^3).

Los valores en la ecuación:

$$V_{\text{pared cil.}} = 23.00 \text{ m}^3 - 22.55 \text{ m}^3 = 0.45 \text{ m}^3$$

A continuación se calcula el volumen de la pared del equipo, mediante la siguiente expresión:

$$V_{\text{pared columna}} = V_{\text{pared,cil.}} + 2 \cdot V_{\text{pared,cab.}} \quad \text{Ecuación 11.5.45}$$

Dónde:

- $V_{\text{pared columna}}$: Volumen de la pared de la columna (m^3).
- $V_{\text{pared, cil.}}$: Volumen pared del cilindro de la columna (m^3).
- $V_{\text{pared, cab.}}$: Volumen pared del cabezal (m^3).

$$V_{\text{pared columna}} = 0.45 \text{ m}^3 + 2 \cdot 0.012 \text{ m}^3 = 0.474 \text{ m}^3$$

Se obtiene el peso del tanque en vacío considerando el peso de los elementos internos, por eso se tiene en cuenta, además, el 10% del peso del equipo vacío y mediante la densidad del acero inoxidable AISI 316L que es 7960 kg/m^3 , se calcula de la siguiente manera:

$$M_{\text{columna vacía}} = 1.1 \cdot V_{\text{pared tanque}} \cdot \rho_{\text{acero inox.}} \quad \text{Ecuación 11.5.46}$$

Dónde:

- $M_{\text{columna vacía}}$: Peso del equipo lleno de agua (kg).
- $V_{\text{pared columna}}$: Volumen de la pared de la columna (m^3).
- $\rho_{\text{acero inox.}}$: Densidad del acero inoxidable AISI 316L (kg/m^3).
-

$$M_{\text{tanque vacío}} = 1.1 \cdot 0.474 \text{ m}^3 \cdot 7960 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 4150.34 \text{ kg}$$

En toneladas:

$$M_{\text{tanque vacío}} = 4.15 \text{ Tn}$$

Peso del tanque lleno de agua

Para conocer el peso del equipo lleno de agua a modo de prueba, se calcula el volumen del mismo de la siguiente manera:

$$V_{\text{columna}} = V_{\text{int,c}} + 2 \cdot V_{\text{int,cab.}} \quad \text{Ecuación 11.5.47}$$

Dónde:

- V_{columna} : Volumen de la columna (m^3).
- $V_{\text{int,cil.}}$: Volumen interior del cilindro de la columna(m^3).
- $V_{\text{int, cab.}}$: Volumen interior del cabezal (m^3).

$$V_{\text{columna}} = 22.55 \text{ m}^3 + 2 \cdot 0.777 \text{ m}^3 = 24.10 \text{ m}^3$$

A continuación, se calcula el peso de la columna con agua:

$$M_{\text{columna con agua}} = M_{\text{columna vacía}} + V_{\text{columna}} \cdot \rho_{\text{agua}} \quad \text{Ecuación 11.5.48}$$

Dónde:

- $M_{\text{columna con agua}}$: Peso del equipo lleno de agua (kg).
- $M_{\text{columna vacía}}$: Masa total del equipo vacío (kg).
- V_{columna} : Volumen de la columna (m^3).
- ρ_{agua} : Densidad del agua (kg/m^3).

$$M_{\text{tanque con agua}} = 4150.34 \text{ kg} + 24.10 \text{ m}^3 \cdot 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 28250.34 \text{ kg}$$

En toneladas:

$$M_{\text{columna con agua}} = 28.25 \text{ Tn}$$

Peso de la columna en operación

Se procede a calcular el peso del equipo en operación, teniendo en cuenta la densidad del fluido y el volumen de la columna.

$$M_{\text{columna en op.}} = M_{\text{columna vacía}} + V_{\text{columna}} \cdot \rho_{\text{mezcla}} \quad \text{Ecuación 11.5.49}$$

Dónde:

- $M_{\text{columna en op.}}$: Peso del equipo en operación (kg).
- $M_{\text{columna vacía}}$: Masa total del equipo vacío (kg).
- V_{columna} : Volumen de la columna (m^3).
- ρ_{mezcla} : Densidad de la mezcla (kg/m^3).

$$M_{\text{columna en op.}} = 4150.34 \text{ kg} + 24.10 \text{ m}^3 \cdot 936.5 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 26719.99 \text{ kg}$$

En toneladas:

$$M_{\text{tanque en op.}} = 26.72 \text{ Tn}$$

11.4.3.5. Aislamiento

Hacer uso de un aislante es necesario debido a que la temperatura de la columna consta de una parte a 120.8°C y se ha de usar como medida de seguridad, ya que las paredes pueden ser un peligro para los operarios y demás trabajadores. De la misma manera que en otros equipos, se decide aislar el equipo con una lana mineral. Por ello, se elige aislar el equipo con lana de vidrio.

El espesor requerido para el aislante se calcula con la siguiente ecuación:

$$X = \frac{30}{3.6 \cdot \left(\frac{\Delta T}{D_{ext,c}} \right)^{\frac{1}{4}}} \quad Ecuación 11.5.50$$

Dónde:

- X: Espesor del aislante (cm).
- ΔT : Diferencia de temperaturas entre el interior y exterior del reactor, siendo 20°C la temperatura media en Martorell, y la temperatura en el interior del tanque es 120.8°C.
- $D_{ext,c}$: Diámetro externo de la columna (m).

Por lo tanto,

$$X = \frac{30}{3.6 \cdot \left(\frac{120.8^{\circ}\text{C} - 20^{\circ}\text{C}}{2.001 \text{ m} \cdot 100 \text{ cm}} \right)^{\frac{1}{4}}} = 9.89 \text{ cm}$$

El aislamiento se recubre con una capa de aluminio para protegerlo de las condiciones meteorológicas de Martorell.

Finalmente, se necesita conocer el volumen aislante necesario para todo el equipo:

$$V_{aislante} = S_{ext,columna} \cdot X \quad Ecuación 11.5.50$$

$$S_{ext,columna} = S_{ext,cil} + S_{ext,cab} \quad Ecuación 11.5.50$$

Dónde:

- $V_{aislante}$: Volumen del aislante para todo el equipo (m^3).
- S_{ext} , column: Sección externa de la columna (m^2).
- X: Espesor del aislante (cm).
- $S_{ext, cil}$: Sección externa del cilindro de la columna (m^2).

$$S_{ext,cil} = \pi \cdot D_{ext,columna} \cdot H_{tanque} = \pi \cdot 2.001 \text{ m} \cdot 7.315 \text{ m} = 45.98 \text{ m}^2$$

- Sext, cab. : Sección externa del cabezal (m^2).

$$S_{\text{ext,cab.}} = 0.931 \cdot (D_{\text{ext,columna}})^2 = 0.931 \cdot (2.001 \text{ m})^2 = 3.73 \text{ m}^2$$

Por lo tanto:

$$S_{\text{ext,columna}} = 45.98 \text{ m}^2 + 3.73 \text{ m}^2 = 49.71 \text{ m}^2$$

Seguidamente se obtiene el volumen del aislante necesario:

$$V_{\text{aislante}} = 49.71 \text{ m}^2 \cdot \left(9.89 \text{ cm} \cdot \frac{1 \text{ m}}{100 \text{ cm}} \right) = 4.92 \text{ m}^3$$

11.5. DISEÑO DEL DECANTADOR TRIFÁSICO

11.5.1. Introducción

Los decantadores son instrumentos muy usados en la industria para separar mezclas vapor-líquido. Existen 3 tipos distintos que se muestran a continuación:

- Separador vertical:

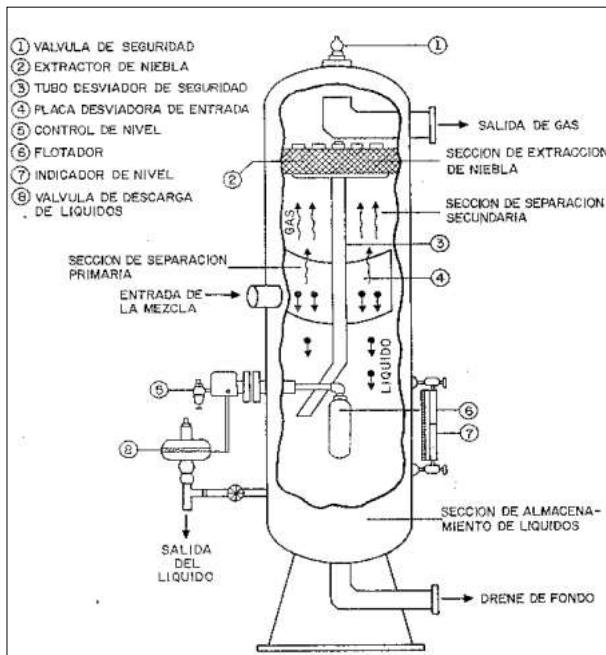


Figura 11.6.1. Esquema de un decantador vertical.

- Separador horizontal:

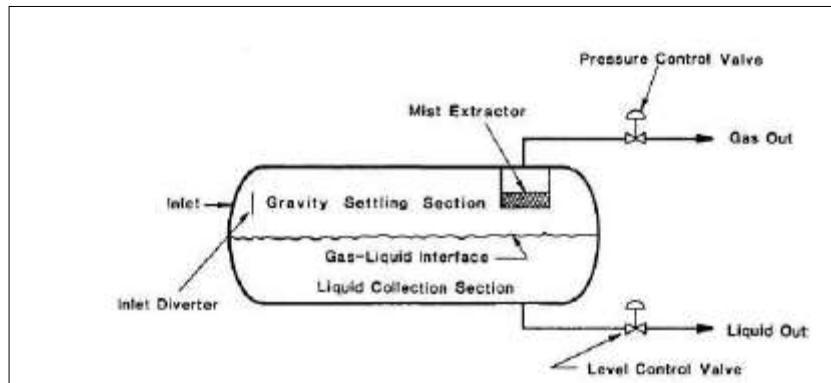


Figura 11.6.2 : Esquema de un decantador horizontal.

- Separador esférico:

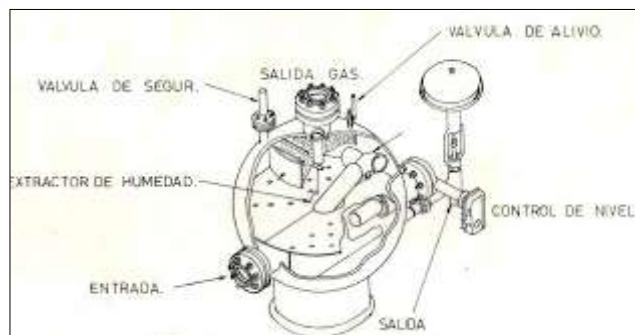


Figura 11.6.3. Esquema de un decantador esférica.

En este proyecto se emplea un decantador trifásico vertical. A pesar de ser más caro, el decantador vertical requiere menor mantenimiento que el horizontal ya que es más fácil mantenerlo limpio. Además el control de nivel no es un punto crítico ya que se puede emplear un flotador vertical logrando que el control de nivel sea más sensible a los cambios. Por último ofrece menor tendencia de evaporización de los líquidos y por lo tanto una mejor separación.

Teniendo en cuenta que el caudal de vapor a separar es muy pequeño y se separa de manera quasi instantánea, se diseña el decantador como si fuera un separador líquido-líquido, y una vez diseñado el bifásico, mediante el artículo bibliográfico “*Design Two-Phase Separator Within the Right Limits*” se calcula la altura a añadir a nuestro decantador bifásico para que la fase gas se separe correctamente.

11.5.2. Diseño funcional

El esquema del decantador y los cálculos utilizados para el diseño se muestran a continuación:

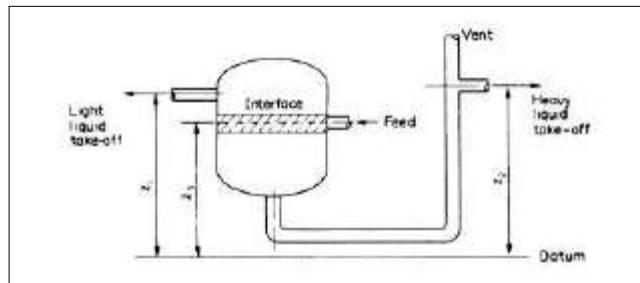


Figura 11.6.4. Esquema del decantador vertical trifásico.

En primer lugar se supone el diámetro de la gota y el tiempo de residencia dentro del decantador. Para este tipo de decantadores y según el libro mencionado anteriormente, los valores del diámetro de la gota suelen estar entre 100 y 150 micrómetros. El tiempo de residencia para asegurar la correcta separación está entre 5 y 10 minutos.

En este caso suponemos que el diámetro será de 150 micrómetros y con un tiempo de residencia de 10 minutos.

Para empezar calculamos la velocidad de asentamiento mediante la ecuación X2:

$$u_d = \frac{d_d^2 g (\rho_d - \rho_c)}{18 \mu_c} \quad \text{Ecuación 11.6.1}$$

Dónde:

- u_d : Velocidad de asentamiento de la fase dispersa (orgánica) [m/s].
- d_d : Diámetro de la gota (orgánica) [m].
- g : aceleración gravitacional 9.81 [m/s²].
- ρ_c : densidad de la fase continua (fase acuosa) [Kg/m³].
- ρ_d : densidad de la fase dispersa (fase orgánica) [Kg/m³].
- μ_c : viscosidad de la fase continua (fase acuosa) [N s/m²].

$$u_d = \frac{150 \cdot 10^{-6} \cdot 9.81 \cdot (958.6 - 1019)}{18 \cdot 0.521 \cdot 10^{-3}} = -0.0014 \text{ m/s}$$

Sustituyendo los valores en la *Ecuación 11.6.1*, nos da una velocidad de asentamiento de 0.0014 m/s.

Para un decantador vertical, tiene que cumplir la condición que la velocidad de asentamiento de la fase continua sea menor a la de la fase dispersa. Para el cálculo de la velocidad de la fase continua se usa la *Ecuación 11.6.2*.

$$u_c = \frac{Q_c}{A_i} < u_d \quad \text{Ecuación 11.6.2}$$

Considerando un caso extremo, tenemos que $u_c = u_d$:

$$Q_c = \frac{m}{\rho c} = \frac{393.5}{1019} \frac{1}{3600} = 0.000107 \text{ m}^3/\text{s}$$

Dónde:

- Q_c = Caudal volumétrico del corriente acuoso (m^3/s).
- m = Caudal másico del corriente acuoso (kg/h).
- ρc = Densidad del corriente acuoso (kg/m^3).

Por lo que el área queda:

$$A_i = \frac{Q_c}{u_d} = \frac{0.000107 \text{ m}^3/\text{s}}{0.0014 \text{ m/s}} = 0.077 \text{ m}^2$$

Dónde:

- A_i =área de tubo

A partir del área, se calcula el radio mediante:

$$r = \sqrt{\frac{A_i}{\pi}} = \sqrt{\frac{0.077 \text{ m}^2}{\pi}} = 0.157 \text{ m}$$

Por lo tanto tenemos que del diámetro será:

$$D = 2 \cdot r = 2 \cdot 0.156 = 0.313 \text{ m}$$

Y tendremos una altura de :

$$h = 2 \cdot D = 2 \cdot 0.313 = 0.625 \text{ m}$$

Para seguir, hay que comprobar que el tiempo de residencia total del decantador esté entre 5-10 minutos. Por lo tanto calcularemos el volumen total del decantador y después su tiempo de residencia.

$$V = A \cdot h = 2\pi r^2 \cdot h = 2\pi \cdot 0.156^2 \cdot 0.625 = 0.05m^3$$

Por lo que tendremos un volumen de $0.05m^3$ y a partir de este calculamos el tiempo de residencia:

$$\tau = \frac{V}{Q} = \frac{0.05m^3}{11.77 \text{ m}^3/\text{h}} = 0.004\text{h} = 0.25 \text{ min}$$

Como vemos nos da un tiempo de residencia muy bajo, por lo tanto hay que diseñar un decantador con un volumen más grande. Como hay una segunda condición aún más restrictiva, se calculará el volumen del decantador a partir de esta.

Esta segunda condición nos dice que el tiempo de residencia de las gotas de la fase dispersa esté entre 2 y 5 minutos. Para ello se considera el 10 % de la altura i la velocidad de asentamiento. Cogemos una τ de 150 segundos:

$$\tau = \frac{h_d}{u_d} \rightarrow h_d = \tau \cdot u_d = 150 \text{ s} \cdot 0.0014 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 0.21\text{m}$$

Dónde:

- τ =tiempo de residencia (s).
- h_d = altura necesaria para dispersión de la fase orgánica.
- u_d : Velocidad de asentamiento de la fase dispersa (orgánica) [m/s].

Como h_d es el 10% de la altura total, a partir de esta calculamos las medidas del decantador:

$$h = 10 \cdot h_d = 10 \cdot 0.21\text{m} = 2.1\text{m}$$

$$D = \frac{h}{2} = \frac{2.1}{2} = 1.05\text{m}$$

$$r = \frac{D}{2} = \frac{1.05}{2} = 0.52\text{m}$$

$$V = 2 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot h = 2 \cdot \pi \cdot 0.52^2 \cdot 2.1 = 1.78\text{m}^3$$

Ahora comprobamos que el tiempo de residencia total está entre 5 y 10 minutos que es el tiempo normal recomendado.

$$\tau = \frac{V}{Q} = \frac{1.78 \text{ m}^3}{11.77 \text{ m}^3/\text{h}} = 0.15 \text{ h} = 9.1 \text{ min}$$

Dónde:

- V = volumen total del decantador (m^3).
- Q = cabal volumétrico total del decantador (m^3/h).

Como se puede ver da una τ dentro de los valores recomendados, ahora solo queda comprobar el tamaño de la gota de la fase acuosa que podrá entrar en contacto con la orgánica.

Primero se calcula la velocidad de la fase orgánica.

$$u_d = \frac{\left(\frac{Q_{\text{org}}}{\rho_{\text{org}}} \right)}{\frac{2 \cdot \pi \cdot r^2}{2 \cdot \pi \cdot 0.52^2}} = \frac{\left(\frac{10915.4 \frac{\text{Kg}}{\text{h}} \cdot \frac{1}{3600 \text{s}}}{958.6 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} \right)}{0.0037 \text{ m/s}}$$

Dónde:

- Q_{org} = Cabal volumétrico de la fase orgánica (m^3/s).
- ρ_{org} =Densidad fase orgánica (kg/m^3).

Y para terminar vemos hasta que tamaño como máximo podrá separar el decantador las partículas.

$$d_d^2 = \frac{18 \mu_c \cdot u_d}{g (\rho_d - \rho_c)} = \sqrt{\frac{18 \cdot 0.00132 \cdot 0.0037}{9.81 \cdot (1019 - 958.6)}} \cong 140 \mu\text{m}$$

Y vemos que nos da un valor correcto, ya que es menor de los $150 \mu\text{m}$, que es el tamaño máximo que el decantador puede separar.

Para continuar con el diseño, se tiene que tener en cuenta la disposición de las tuberías.

La primera consideración a tener en cuenta es que para minimizar el arrastre del líquido que entra en el recipiente la velocidad de entrada del decantador debe mantenerse por debajo de 1 m/s.

$$Vd = \frac{\left(\frac{Qaq}{\rho_{aq}} + \frac{Ql}{\rho_l} + \frac{Qg}{\rho_g} \right)}{A_i} = \frac{\left(\frac{10915.4}{958.6} + \frac{393.52}{1019} + \frac{224.68}{2.138} \right) \cdot \frac{1}{3600}}{0.077m^2} = 0.42 \text{ m}^3/\text{s.}$$

Dónde:

- Q_c = Caudal volumétrico del corriente acuoso (m^3/s)
- ρ_c = Densidad del corriente acuoso (kg/m^3)
- Q_{org} = Cabal volumétrico de la fase orgánica (m^3/s)
- ρ_{org} =Densidad fase orgánica (kg/m^3).
- Q_g = Cabal volumétrico de la fase gaseosa (m^3/s)
- ρ_g =Densidad fase gaseosa (kg/m^3)
- A_i =área de tubo.

Seguidamente. se calcula el diámetro de la tubería:

$$D = \sqrt{A_i \cdot \frac{4}{\pi}} = \sqrt{0.077 \cdot \frac{4}{\pi}} = 0.313 \text{ m}$$

Por último, se lleva a cabo el cálculo de las alturas Z_1 , Z_2 y Z_3 , que corresponden a la altura por donde sale el líquido ligero, la entrada del alimento y la altura de la salida del líquido pesado. Se realiza de la siguiente manera:

$$Z_1 = 0.9 \cdot h = 0.9 \cdot 2.1 = 1.8 \text{ m}$$

$$Z_3 = 0.5 \cdot h = 0.5 \cdot 2.1 = 1.05 \text{ m}$$

$$Z_2 = \left(\frac{(z_1 - z_3)}{Q_{aq}} \right) \rho_{aq} + Z_3 = \left(\frac{(1.8 - 1.05)}{10915.37} \right) \cdot 958.6 + 1.04 = 1.11 \text{ m}$$

Dónde:

- H =altura total decantador
- Z_1 =Altura líquido ligero
- Z_2 =altura entrada alimento
- Z_3 =altura salida líquido pesado

Como se ha cogido de modelo de diseño un decantador bifásico para una mezcla fase acuosa y fase orgánica, y además el proceso dispone de una fase gaseosa, así una vez hecho el diseño del separador líquido-líquido, se procede a calcular la altura necesaria del decantador para que el gas también se separe.

Como la fracción del gas es muy pequeña comparada con la del líquido y la separación será muy rápida, se tiene en cuenta un sobredimensionamiento del 20 %, para que así se separe el gas también .

Así pues, las medidas del decantador quedan:

Tabla 11.5.1. Medidas del decantador.

h (m)	2.25
D (m)	1.25
R (m)	0.625
V (m)	3.1

Una vez obtenidos los valores de las dimensiones del cuerpo cilíndrico del tanque, estos se normalizan para que sean unas medidas estándar fácil de obtener y económicamente más viable. Se fijan las siguientes medidas:

Altura = 3 m, Diámetro = 1.5 m

A partir del dimensionamiento del decantador y las medidas estándar se vuelve a calcular el volumen del decantador, siendo este el volumen real al cual se diseñará:

$$V_{\text{decant,real}} = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot H$$

Dónde:

- $V_{\text{decant,real}}$: Volumen real del decantador (m^3).
- D: Diámetro del decantador (m).
- H: Altura del decantador (m).

$$V_{\text{decant,real}} = \frac{\pi}{4} \cdot (1.5 \text{ m})^2 \cdot (3 \text{ m}) = 5.30 \text{ m}^3$$

Seguidamente, se calcula el porcentaje de ocupación de la mezcla en el tanque de la siguiente manera:

$$\% \text{ Volumen ocupado} = \frac{\frac{V_{\text{fluido}}}{N^{\circ} \text{ tanques}}}{V_{\text{decant,real}}} \cdot 100$$

Dónde:

- V_{fluido} : Volumen del fluido (m^3).
- N° tanques: Número de tanques (1).
- $V_{\text{decant,real}}$: Volumen real del tanque (m^3).

$$\% \text{ Volumen ocupado} = \frac{\frac{3.10 \text{ m}^3}{1}}{5.30 \text{ m}^3} \cdot 100 = 58.49 \%$$

11.5.3. Diseño mecánico

A continuación se procede con el diseño mecánico del decantador trifásico según el código ASME.

Para determinar el material adecuado para el diseño del tanque se ha de tener en cuenta las propiedades del fluido. Los compuestos pueden producir corrosión, por lo tanto, será necesario que el material sea resistente. Se elige el acero inoxidable AISI 316L, por sus propiedades.

Seguidamente es importante conocer la presión y temperatura de diseño.

Presión de diseño

Para el cálculo de la presión de diseño se utilizan las siguientes ecuaciones y se escogerá el valor de presión más alto.

$$P_{\text{diseño},1} = 1.1 \cdot P_{\text{operación}}$$

$$P_{\text{diseño},2} = P_{\text{operación}} + 2 \text{ bar}$$

Dónde:

- $P_{\text{operación}}$: Presión de operación (130 kPa = 1.3 bar)

$$P_{\text{diseño},1} = 1.1 \cdot 1.3 \text{ bar} = 1.43 \text{ bar}$$

$$P_{\text{diseño},2} = 1.3 \text{ bar} + 2 \text{ bar} = 3.3 \text{ bar}$$

La presión de diseño mayor es la 2, por lo tanto para el diseño se utilizará una presión de 3.3 bar.

Temperatura de diseño

La temperatura de diseño se establece 20°C por encima de la temperatura de operación del tanque.

$$T_{\text{diseño}} = T_{\text{operación}} + 20 \text{ °C}$$

Dónde:

- $T_{\text{operación}}$: Temperatura de operación del tanque (9.5°C)

$$T_{\text{diseño}} = 9.5 \text{ °C} + 20 \text{ °C} = 29.5 \text{ °C}$$

Espesor de los cabezales

Como se ha mencionado antes se calculará a partir del código ASME.

Siguiendo el diseño mecánico de los anteriores diseños de equipos, se procede a diseñar el tanque, ya que se corresponde a un tanque toriesférico.

Por lo tanto se obtiene:

$$t_{\text{cab.}} = \frac{P_t \cdot L \cdot M}{2 \cdot S \cdot E - 0,2 \cdot P_t} + \text{C. A.}$$

Dónde:

- $t_{\text{cab.}}$: Espesor de los cabezales (mm)
- P_{decant} : Presión interna del decantador (bar)
- L : Diámetro interno del decantador (mm)
- M : Factor que depende de la relación L/r
- S : Esfuerzo del material (bar)
- E : Factor de soldadura (0.85)
- C.A.: Tolerancia de corrosión (2 mm)

La temperatura de diseño de los tubos es de $29.5 \text{ °C} = 85.1 \text{ °F}$. Por lo tanto corresponde a una $S = 1082.48 \text{ bar}$, según la siguiente figura.

Se sustituyen los valores en la ecuación:

$$t_{\text{cab.}} = \frac{3.3 \text{ bar} \cdot 1500 \text{ mm} \cdot 1.54}{2 \cdot 1082.48 \text{ bar} \cdot 0.85 - 0.2 \cdot 3.3 \text{ bar}} + 2 \text{ mm} = 6.14 \text{ mm}$$

Además, se le suma una tolerancia de fabricación del 10% al espesor de cabezal. De esta manera el espesor será:

$$t_{cab.} = 1.10 \cdot 6.14 \text{ mm} = 6.76 \text{ mm}$$

El valor del espesor del cabezal será de **10 mm**.

A partir del valor del espesor de los cabezales y mediante la siguiente ecuación se puede calcular el diámetro externo del cabezal.

$$D_{ext,cab.} = D_{int,cab.} + 2 \cdot t_{cab.}$$

Dónde:

- $D_{ext, cab.}$: Diámetro externo del cabezal (mm).
- $D_{int, cab.}$: Diámetro interno del cabezal (mm).
- $t_{cab.}$: Espesor del cabezal (mm).

Sustitución de valores:

$$D_{ext,cab.} = 1500 \text{ mm} + 2 \cdot 10 \text{ mm} = 1520 \text{ mm} = 1.52 \text{ m}$$

Espesor del cilindro

De la misma manera que para el espesor de los cabezales se procede para calcular el espesor del cilindro siguiendo el código ASME.

Se utiliza la siguiente ecuación para el cálculo del espesor del cuerpo cilíndrico:

$$t_c = \frac{P_c \cdot R_{int,c}}{S \cdot E - 0.6 \cdot P_c} + C.A.$$

Dónde:

- t_c : Espesor del cilindro del decantador (mm).
- P_c : Presión interna del cilindro del decantador (bar).
- $R_{int,c}$: Radio interno del cilindro del decantador (mm).
- S : Esfuerzo del material (bar).
- E : Factor de soldadura (0.85).
- $C.A.$: Tolerancia de corrosión (2 mm).

La temperatura de diseño es de $29.5^\circ\text{C} = 85.1^\circ\text{F}$, de la misma manera que en el cálculo del esfuerzo del material para el cabezal se hace para el cilindro que conforma el tanque. Por lo tanto corresponde a una $S = 1082.48$ bar.

$$t_c = \frac{3.3 \text{ bar} \cdot 750 \text{ mm}}{1082.48 \text{ bar} \cdot 0.85 - 0.6 \cdot 3.3 \text{ bar}} + 2 \text{ mm} = 4.70 \text{ mm}$$

El espesor del cilindro es de 4.70 mm, pero debido a los espesores estándar de chapa en Europa se elige un valor de espesor del cilindro del decantador de **5 mm**.

Para que el diseño, montaje y mantenimiento sea más fácil y con el objetivo de aminorar costes se decide utilizar un mismo grosor de chapa para todo el diseño, utilizando el espesor más grande entre el cabezal y el cilindro, un valor de **10 mm**.

Una vez conocido el espesor que se usará para el diseño de todo el equipo, se determina el diámetro externo del tanque comprobando que se corresponde con el diámetro externo del cabezal con la misma expresión anterior:

$$D_{ext,decant} = D_{decant} + 2 \cdot t_c$$

Dónde:

- $D_{ext, decant}$: Diámetro externo del decantador (m)
- D_{decant} : Diámetro interno del decantador (m)
- t_c : Espesor del cilindro del decantador (m)

Por lo tanto se sustituyen los valores:

$$D_{ext,decant} = 1.5 \text{ m} + 2 \cdot 0.010 \text{ m} = 1.52 \text{ m}$$

Altura de los cabezales

Se determina la altura de los cabezales según las ecuaciones de proporcionadas por la página web de “Koenig-co”, proveedora de cabezales.

$$DH = 0.1935 \cdot D_{decant} - 0.455 \cdot t_{cab.}$$

$$SF = 3.5 \cdot t_{cab.}$$

$$TH = SF + DH$$

Dónde:

- D_{decant} : Diámetro interno del decantador (m)
- $t_{cab.}$: Espesor del cabezal (m)

Se sustituyen los valores en las ecuaciones:

$$DH = 0.1935 \cdot 1500 \text{ mm} - 0.455 \cdot 10 \text{ mm} = 285.70 \text{ mm}$$

$$SF = 3.5 \cdot 10 \text{ mm} = 35 \text{ mm}$$

$$TH = 285.70 \text{ mm} + 35 \text{ mm} = 320.70 \text{ mm} = 0.321 \text{ m}$$

Se obtiene una altura de los cabezales de **0.321 m**.

Altura del tanque

Se procede a calcular la altura del tanque a partir de la siguiente ecuación:

$$H_{\text{Total}} = H + 2 \cdot H_{\text{cab.}}$$

Dónde:

- H_{Total} : Altura total del decantador (m).
- H : Altura del decantador (m).
- $H_{\text{cab.}}$: Altura del cabezal (m).

Se obtiene la altura total del tanque:

$$H_{\text{Total}} = 3 \text{ m} + 2 \cdot 0.321 \text{ m} = 3.64 \text{ m}$$

11.5.4. Peso del tanque

Peso del tanque vacío

Se ha de conocer el volumen del tanque para poder calcular el peso en vacío. Por eso, primero se calcula el volumen de los cabezales de la siguiente manera:

→ Cálculo del volumen interno del cabezal:

$$V_{\text{int,cab.}} = 0.1 \cdot (D_{\text{decant}})^3$$

Dónde:

- $V_{\text{int,cab.}}$: Volumen interior del cabezal (m^3)
- D_{decant} : Diámetro interno del decantador (m)

$$V_{\text{int,cab.}} = 0.1 \cdot (1.5 \text{ m})^3 = 0.338 \text{ m}^3$$

→ Se calcula el volumen externo de los cabezales:

$$V_{\text{ext,cab.}} = 0.1 \cdot (D_{\text{decant}} + t_{\text{cab.}})^3$$

Dónde:

- $V_{\text{ext,cab.}}$: Volumen interior del cabezal (m^3).
- D_{decant} : Diámetro interno del decantador(m).
- $t_{\text{cab.}}$: Espesor del cabezal (m).
-

$$V_{\text{ext,cab.}} = 0.1 \cdot (1.5 \text{ m} + 0.010 \text{ m})^3 = 0.344 \text{ m}^3$$

La diferencia de estos valores será el volumen que ocupa la pared del cabezal:

$$V_{\text{pared cab.}} = V_{\text{ext,cab.}} - V_{\text{int,cab.}}$$

Dónde:

- $V_{\text{pared cab.}}$: Volumen de la pared del cabezal (m^3).
- $V_{\text{ext,cab.}}$: Volumen exterior del cabezal (m^3).
- $V_{\text{int,cab.}}$: Volumen interior del cabezal (m^3).

$$V_{\text{pared cab.}} = 0.344 \text{ m}^3 - 0.338 \text{ m}^3 = 0.006 \text{ m}^3$$

De la misma manera se calcula el volumen interno del cilindro que conforma el decantador:

$$V_{\text{int,c}} = \pi \cdot \left(\frac{D_{\text{decant}}}{2} \right)^2 \cdot H$$

Dónde:

- $V_{\text{int,c}}$: Volumen interior del cilindro del decantador (m^3).
- D_{decant} : Diámetro interno del decantador (m).
- H : Altura del cilindro (m).

$$V_{\text{int,c}} = \pi \cdot \left(\frac{1.5 \text{ m}}{2} \right)^2 \cdot 3 \text{ m} = 5.30 \text{ m}^3$$

A continuación, se calcula también el volumen externo:

$$V_{ext,c} = \pi \cdot \left(\frac{D_{ext,decant}}{2} \right)^2 \cdot H$$

Dónde:

- $V_{ext,c}$: Volumen interior del cilindro del decantador (m^3).
- $D_{ext,decant}$: Diámetro interno del decantador (m).
- H : Altura del cilindro (m).

$$V_{ext,c} = \pi \cdot \left(\frac{1.52 \text{ m}}{2} \right)^2 \cdot 3 \text{ m} = 5.44 \text{ m}^3$$

La diferencia entre estos dos volúmenes es el volumen de la pared del cilindro:

$$V_{pared cil.} = V_{ext,cil.} - V_{int,cil.}$$

Dónde:

- $V_{pared cil.}$: Volumen de la pared del cilindro del decantador (m^3).
- $V_{ext,cil.}$: Volumen exterior del cilindro del decantador (m^3).
- $V_{int, cil.}$: Volumen interior del cilindro del decantador (m^3).

Los valores en la ecuación:

$$V_{pared cil.} = 5.44 \text{ m}^3 - 5.30 \text{ m}^3 = 0.14 \text{ m}^3$$

A continuación se calcula el volumen de la pared del equipo, mediante la siguiente expresión:

$$V_{pared decant} = V_{pared,cil.} + 2 \cdot V_{pared,cab.}$$

Dónde:

- $V_{pared decant}$: Volumen de la pared del decantador (m^3).
- $V_{pared, cil.}$: Volumen pared del cilindro (m^3).
- $V_{pared, cab.}$: Volumen pared del cabezal (m^3).

$$V_{pared tanque} = 0.14 \text{ m}^3 + 2 \cdot 0.006 \text{ m}^3 = 0.152 \text{ m}^3$$

Se obtiene el peso del tanque en vacío a partir de la densidad del acero inoxidable AISI 316L que es 7960 kg/m³, de la siguiente manera:

$$M_{\text{tanque vacío}} = 1.1 \cdot V_{\text{pared decant}} \cdot \rho_{\text{acero inox.}}$$

Dónde:

- $M_{\text{decant vacío}}$: Peso del equipo vacío (kg).
- $V_{\text{pared decant}}$: Volumen de la pared del decantador (m³).
- $\rho_{\text{acero inox.}}$: Densidad del acero inoxidable AISI 316L (kg/m³).

$$M_{\text{decant vacío}} = 1.1 \cdot 0.152 \text{ m}^3 \cdot 7960 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 1330.91 \text{ kg}$$

En toneladas:

$$M_{\text{decant vacío}} = 1.33 \text{ Tn}$$

Peso del tanque lleno de agua

Para conocer el peso del tanque lleno de agua a modo de prueba, se calcula el volumen del tanque de la siguiente manera:

$$V_{\text{decant}} = V_{\text{int,c}} + 2 \cdot V_{\text{int,cab.}}$$

Dónde:

- V_{decant} : Volumen del decantador (m³).
- $V_{\text{int,c.}}$: Volumen interior del cilindro del decantador (m³).
- $V_{\text{int, cab.}}$: Volumen interior del cabezal (m³).
-

$$V_{\text{decant}} = 5.30 \text{ m}^3 + 2 \cdot 0.338 \text{ m}^3 = 5.98 \text{ m}^3$$

A continuación, se calcula el peso del tanque con agua:

$$M_{\text{decant con agua}} = M_{\text{decant vacío}} + V_{\text{decant}} \cdot \rho_{\text{agua}}$$

Dónde:

- $M_{\text{decant con agua}}$: Peso del equipo lleno de agua (kg).

- $M_{decant\ vacío}$: Masa total del equipo vacío (kg).
- V_{decant} : Volumen del decantador (m^3).
- ρ_{agua} : Densidad del agua (kg/m^3).
-

$$M_{decant\ con\ agua} = 1330.91\ kg + 5.98\ m^3 \cdot 1000\ \frac{kg}{m^3} = 7310.91\ kg$$

En toneladas:

$$M_{decant\ con\ agua} = 7.31\ Tn$$

Peso del tanque en operación

Se procede a calcular el peso del tanque en operación, teniendo en cuenta la densidad del fluido y el volumen del tanque.

$$M_{decant\ en\ op.} = M_{decant\ vacío} + V_{decant} \cdot \rho_{mezcla}$$

Dónde:

- $M_{decant\ en\ op.}$: Peso del equipo en operación (kg).
- $M_{decant\ vacío}$: Masa total del decantador vacío (kg).
- V_{decant} : Volumen del decantador (m^3).
- ρ_{mezcla} : Densidad de la mezcla (kg/m^3).
-

$$M_{decant\ en\ op.} = 1330.91\ kg + 5.98\ m^3 \cdot 988.88\ \frac{kg}{m^3} = 7244.41\ kg$$

En toneladas:

$$M_{decant\ en\ op.} = 7.24\ Tn$$

11.6. DISEÑO DE INTERCAMBIADORES DE CALOR

11.6.1. Introducción

Un intercambiador de calor es un dispositivo que permite la transferencia de calor entre dos fluidos. La transmisión de calor en estos aparatos es básicamente por conducción y por convección. Los intercambiadores son equipos que tienen una gran importancia en la industria química.

11.6.2. Tipos de intercambiadores de calor

Los intercambiadores se pueden clasificar en dos grupos, según el tipo de contacto entre los dos fluidos que intercambian calor, intercambiadores de contacto directo y de contacto indirecto.

11.6.2.1. Intercambiadores de contacto directo

En los intercambiadores de contacto directo sin almacenamiento de calor las corrientes contactan una con otra íntimamente, cediendo la corriente más caliente directamente su calor a la corriente más fría. Este tipo de intercambiador se utiliza naturalmente cuando las dos fases en contacto son mutuamente insolubles y no reaccionen entre ellas. Por consiguiente, no puede utilizarse con sistemas gas-gas.

Se distinguen tres tipos de intercambiadores de calor según la naturaleza de las substancias que intervienen:

- Intercambiadores gas-sólido

En la siguiente figura se muestran diversas formas de los mismos.

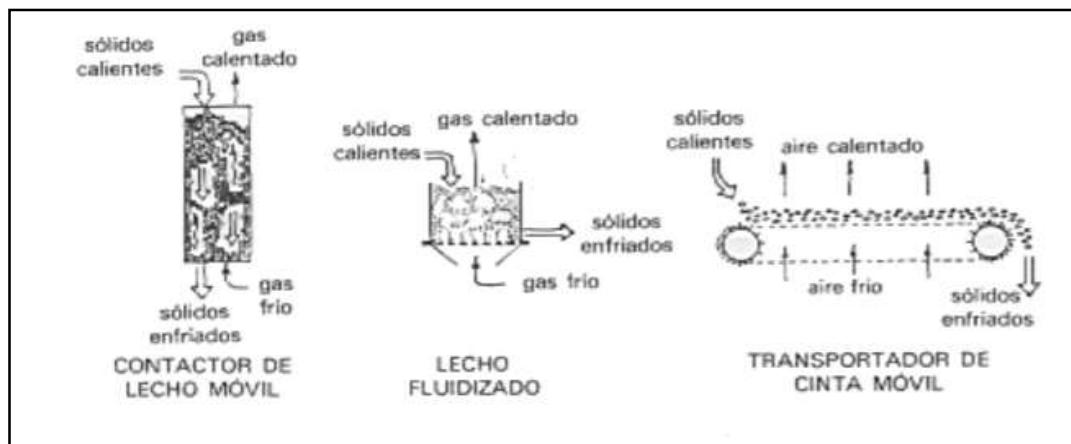


Figura 11.6.1. Intercambiadores de contacto directo gas-sólido.

- Intercambiadores fluido-fluido

En este apartado se pueden distinguir de dos tipos, dependiendo de si los fluidos en contacto son mutuamente inmiscibles o no. Un ejemplo de este tipo de intercambiadores son las torres de refrigeración, donde uno de los dos fluidos circulantes se disuelve en el otro. Para el sistema aire-agua el contacto directo es de gran importancia ya que justo una de las fases (agua) se disuelve o evapora en la otra fase (aire). A continuación se muestra en la figura una torre de enfriamiento de agua.

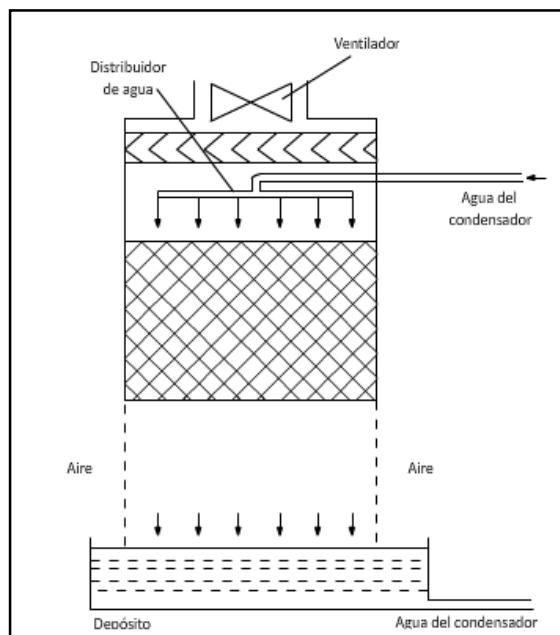


Figura 11.6.2. Intercambiadores de contacto directo fluido-fluido en los que una fase puede disolverse en otra.

11.6.2.2. Intercambiadores de contacto indirecto

En los intercambiadores de tipo contacto indirecto, las corrientes permanecen separadas y la transferencia de calor se realiza a través de una pared divisoria, o desde el interior hacia el exterior de la pared.

- Intercambiador de placas
- Compacto
- Tubos concéntricos o doble tubo
- Intercambiadores multitubulares

Este tipo de intercambiadores son los más utilizados en la industria, ya que permiten disponer de grandes áreas de intercambio en un espacio reducido.

- Intercambiador de carcasa y tubos

Está formado por una coraza y por multitud de tubos. Se clasifican por el número de veces que pasa el fluido por la coraza y por el número de veces que pasa el fluido por los tubos. La optimización de estos equipos se basa en variar el numero de tubos, el diámetro y su longitud con la restricción de la perdida de carga.

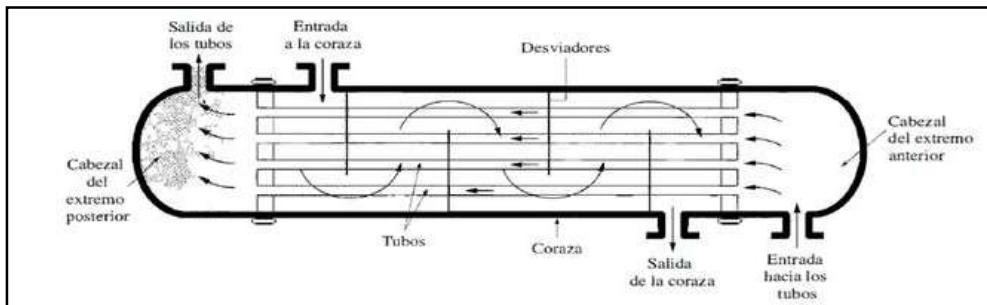


Figura 11.6.3. Intercambiadores de calor de coraza y tubo con un paso por la carcasa y un paso por los tubos

A continuación se presentan las principales características de los tipos de intercambiadores de los que consta la planta.

- **Intercambiador de carcasa y tubos**

Este tipo de intercambiadores de calor están presentes en la mayoría de los sistemas térmicos complejos de las industrias. La planta industrial VAM Industry consta mayormente de este tipo de intercambiadores.

Estos equipos constan de las siguientes partes:

- la carcasa
- cabezales en los dos extremos de la carcasa
- los tubos, que comunican los cabezales entre ellos
- Los deflectores, que crean turbulencias y ayudan al soporte de los tubos.

- **Evaporadores**

La función principal de este tipo de intercambiadores de calor es llevar el fluido a su temperatura de ebullición para que se genere su vapor.

También conocido con el nombre de Kettle-reboilers son un tipo de intercambiador especiales que se utilizan en el fondo de las columnas de destilación de la planta para

vaporizar una parte del producto de colas y devolverlo a la torre. El líquido que entra en el evaporador des de la última etapa, es parcialmente evaporador, donde la parte restante sale como producto de colas o es devuelta de nuevo a la parte inferior de la columna. Crea el reflujo y proporciona el calor de evaporación que se necesita para la destilación. El fluido de proceso circula por la carcasa y el fluido térmico por los tubos.

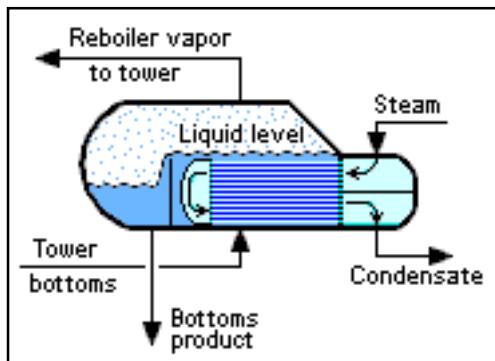


Figura 11.6.4. Esquema de un intercambiador tipon Kettle-reboiler

- **Condensadores**

El condensador es una unidad en la que los vapores de proceso se licuan total o parcialmente en líquidos. El calor latente de los vapores se absorbe gracias a un fluido más frío, llamado refrigerante, que a su vez se calienta y sale más caliente. El vapor que condensa puede ser una substancia pura o una mezcla. Generalmente la condensación se da a presión constante y se puede considerar un proceso isotermo en el caso de las substancias puras, para las mezclas la condensación se da en un intervalo de temperaturas.

Los mecanismos de condensación sobre una superficie fría son:

- Condensación en película: el condensado moja la superficie y forma una capa de líquido que se mueve por el tubo por acción de la gravedad. el líquido ha formado la película que actúa como capa aislante disminuyendo el coeficiente de transferencia de calor de la sustancia y en consecuencia su capacidad de ceder calor.
- Condensación en gotas: el condensado forma gotas de medida variable que se van juntando hasta que son suficientemente grandes para caer por gravedad. Este tipo de condensación no se suele considerar debido a su inestabilidad y la dificultad de mantenerla en el proceso.

En la siguiente figura se presenta un esquema de un condensador de carcasa y tubos que son los que se utilizan en el proceso.

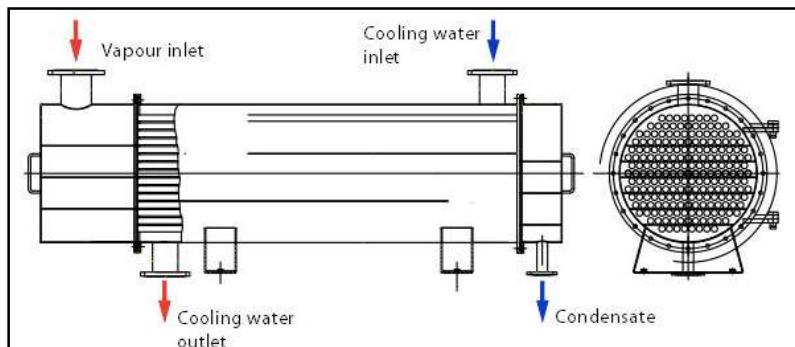


Figura 11.6.5. Condensador de carcasa y tubos

11.6.3. Diseño funcional y mecánico

El fluido térmico utilizado para calentar tanto el ácido acético como la mezcla de reactivos es el Therminol 66. Es un fluido sintético a base de hidrocarburos saturados del tipo terfenilos y es bastante popular en la industria ya que cuenta con una excelente estabilidad térmica, minimizando la formación de productos volátiles y eliminando el riesgo de formación de insolubles. Además de ser bombeable a bajas temperaturas, se trata de un compuesto con una punto de ebullición de 345°C, propiedad que permite trabajar con altas temperaturas a fin de aportar calor a nuestros productos.

En los equipos que se necesite aportar frío al fluido se utilizará agua de servicio ya que en Martorell la temperatura media es de 20°C y resulta suficiente para el proceso ya que no se trabaja con bajas temperaturas en el fluido de proceso; excepto para el caso del condensador de la torre de rectificación, que necesita condensar gran parte de gases y por ello trabajar a temperaturas muy bajas; en este caso se utilizará nitrógeno. Dicho esto, se procede a explicar de modo ilustrativo todos los pasos seguidos a la hora de realizar el diseño de los diferentes intercambiadores.

Para el diseño mecánico y funcional de los intercambiadores de calor de carcasa y tubos se ha utilizado el programa *Aspen Exchanger Design & Rating V8.0*, ya que permite el diseño de todo tipo de intercambiadores y presenta una gran base de datos de propiedades físicas y modelos termodinámicos.

Los intercambiadores de carcasa y tubos pueden ser con cambio de fase o sin cambio de fase. En los intercambiadores de coraza y tubos con cambio de fase tiene lugar una condensación o una ebullición, normalmente el cambio de fase se da en el lado de la coraza.

A pesar de que se ha utilizado un software que permite facilitar y optimizar el diseño, es necesario conocer los diferentes parámetros que afectan al diseño, los cuales se presentan a continuación:

1. Parámetros del proceso:

- Decidir qué fluido circula por carcasa y cual por tubos
- Seleccionar el salto de temperatura del fluido de proceso
- Establecer los límites de las pérdidas de presión tanto en la carcasa como en los tubos
- Seleccionar los modelos de transferencia de energía y los coeficientes de ensuciamiento

2. Parámetros mecánicos:

- Seleccionar el nombre de pasos por tubo y por carcasa
- Especificaciones de parámetros de tubos (dimensión, pitch, material)
- Especificaciones de los parámetros de carcasa (baffles, espacio entre baffles, material...)

Se debe fijar la disposición de los fluidos, ya sea por el interior de los tubos, o por el exterior. Para poner un fluido por el interior o exterior de los tubos, se ha de tener en cuenta algunas reglas básicas:

- el fluido a mayor temperatura circula por los tubos
- el fluido a mayor presión circula por los tubos
- el fluido más corrosivo circula por los tubos
- el fluido más sucio circula por los tubos
- el fluido mas toxicógeno circula por los tubos
- el fluido con menos perdida de presión circula por la carcasa
- el fluido más viscoso circula por la carcasa
- el fluido con menos caudal circula por la carcasa
- el fluido a condensar circula por la carcasa

Una vez decidido la disposición de los fluidos, se caracteriza el sistema definiendo las temperaturas de entrada y salida de los dos fluidos.

11.6.3.1. Balance Térmico

- T_1 =temperatura de entrada del fluido de proceso
- T_2 = temperatura de salida del fluido de proceso
- t_1 = temperatura de entrada del fluido refrigerante
- t_2 = temperatura de salida del fluido refrigerante.

$$Q_Q = M_S C_P S \cdot (T_1 - T_2) = m_t \cdot C_P t (t_2 - t_1) \quad \text{Ecuación 11.6.1}$$

Subíndice S = carcasa (shell).

Subíndice t = tubos

M, m = caudal másico (kg/s).

C_P = capacidad calorífica (J/kg·°C)

Q_Q = calor intercambiado (W).

11.6.3.2. Cálculo del DTML

Decisión tipo de circulación

El cálculo de DTML permitirá decidir si es mejor que los fluidos circulen en paralelo o en contracorriente gracias a los perfiles de temperatura para cada caso. Por lo general, la circulación en contracorriente es más efectiva. En la planta VAM Industry, los intercambiadores de carcasa y tubos circulan en contracorriente.

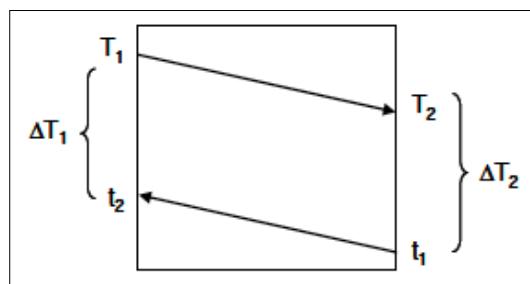


Figura 11.6.6. Circulación en contracorriente.

$$DTML = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} \quad \text{Ecuación 11.6.2.}$$

Dónde:

- $\Delta T_1 = T_{\text{a}} \text{ entrada fluido de tubos} - T_{\text{a}} \text{ salida fluido de carcasa}$
- $\Delta T_2 = T_{\text{a}} \text{ salida fluido de tubos} - T_{\text{a}} \text{ entrada fluido de carcasa}$

Decisión del número de pasos por carcasa (n_s) y por tubos (n_t)

En la primera iteración se supone que tanto el número de pasos por carcasa como por tubos es 1.

11.6.3.3. Corrección DTML (DTML)c

F es un factor de corrección que se evalúa gráficamente. Es función del numero de pasos por carcasa y por tubos y de las temperaturas de entrada y salida del intercambiador. Por un solo paso por tubos y por carcasa no se ha de realizar la corrección de la DTML.

$$(DTML)c = DTML \cdot F \quad \text{Ecuación 11.6.3}$$

Si $F > 0.85$, corregir DTML

Si $F < 0.85$, aumentar n_s

El número de pasos por tubo puede variar de 1 a 16. Si tenemos más de una paso por carcasa el número de pasos por tubos mínimo es el valor del numero de pasos por carcasa multiplicado por dos.

F se puede conocer con los parámetros y la siguiente figura:

$$R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} \quad \text{Ecuación 11.6.4}$$

$$S = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - T_2} \quad \text{Ecuación 11.6.5}$$

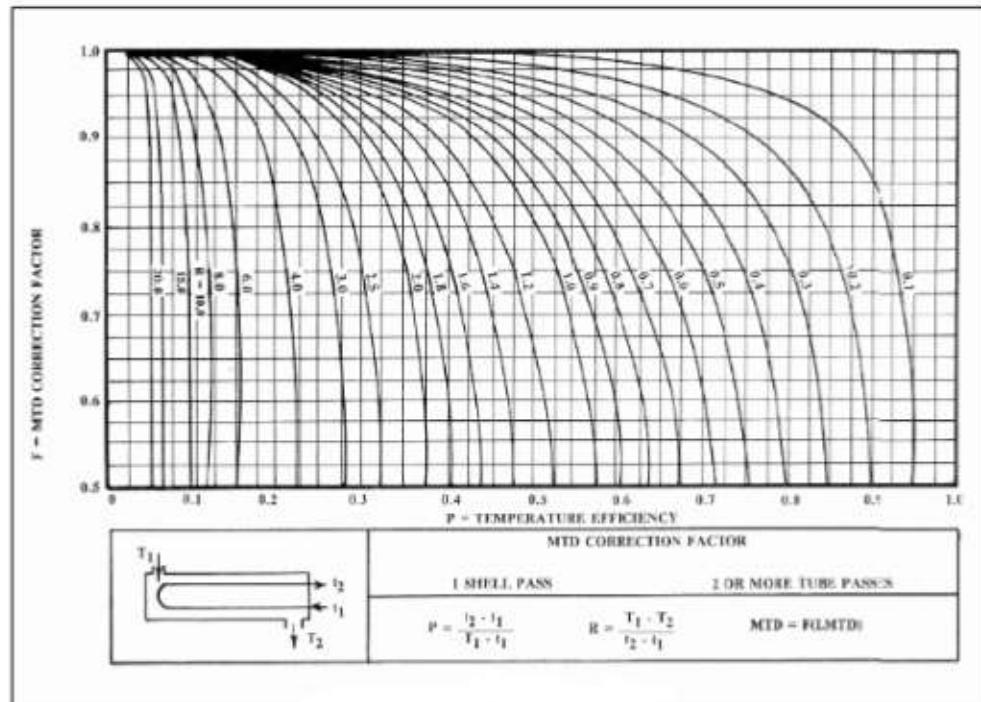


Figura 11.6.7.Determinación gráfica del factor de corrección F.

11.6.3.4. Selección del intercambiador

Suposición del coeficiente global inicial, U

Se parte de una valor inicial obtenido a partir de datos bibliográficos en función de los fluidos que circulan.

Calculo del área total de intercambio, A

$$A = \frac{q}{U \cdot (DTML)_c} \quad \text{Ecuación 11.6.6}$$

Selección de las características de los tubos

L: longitud

Di: diámetro interno

De: Diámetro externo

Δx : espesor

- El diámetro externo suele oscilar entre 16 y 50 mm. Generalmente se utilizan tubos de diámetros pequeños debido a que el equipo suele ser más económico y compacto, aunque los tubos más anchos son más fáciles de limpiar por métodos mecánicos.
- El grosor es función de la presión interna y del factor de corrosión.
- La longitud preferida de los tubos oscila entre 1.83 a 4.83 metros. Para una superficie dada, el uso de los tubos largos reducirá el diámetro de carcasa.

Distribución de los tubos

En la siguiente figura se muestra una esquema de un pitch cuadrado y uno triangular, donde el parámetro P_T corresponde al pitch y el parámetro C es la distancia entre los tubos.

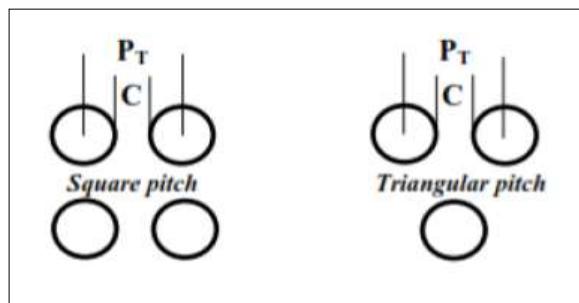


Figura 11.6.8. Distribución del pitch.

El valor de P_T se define con la siguiente ecuación, donde normalmente se utiliza un pitch triangular ($1.25 \cdot D_{ext}$) para intercambiadores de carcasa y tubos estándar y un pitch cuadrado ($1.5 \cdot D_{ext}$) para kettle-reboilers.

$$P_T = D_{ext} + C \quad Ecuación 11.6.7$$

Dónde:

- D_{ext} : diámetro externo de los tubos

Diámetro de carcasa

Los diámetros típicos de carcasa suelen oscilar entre 150 y 1520 mm. Se determina según el número de tubos que se tiene y la velocidad a la que se quiere trabajar en el costado de la carcasa.

Existe una relación optima entre la longitud de los tubos y el diámetro de carcasa que corresponde a una rango entre 5 i 10. De esta manera se maximiza la transferencia de calor global. Según el código TEMA el diámetro de carcasa ha de estar entre 0.15 y 1.5 metros.

Material de los tubos

EL material de los tubos se ha de elegir teniendo en cuenta las propiedades de los fluidos de proceso y los térmicos, así como el coste económico. Normalmente al trabajar con materiales baratos resulta más económico utilizar dimensiones estándar aunque comporte un aumento de las dimensiones ya que resultará mejor que no hacerlos a medidas específicas.

Para el caso de la planta VAM Industry, se utiliza acero inoxidable 316L, ya que se está trabajando con una mezcla que contiene grandes caudales de ácido acético y por lo tanto es corrosivo.

Diseño de los bafles

El área de flujo transversal por carcasa se determina a través del diámetro de éste, el espacio entre los bafles, la distancia entre los tubos y la distribución de los tubos, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\text{Área} = \frac{D_{\text{carc}} \cdot C \cdot B}{P_T} \quad \text{Ecuación 11.6.8}$$

Dónde:

- D_{carc} : diámetro de carcasa
- B: distancia entre los bafles

Se puede decir que a mayor distancia entre los bafles se tendrá menor número de bafles en el intercambiador y más área de flujo transversal disponible. La distancia mínima entre bafles normalmente corresponde a una quinta parte del diámetro de la carcasa.

Un factor que puede influir en el diseño es la perdida de presión, por lo tanto, se fija una caída de presión para tener un diseño mecánico que asegure que la parte superior de cada deflector soporte cada tubo.

Un rango de valores típicos de *baffle cut* o espacio que queda entre la pantalla y la carcasa sería un porcentaje que oscila entre el 15 y 45% del diámetro interno de

carcasa. Según el método de Kern, un valor óptimo estaría comprendido entre el 20 y 25%.

Espacio entre bafles

Se ha de tener en cuenta una distancia mínima entre el límite exterior de los tubos y el diámetro del deflector para prevenir el avance del tubo debido a vibraciones generadas en el equipo. La distancia entre los bafles normalmente toma valores entre 0.2 y 1 veces el diámetro de carcasa, siendo el rango óptimo entre 0.3 y 0.5 veces.

En la siguiente figura se muestran los diferentes intercambiadores de calor existentes en la industria según las características de los cabezales y la carcasa.

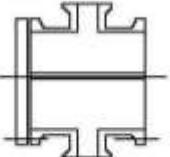
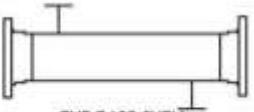
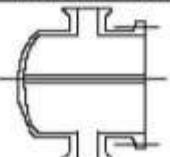
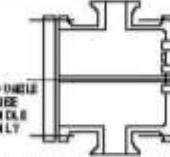
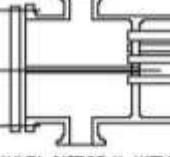
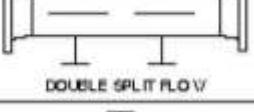
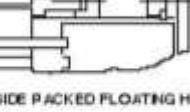
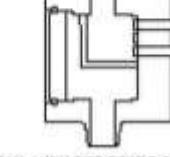
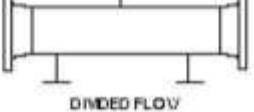
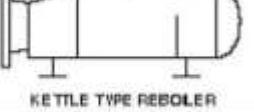
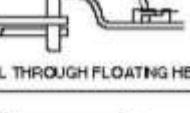
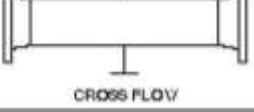
	FRONT END STATIONARY HEAD TYPES	SHELL TYPES	REAR END HEAD TYPES
A	 CHANNEL AND REMOVABLE COVER	E  ONE PASS SHELL	L  FIXED TUBESHEET LIKE "A" STATIONARY HEAD
B	 BONNET (INTEGRAL COVER)	F  TWO PASS SHELL WITH LONGITUDINAL BAFFLE	M  FIXED TUBESHEET LIKE "B" STATIONARY HEAD
C	 REMOVABLE TUBE BUNDLE ONLY	G  SPLIT FLOW	N  FIXED TUBESHEET LIKE "C" STATIONARY HEAD
N	 CHANNEL INTEGRAL WITH TUBE- SHEET AND REMOVABLE COVER	H  DOUBLE SPLIT FLOW	P  OUTSIDE PACKED FLOATING HEAD
D	 SPECIAL HIGH PRESSURE CLOSURE	J  DIVIDED FLOW	S  FLOATING HEAD WITH BACKING DEVICE
		K  KETTLE TYPE REBOILER	T  PULL THROUGH FLOATING HEAD
		X  CROSS FLOW	U  U-TUBE BUNDLE
			W  EXTERNALLY SEALED FLOATING TUBE SHEET

Figura 11.6.9. Resumen general de los tipos de intercambiadores.

En cada uno de los intercambiadores diseñados se ha comprobado que la velocidad de los tubos como el de carcasa estén aproximadamente dentro de los rangos típicos que se muestran a continuación

-Velocidades típicas:

- Líquido por tubo: Líquido de proceso, entre 1 i 2 m/s, máximo 4 m/s si se quiere evitar el ensuciamiento.
- Líquido por carcasa entre 0.3 i 1 m/s
- Vapores: dependen de la presión de operación y de la densidad del gas.
 - Vacío: 50-70 m/s
 - Presión atmosférica: 10-30 m/s
 - Alta presión: 5-10 m/s

A continuación se explicarán los pasos seguidos en la utilización del software para el diseño funcional y mecánico del intercambiador, teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente.

11.6.3.5. Utilización del software

Como ya se ha comentado antes, lo primero es decidir por donde pasará el fluido caliente, ya sea por carcasa o por tubo. Para los casos en los que haya cambio de fase se escogerá que pase por carcasa.

- Diseño del sistema

A continuación se muestra en la *Figura 11.6.10* las opciones que muestra el programa para poder cambiar la localización del fluido caliente según el tipo de intercambiador de calor a diseñar.

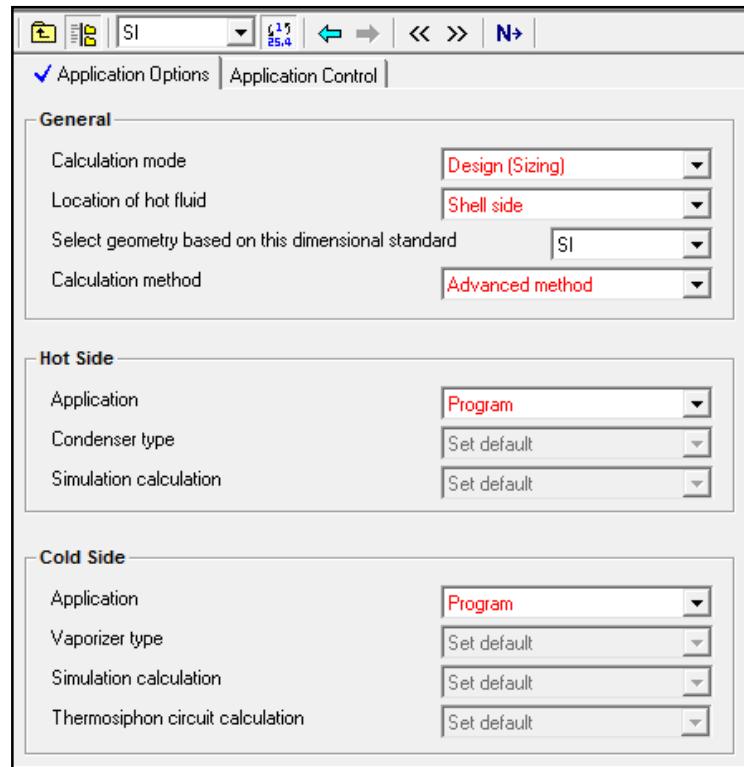


Figura 11.6.10. Definición del sistema.

Una vez se ha definido por donde pasará el fluido, se procede a definir el sistema. Sabiendo las temperaturas de entrada y salida del fluido de proceso, así como el caudal y la presión. Se definen los parámetros de la corriente del fluido térmico.

Figura 11.6.11. Tabla de datos del sistema.

A continuación se definen las composiciones de los fluidos que intervienen en el proceso, tanto para el caliente como para el frío. Se decide la base datos con la que se trabajará, para este proceso se utilizará la base de datos de Aspen, así como también se elegirá el modelo termodinámico.

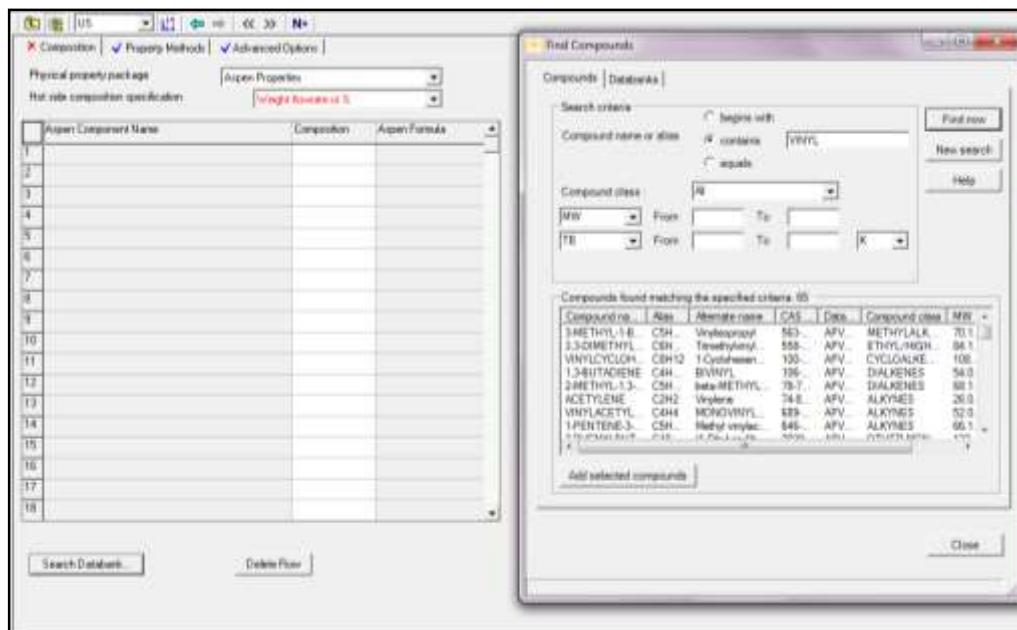


Figura 11.6.12. Menú de selección de los componentes de los fluidos.

Una vez se han elegido los componentes con sus respectivas composiciones, el programa permite obtener las propiedades de cada corriente, como se puede observar en la siguiente figura:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Temperature	25	29.52	34.05	38.57	43.1	47.62	52.14	56.67	61.15	65.71	70.24	74.78
Liquid density	kg/m³	1041.83	1035.44	1029.26	1023.26	1017.42	1011.71	1006.12	1000.62	995.2	989.03	984.51
Liquid specific heat	kJ/(kg·K)	2.046	2.062	2.077	2.093	2.109	2.124	2.14	2.155	2.171	2.186	2.202
Liquid viscosity	mPa·s	1.1298	1.0602	0.9866	0.9403	0.8889	0.8364	0.7892	0.7451	0.704	0.6657	0.63
Liquid thermal cond.	W/(m·K)	0.1599	0.1588	0.1578	0.1568	0.1559	0.155	0.1541	0.1532	0.1523	0.1515	0.1506
Liquid surface tension	N/m	0.0273	0.0268	0.0264	0.0259	0.0255	0.025	0.0246	0.0241	0.0237	0.0233	0.0226
Liquid molecular weight		60.49998	60.49998	60.49998	60.49998	60.49998	60.49998	60.49998	60.49998	60.49998	60.49998	60.49998
Specific enthalpy	kJ/kg	0	9.3	18.7	28.1	37.6	47.2	56.8	66.5	75.3	86.2	96.1
Vapor mass fraction		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Vapor density	kg/m³											
Vapor specific heat	kJ/(kg·K)											
Vapor viscosity	mPa·s											
Vapor thermal cond.	W/(m·K)											
Vapor molecular weight												
Liquid 2 mass fraction												
Liquid 2 density	kg/m³											
Liquid 2 specific heat	kJ/(kg·K)											
Liquid 2 viscosity	mPa·s											
Liquid 2 thermal cond.	W/(m·K)											
Liquid 2 surface tension	N/m											
Liquid 2 molecular weight												

Figura 11.6.13. Tabla de las propiedades de cada componente.

- Diseño geométrico del intercambiador.

En la siguiente figura se puede observar las diferentes opciones que se pueden elegir para obtener el diseño más óptimo del intercambiador dependiendo del tipo de proceso que se lleve a cabo.

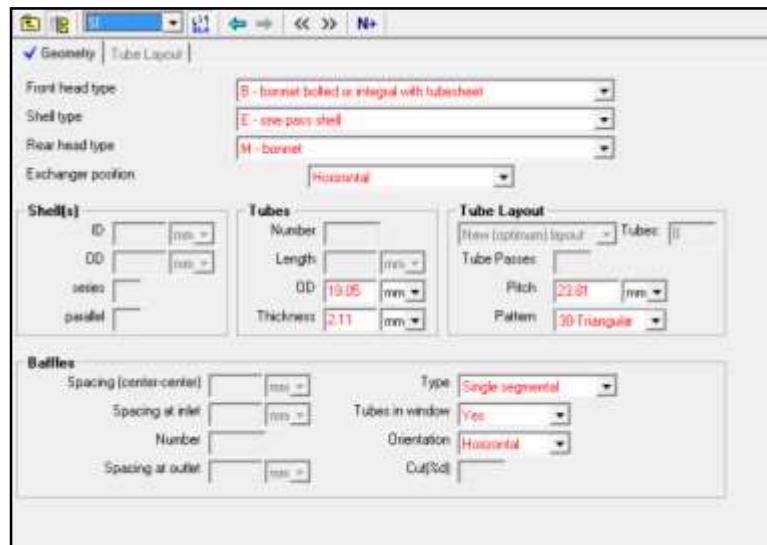


Figura 11.6.14. Sumario de la geometría.

En la *Figura 11.6.15* se muestran las diferentes opciones de configuración de la carcasa, los cabezales, las bridas y las placas tubulares, así como la posición del intercambiador.

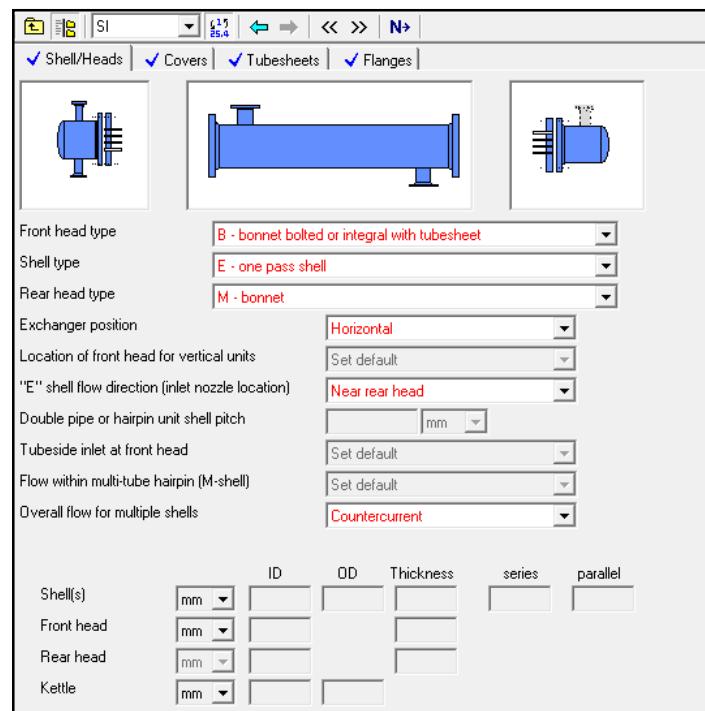


Figura 11.6.15: Diseño de la carcasa.

Se procede al diseño de los tubos, tal y como se observa en la siguiente figura:

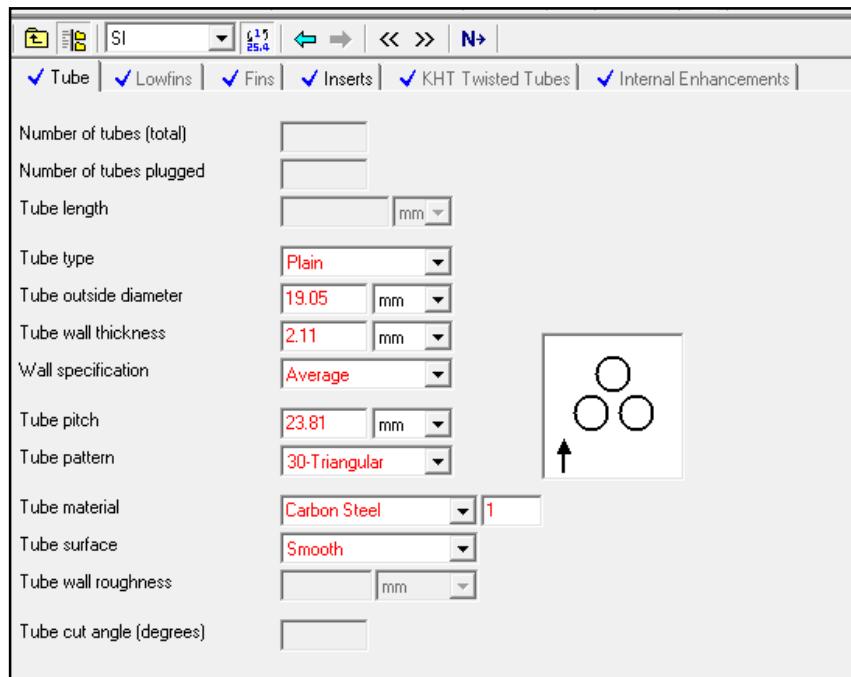


Figura 11.6.16. Diseño de los tubos.

A continuación se selecciona el tipo de bafle y todas sus características así como se muestra en la siguiente figura

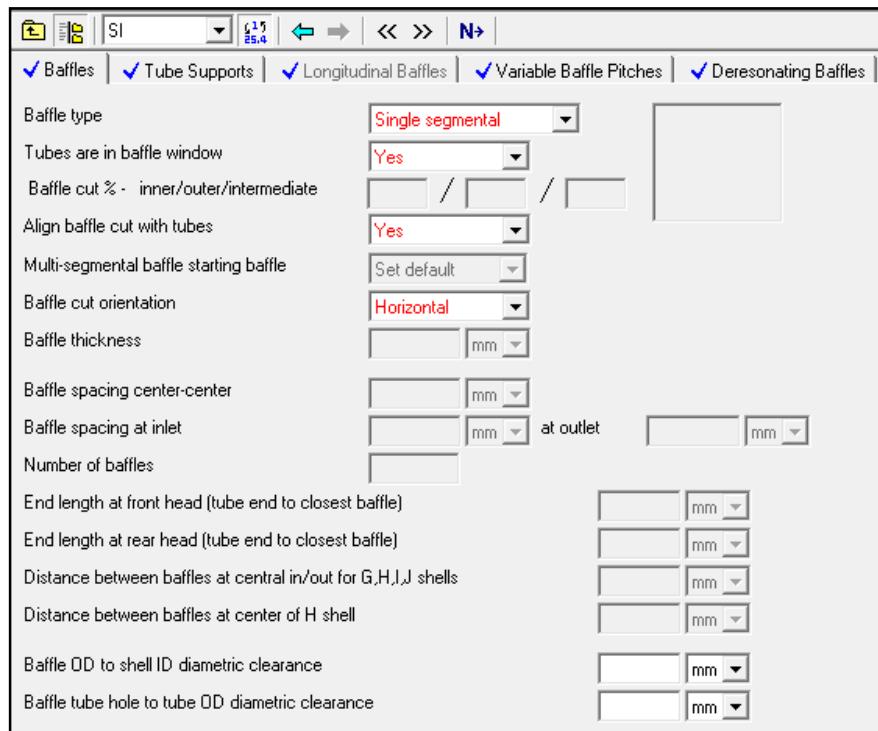


Figura 11.6.17. Diseño de los bafles.

En la siguiente figura se muestran los parámetros de diseño con respecto al interior del interior del intercambiador.

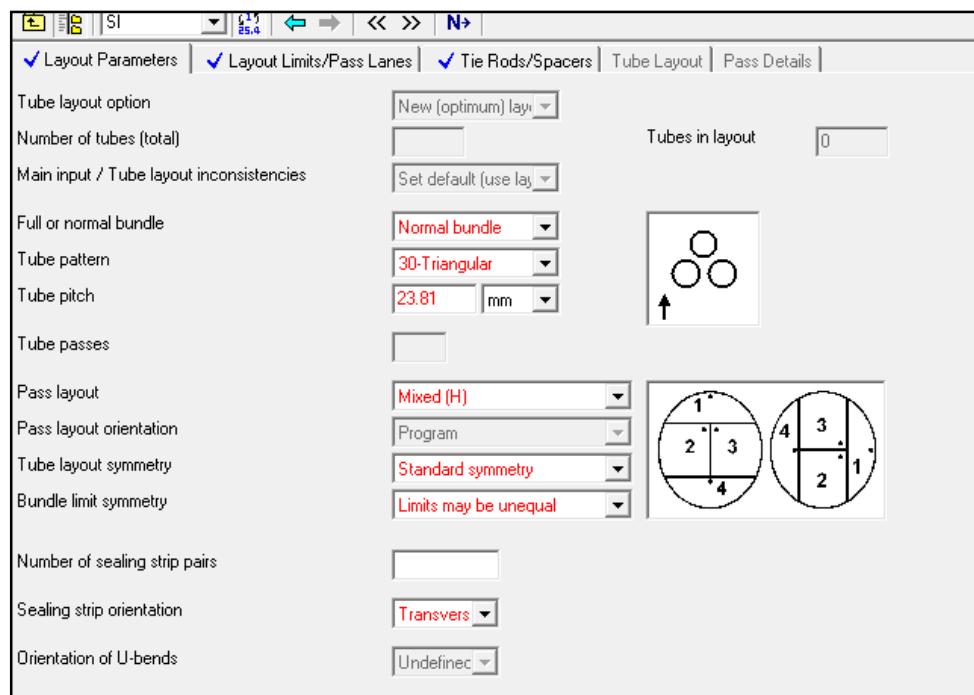


Figura 11.6.18. Diseño de la configuración del interior del intercambiador.

A continuación se muestra en la figura la selección del tipo de material para cada componente del intercambiador.

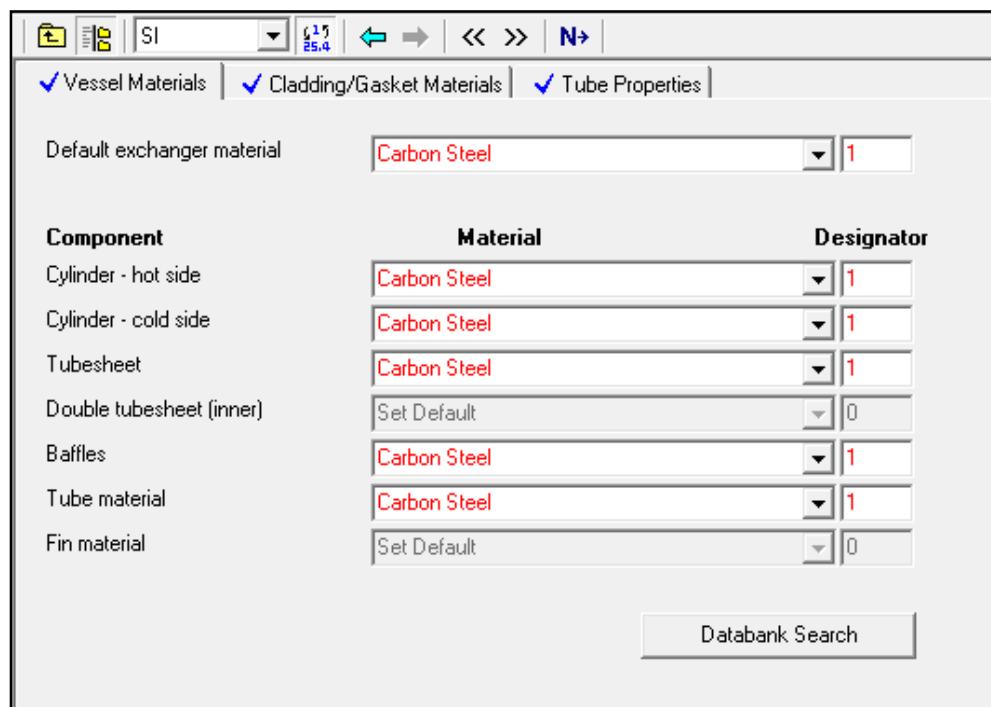


Figura 11.6.19. Panel de control del material del intercambiador.

Para finalizar, se muestra la consola principal del software, que nos permite cambiar parámetros de diseño del intercambiador, antes seleccionados así como la configuración o el tamaño. De esta manera se puede encontrar el diseño más optimo para el proceso.

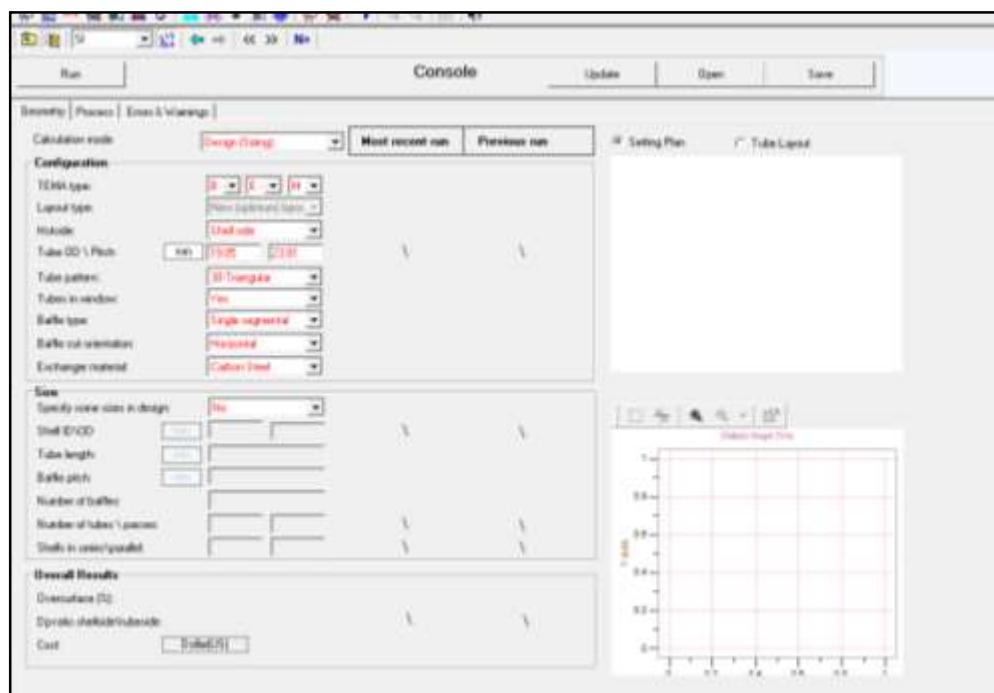


Figura 11.6.20. Consola principal del software.

A continuación se mostrara una breve explicación de la función de cada uno de los intercambiadores de los que se dispone en la planta así como sus características. Para una información más completa consultar las fichas y el diseño grafico de cada uno de los intercambiadores en el **Capítulo 2: Diseño de Equipos**.

11.6.3.6. Intercambiador E-201

La función del intercambiador E-201 es evaporar totalmente la corriente de ácido acético que proviene de la mezcla de las corrientes del tanque de almacenamiento en fase liquida, y la que proviene de la Black Box B-401; ya que para llevar a cabo el proceso es necesario tenerlo en fase gas.

La corriente de salida del intercambiador será conducida primeramente a un compresor y después al mezclador M-202.

La aportación de calor necesaria para el cambio de fase se llevará a cabo haciendo circular aceite térmico caliente por los tubos del intercambiador, aunque normalmente

el aceite se hace circular por carcasa, en este caso el fluido de proceso al experimentar un cambio de fase y con ello un aumento de volumen al pasar a vapor; por eso es conveniente que circule por carcasa.

- El ácido acético entra a 97.32°C y sale a 149.01°C.
- El fluido térmico utilizado entra a 290°C y sale a 160°C con un caudal de 70558kg/h.
- El intercambiador presenta unas dimensiones de 0.447 metros de ancho y 5.400 metros de alto.
- Consta de 356 tubos.

11.6.3.7. Intercambiador E-202

La función del intercambiador E-202 es calentar la corriente de salida del mezclador M-202 que contiene ácido acético, etileno, oxígeno y dióxido de carbono, des de 144.5°C a 150°C, ya que es la temperatura de operación del reactor. Se utiliza como fluido térmico aceite ya que todo y que el salto de temperatura no es grande, se trabaja con grandes caudales.

- La corriente de aceite entra a 250°C y sale a 200°C con un caudal de 6771kg/h.
- Para este proceso el intercambiador es del tipo de carcasa y tubos en el que por la carcasa circula aceite térmico y por los tubos la mezcla de reactivos.
- El intercambiador presenta unas dimensiones de 0.635 metros de ancho y 1.270 metros de alto.
- Consta de 578 tubos.

11.6.3.8. Intercambiador E-301

La función del intercambiador E-301 es enfriar la corriente de salida del reactor hasta la temperatura de rocío de la mezcla desde una temperatura de 150°C a 140°C para así poder entrar a la columna de absorción C-301 en condiciones óptimas y llevar a cabo la separación.

Para este proceso el intercambiador es del tipo de carcasa y tubos en el que por la carcasa circula agua líquida y por los tubos la mezcla que sale del reactor.

- El fluido térmico utilizado entra a 20°C y sale a 80°C con un caudal de 4655kg/h.

- El intercambiador presenta unas dimensiones de 0.583metros de ancho y 1.219 metros de alto.
- Consta de 388tubos.

11.6.3.9. Intercambiador E-303

La función del intercambiador E-303 es calentar la corriente de salida del compresor CR301 que proviene de los gases del decantador trifásico T-301 des de una temperatura de 165.3°C a 54°C que es la temperatura óptima de entrada al absorbador C-401 para conseguir una buena transferencia de materia y así asegurar la separación gas-líquido, principalmente de los gases como etileno, dióxido de carbono y oxígeno, los cuales, posteriormente, una parte serán recirculados a la entrada del proceso.

Para este proceso el intercambiador es del tipo de carcasa y tubos en el que por la carcasa circula agua líquida y por los tubos fluido de proceso.

- El fluido térmico utilizado entra a 20°C y sale a 53°C con un caudal de 66146kg/h.
- El intercambiador presenta unas dimensiones de 0.838 metros de ancho y 1.676 metros de alto.
- Consta de 980 tubos.

11.6.3.10. Intercambiador E-401

La función del intercambiador E-401 es enfriar la corriente de salida del mezclador M-401, desde una temperatura de 74.92°C hasta 56°C para llevar a cabo el proceso de separación principalmente del producto acetato de vinilo y el ácido acético en la torre de rectificación C-402.

Para este proceso el intercambiador es del tipo de carcasa y tubos, en el que por la carcasa circula el fluido de proceso y por los tubos agua líquida.

- El fluido térmico utilizado entra a 20°C y sale a 50°C con un caudal de 16084kg/h.
- El intercambiador presenta unas dimensiones de 0.330 metros de ancho y 3.048 metros de alto.
- Consta de 114tubos.

11.6.3.11. Condensador C-402

La función del condensador C-402 es condensar totalmente la corriente de vapor que proviene de la torre de rectificación C-402 para así una parte del líquido condensado obtenerse como destilado y la otra vuelve a la columna como reflujo. Esta corriente esta compuesta principalmente de acetato de vinilo que posteriormente pasará por un proceso de purificación. Por lo tanto, se enfriá la mezcla de 88.28°C hasta -142.4°C.

Para este proceso el intercambiador es del tipo de carcasa y tubos, en el que por la carcasa circula el fluido de proceso y por los tubos nitrógeno.

- El fluido térmico utilizado entra a -215°C y sale a -197.9°C con un caudal de 598252 kg/h.
- El intercambiador presenta unas dimensiones de 0.787 metros de ancho y 1.575 metros de alto.
- Consta de 847 tubos.

11.6.3.12. Evaporador C-402

La función del evaporador C-402 es evaporar parcialmente el líquido que proviene como reflujo de la columna de rectificación, el cual está compuesto básicamente de ácido acético, para devolver una parte a la columna en forma de gas y la otra se obtiene como producto de la parte de fondos de columna. Por lo tanto, se calienta de una temperatura de 120.8°C hasta 123.1°C

Para este proceso el intercambiador es del Kettle-reboiler, en el que por la carcasa circula el fluido de proceso ya que al producirse un cambio de fase en el interior y con ello un aumento del volumen debido a la fase vapor que aparece, lo más conveniente es que circule por la carcasa y por los tubos aceite térmico.

- El fluido térmico utilizado entra a 280°C y sale a 230°C con un caudal de 392192kg/h.
- El intercambiador presenta unas dimensiones de 0.965/1.549 metros de ancho y 1.219 metros de alto.
- Consta de 506 tubos.

11.6.3.13. Intercambiador E-402

La función del intercambiador E-402 es calentar la corriente de salida del compresor CR301 que proviene de los gases del decantador trifásico T-301 des de una temperatura de 165.3°C a 54°C que es la temperatura óptima de entrada al absorbador C-401 para conseguir una buena transferencia de materia y así asegurar la separación gas-líquido, principalmente de los gases como etileno, dióxido de carbono y oxígeno, los cuales, posteriormente, una parte serán recirculados a la entrada del proceso.

Para este proceso el intercambiador es del tipo de carcasa y tubos en el que por la carcasa circula agua líquida y por los tubos fluido de proceso.

- El fluido térmico utilizado entra a 20°C y sale a 53°C con un caudal de 66146kg/h.
- El intercambiador presenta unas dimensiones de 0.838 metros de ancho y 1.676 metros de alto.
- Consta de 980 tubos.

11.7. DISEÑO DE BOMBAS

11.7.1. Introducción

Para el correcto funcionamiento de una bomba de impulsión es necesario calcular la potencia que debe suministrar para impulsar el fluido hasta el equipo deseado. Además también es necesario conocer el NPSH disponible que es la caída interna de presión que sufre un fluido cuando ingresa al interior de una bomba centrífuga. Este último término es muy importante en el diseño ya que si la presión del circuito es menor que la presión de vapor del líquido, este entrará en evaporación impidiendo o dificultando la circulación del líquido y causando daños en los elementos del circuito. Este fenómeno se conoce como cavitación de la bomba. Para evitar la cavitación se tiene que tener en cuenta el NPSH requerido, que es el NPSH mínimo para evitar la cavitación y nos lo proporciona el fabricante de la bomba.

11.7.2. Cálculo de la potencia de la bomba

Para calcular la potencia de la bomba se realiza un balance de energía mecánica desde el punto de entrada hasta el punto de destino. El balance para líquidos incompresibles se muestra a continuación:

$$\frac{\Delta P}{\rho} + g\Delta z + \Delta \left(\frac{v^2}{2\alpha} \right) = W - e_v \quad \text{Ecuación 11.7.1}$$

Dónde:

- AP: incremento de presión entre los dos puntos donde se aplica el balance.
- Az: incremento de altura que hay entre los dos puntos donde se realiza el balance.
- Δv : incremento de velocidad que experimenta el fluido entre los dos puntos del balance.
- W: trabajo por unidad de masa (J/Kg)
- e_v : perdidas de energía mecánica por fricción (J/Kg).
- α : Constante que depende del régimen de circulación del fluido.

11.7.3. Cálculo del régimen del fluido

Para conocer el régimen de circulación de este tramo, se aplica la *Ecuación 11.7.2* que se denomina número de Reynolds. El número de Reynolds es un número adimensional

utilizado en mecánica de fluidos, diseño de reactores y fenómenos de transporte para caracterizar el movimiento del fluido. Si el número de Reynolds es menor de 2100, el flujo será laminar, en cambio si el número de Reynolds es mayor de 3000 tendremos un flujo turbulento.

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad \text{Ecuación 11.7.2}$$

Dónde:

- ρ : densidad del fluido [Kg/m³].
- V : velocidad del fluido [m/s].
- D : Diámetro de la tubería [m].
- μ Viscosidad del fluido [Kg/m s].

Para calcular la velocidad real del fluido, se calcula mediante las siguientes ecuaciones:

$$A = \frac{\pi}{4} D^2 \quad [\text{m}^2] \quad \text{Ecuación 11.7.3}$$

$$v = \frac{Q}{A} \quad \left[\frac{\text{m}^3/\text{s}}{\text{m}^2} \right] \quad \text{Ecuación 11.7.4}$$

Una vez calculado el Reynolds, se halla el factor de Fanning (f) mediante las gráficas de Moody o por la correlación de Blasius para $5 \cdot 10^{-3} < Re < 2 \cdot 10^5$.

- Grafica de Moody:

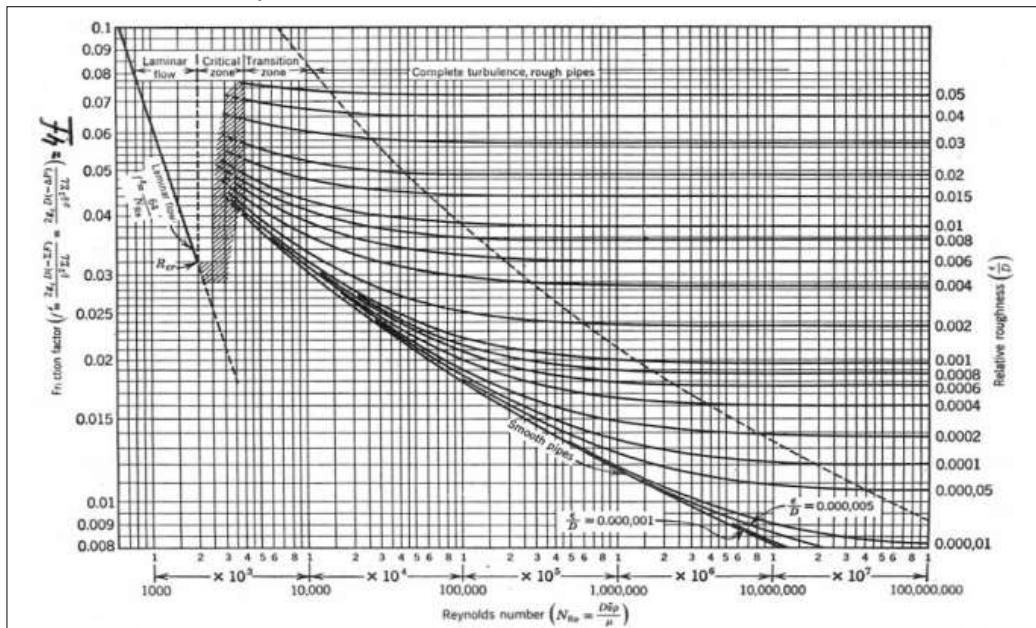


Figura 11.7.1. Gráfica de Moody

- Correlación de Blasius:

$$F = 0.046^{-0.2}$$

11.7.4. Cálculo de las pérdidas de carga

Las pérdidas de energía mecánica por la conducción son consecuencia de la fricción del fluido en la tubería. Se pueden dividir en dos:

- Perdidas en tramos rectos: son las pérdidas producidas como consecuencia de la fricción del fluido contra la tubería. Para calcular este tipo de pérdidas se utiliza la siguiente ecuación:

$$e_{v\text{tramos rectos}} = 2f v^2 \frac{L}{D}$$

Dónde:

- f: factor adimensional de Fanning.
- v: velocidad del fluido por la tubería [m/s].
- L: Longitud del tramo de la tubería [m].
- D: diámetro de la tubería [m].
- Perdidas por turbulencia, fricción o geometría del sistema: este tipo de pérdidas se atribuyen a los accidentes que podemos encontrar durante el recorrido de la tubería. Para el cálculo de los accidentes, es necesario emplear una constante (K) que variará en función del accidente.

Una vez conocido el valor de K, se aplica la ecuación XX para el cálculo de los accidentes.

$$e_{v\text{accidentes}} = \sum K \frac{v^2}{2}$$

Dónde:

- K: constante específica del accidente.
- v: velocidad del fluido que circula por la tubería [m/s].

Para finalizar el cálculo de las pérdidas de carga se sumarán los dos tipos según se muestra en la *Ecuación 11.7.5*:

$$e_{v\text{accidentes}} + e_{v\text{tramos rectos}} = e_{v\text{total}} \quad \text{Ecuación 11.7.5}$$

11.7.5. Cálculo de la potencia real y teórica de la bomba

Una vez sabidos todos los parámetros de la *Ecuación 11.7.6*, se procede a calcular la potencia teórica de la bomba. Este será un valor teórico, ya que para calcular la potencia real de la bomba es necesario conocer la eficacia de esta, ya que nunca será del 100%.

La ecuación utilizada para el cálculo de la potencia teórica de la bomba es la siguiente:

$$W_{\text{real}} = \frac{W_{\text{teórica}}}{\eta} \cdot Q \quad \text{Ecuación 11.7.6}$$

Dónde:

- W: es la potencia de la bomba [W].
- Q: caudal másico del fluido [Kg/s].
- n: Rendimiento de la bomba.

11.7.6. Cálculo del NPSH disponible

$$NPSH = ha - \frac{P_{vap}}{g p} \quad \text{Ecuación 11.7.7}$$

Dónde:

- ha: es la carga de aspiración [m].
 - g: valor de la gravedad [m/s²].
 - p: densidad del fluido [Kg/m³].
 - v: velocidad del fluido [m/s].
 - Pvap: presión de vapor del líquido a la temperatura de trabajo.
- Para su cálculo se ha utilizado la ley de Raoult.

$$ha = \frac{1}{g} \left(\frac{P_1}{p} + \frac{v^2}{2} \right) - (e_{v \text{ asp}}) + \Delta z$$

Dónde:

- P₁: presión en la entrada de la bomba (Pa).
- v: es la velocidad del fluido en el tramo de aspiración en m/s.
- $\alpha = 1$, porque se trabaja en régimen turbulento.
- ev: son las pérdidas de energía mecánica en el tramo de aspiración, y se calculan igual que en el apartado de pérdidas de carga.
- Δz : incremento de altura

11.8. DISEÑO DE COMPRESORES

11.8.1. Diseño con Aspen Hysys

Los compresores de la planta serán del tipo centrífugo. Para el cálculo de dichos compresores se realizará una primera aproximación con HYSYS y después se hará la comprobación teórica.

A continuación se pueden ver los valores de los distintos compresores obtenidos con el HYSYS.

Tabla 11.8.1. Resultados obtenidos con HYSYS del compresor CR-202.

CR 202	
Adiabatic Head (m)	24700
Polytropic Head (m)	25900
Adiabatic Fluid Head (KJ/Kg)	242.7
Polytropic Fluid Head (KJ/Kg)	254.6
Adiabatic Efficiency	75
Polytropic Efficiency	78.698
Power Consumed (KW)	310.5
Polytropic Head Factor	1.0079
Polytropic Exponent	1.2669
Isentropic Exponent	1.2072
Speed (rpm)	-

Tabla 11.8.2. Resultados obtenidos con HYSYS del compresor CR-203

CR 203	
Adiabatic Head (m)	24500
Polytropic Head (m)	26580
Adiabatic Fluid Head (KJ/Kg)	241.3
Polytropic Fluid Head (KJ/Kg)	260.7
Adiabatic Efficiency	75
Polytropic Efficiency	81.031
Power Consumed (KW)	213.7
Polytropic Head Factor	1.0043
Polytropic Exponent	1.2669
Isentropic Exponent	1.3800
Speed (rpm)	-

Tabla 11.8.3. Resultados obtenidos con HYSYS del compresor CR-301.

CR 301	
Adiabatic Head (m)	15620
Polytropic Head (m)	16350
Adiabatic Fluid Head (KJ/Kg)	253.2
Polytropic Fluid Head (KJ/Kg)	160.4
Adiabatic Efficency	75
Polytropic Efficency	78.512
Power Consumed (KW)	3494
Polytropic Head Factor	1.0054
Polytropic Exponent	1.2696
Isentropic Exponent	1.2035
Speed (rpm)	-

Tabla 11.8.4. Resultados obtenidos con HYSYS del compresor CR-501.

CR 501	
Adiabatic Head (m)	1983
Polytropic Head (m)	2016
Adiabatic Fluid Head (KJ/Kg)	19.44
Polytropic Fluid Head (KJ/Kg)	19.77
Adiabatic Efficency	75
Polytropic Efficency	75.521
Power Consumed (KW)	382.5
Polytropic Head Factor	1.0001
Polytropic Exponent	1.3243
Isentropic Exponent	1.2285
Speed (rpm)	-

Tabla 11.8.5.Resultados obtenidos con HYSYS del compresor CR-201.

CR 201	
Adiabatic Head (m)	10970
Polytropic Head (m)	11230
Adiabatic Fluid Head (KJ/Kg)	107.6
Polytropic Fluid Head (KJ/Kg)	110.1
Adiabatic Efficency	75
Polytropic Efficency	76.746
Power Consumed (KW)	1024
Polytropic Head Factor	1.0003
Polytropic Exponent	1.1354
Isentropic Exponent	1.1024
Speed (rpm)	-

Una vez detallados resultados con HYSYS se procede a calcular la comprobación teórica.

11.8.2. Diseño teórico

Para calcular la potencia del compresor es necesario conocer la altura politrópica que se calcula mediante la ecuación siguiente:

$$H_{Poly} \text{ [kJ/kg]} = \frac{Z Rg T_1}{\frac{n-1}{n}} \left[\left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]$$

Dónde:

- Z: factor de compresibilidad.
- Rg: constante de los gases entre el peso molecular del fluido
- $\frac{n-1}{n}$: exponente politrópico = $\frac{k-1}{k_{\text{poli}}}$
- K: relación entre la Cv i la Cp.

Para obtener la potencia del eje del compresor se utilizará la siguiente ecuación:

$$P_{\text{eje}} = \frac{H_{poly} m_1}{\eta_{\text{mecanico}}} \text{ [W]}$$

Dónde:

- H_{poly} : alturapolitrópica
- M1: caudal másico [Kg/s]
- η_{mecanico} : es el rendimiento mecánico del compresor. El rendimiento utilizado es del 87%.

A continuación se muestran los valores teóricos obtenidos de los compresores:

Tabla 11.8.6. Resultados teóricos del compresor CR-501.

CR-501	
Hpoly	19.524
Z	1
Rg	0.246
T1	62.1
Expon	1.324
P2	1010
P1	800
Cv/Cp	1.232
n-1/n	0.142
Q	53113.872
P	331.089
P real	367.878

Tabla 11.8.7. Resultados teóricos del compresor CR-203.

CR-203	
Hpoly	252.008
Z	1
Rg	0.259
T1	288
Expon	1.505
P2	1010
P1	101.3
Cv/Cp	1.34
n-1/n	0.313
Q	2391.066
P	192.390
P real	213.767

Tabla 11.8.8. Resultados teóricos del compresor CR-202.

CR-202	
Hpoly	264.396
Z	1
Rg	0.296
T1	288
Expon	1.267
P2	1010
P1	101.3
Cv/Cp	1.239
n-1/n	0.247
Q	3454.477
P	291.619
P real	324.021

Tabla 11.8.9. Resultados teóricos del compresor CR-201.

CR-201	
Hpoly	77.0312
Z	1
Rg	0.1368
T1	293
Expon	1.135
P2	1010
P1	185.3
Cv/Cp	1.125
n-1/n	0.145
Q	25685.627
P	631.735
P real	701.928

Tabla 11.8.10. Resultados teóricos del compresor CR-301.

CR-301	
H_{poly}	160.703
Z	1
R_g	0.225
T₁	285
Expon	1.269
P₂	805
P₁	108
C_v/C_p	1.2
n-1/n	0.212
Q	61583.608
P	3159.848
P real	3510.942

11.9. DISEÑO DE EQUIPOS DE SERVICIO

11.9.1. Torres de refrigeración

La planta VAM Industry consta de 3 torres de refrigeración, una para enfriar dos corrientes de agua que provienen de los intercambiadores E-303 y E-401 con la misma temperatura de entrada en los intercambiadores de calor y parecido salto térmico; y dos torres para enfriar la corriente de agua que proviene del intercambiador E-301, los cuales se han decidido que trabajen en serie debido a la relación salto térmico/eficiencia de la torre, ya que el salto térmico es elevado para llevarla a cabo en una sola y que a su vez sea eficiente, por ello se opta por ponerlas en serie. A continuación se muestran las necesidades de estos equipos:

Tabla 11.9.1. Equipos con requerimiento de agua refrigerante.

Equipo	T ^a entrada agua (°C)	T ^a salida agua (°C)	Caudal agua (kg/s)
E-301	80	20	1.293
E-303	53	20	18.37
E-401	50	20	4.468

Las siguientes torres de refrigeración tratarán el agua de los siguientes equipos:

- TR-1001 i TR-1002: E-301
- TR-1003: E-303, E-401

Para explicar el método de cálculo para elegir la torre de refrigeración correcta, se expone el ejemplo de la torre TR-1003.

La potencia frigorífica requerida vendrá dada por el calor necesario que se necesita intercambiar para enfriar el agua hasta la temperatura de entrada en los intercambiadores (20°C), esta se calcula con la siguiente ecuación:

$$Q = M_{\text{agua total}} \cdot \overline{Cp} \cdot (T_{\text{entrada}} - T_{\text{salida}}) \quad \text{Ecuación 11.9.1}$$

Dónde:

- Q : calor necesario a intercambiar para enfriar agua(kJ/s).
- $M_{\text{agua total}}$: caudal másico total de agua (kg/s).
- \overline{Cp} : calor específico medio del agua (kJ/Kg·°C).
- T_{entrada} : temperatura de entrada de agua en la torre (°C).
- T_{salida} : temperatura de salida de agua en la torre (°C).

$$M_{\text{agua total}} = \sum m_{\text{agua}} \quad \text{Ecuación 11.9.2}$$

Dónde:

- $M_{\text{agua total}}$: caudal másico total de agua (kg/s).
- m_{agua} : caudal másico de cada equipo (kg/s).

Aplicando la *Ecuación 11.8.2* se obtiene un caudal másico total de entrada en la torre de: $M=22.84$ kg/s.

$$T_{\text{entrada}} = \frac{\sum(m_{\text{aceite}} \cdot T'_{\text{entrada}})}{M_{\text{aceite total}}} \quad \text{Ecuación 11.9.3}$$

Dónde:

- m_{aceite} : caudal másico de cada equipo (kg/s).
- $M_{\text{aceite total}}$: caudal másico total de aceite térmico (kg/s).

- T' _{entrada}: temperatura de entrada de aceite térmico de cada uno de los equipos (°C).
- T _{entrada}: temperatura de entrada de aceite térmico en la caldera (°C)

Aplicando la *Ecuación 11.8.3* se obtiene una temperatura de entrada en la torre de: $T=52.41^{\circ}\text{C}$, por lo tanto, **Q=3345.93 kJ/s**.

Para poder calcular la potencia frigorífica de la torre se sobredimensiona el calor intercambiado un 25%, tal y como se muestra en la *Ecuación 11.8.4*:

$$P = 1.25 \cdot Q \quad \text{Ecuación 11.8.4}$$

Dónde:

- P: Potencia térmica (kJ/s).
- Q: Calor necesario que se necesita intercambiar para calentar el aceite térmico (kJ/s).

Se obtiene: **P= 4182 kW**.

La torre elegida para realizar el intercambio de calor es de la casa EWK, concretamente el modelo EWB-2875/06 con una potencia frigorífica de 4244 kW.

Aunque con una torre se cubren las necesidades de frío, se decide instalar una segunda torre, ya que en el caso que falle no se podrían satisfacer las necesidades de frío de estos equipos. La potencia de trabajo de cada torre respecto al máximo será:

$$W_{\text{torre}}(\%) = \frac{4182/2}{4244} \cdot 100 = 49\%$$

Las torres de refrigeración padecen perdidas de agua por la evaporación de esta y por el arrastre en forma de gotas debido a la circulación del aire en contracorriente, además, se ha de realizar una purga para evitar la acumulación de sales.

La suma de estas perdidas será el caudal que se necesitará añadir a la torre.

Perdidas por evaporación

$$M_{\text{evap}} = \frac{Q}{\lambda} \quad \text{Ecuación 11.9.5}$$

Dónde:

- M_{evap} : caudal másico de agua evaporada (kg/s).
- Q : calor intercambiado (kJ/s).
- λ : calor latente de vaporización del agua.

Sustituyendo en la *Ecuación 11.8.5* se obtiene $M_{evap} = 1.36 \text{ kg/s} = 4896 \text{ kg/h}$.

El caudal para cada torre será:

$$M_{evap} = \frac{M_{evap}}{\text{nº torres}} = \frac{1.36}{2} = 0.68 \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 2448 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Perdidas por arrastre

Se considera que un 0,01% del caudal de agua en circulación se pierde por el arrastre en forma de gotas.

$$M_g = 0.0001 \cdot M$$

Dónde:

- M_g : caudal arrastrado en forma de gotas (kg/h).
- M : caudal de agua en circulación (kg/h).

$$M_g = 0.0001 \cdot 82217 = 8.22 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

El caudal de perdida en forma de gota de cada torre será:

$$M_g = \frac{M_g}{\text{nº torres}} = \frac{8.22}{2} = 4.11 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Caudal de purga

La evaporación constante de parte del agua en circulación hace que la concentración de los iones disueltos aumente, este aumento da lugar a un incremento de la salinidad que pueden favorecer las incrustaciones y corrosión, así como también se da el aumento de microorganismos que pueden crear problemas de contaminación en el agua. A pesar de efectuarse tratamientos químicos con biocidas, alguicidas y antiincrustantes, se requiere de una purga constante de agua en circulación; el caudal de purga se calcula con la siguiente ecuación:

$$M_p = \frac{M_{evap}}{C.C-1} \quad Ecuación 11.9.6$$

Dónde:

- M_p : caudal de purga (kg/h).
- M_{evap} : caudal de agua evaporada (kg/h).
- Ciclo de concentración (100).

$$M_p = \frac{4896}{C.C-1} = 49.45 \frac{kg}{h}$$

El caudal de purga para cada torre será:

$$M_p = \frac{M_p}{n^{\circ} \text{ torres}} = \frac{49.45}{2} = 24.73 \frac{kg}{h}$$

Agua de reposición

El caudal de reposición final será la suma de los tres caudales:

$$M_{rep} = M_{evap} + M_g + M_p \quad Ecuación 11.9.7$$

$$M_{rep} = 4954 \text{ kg/h}$$

El caudal de reposición para cada torres será:

$$M_{rep} = \frac{M_{rep}}{n^{\circ} \text{ torres}} = \frac{4954}{2} = 2477 \frac{kg}{h}$$

A modo de resumen se presentan en la siguiente tabla los parámetros de diseño de las torres de refrigeración:

Tabla 11.9.2. Rendimientos y caudales de reposición de agua de las torres de refrigeración

Ítem	Rendimiento (%)	$M_{rep}(\text{kg/h})$
TR-1001	84%	268
TR-1002	84%	260
TR-1003	49%	2477

11.9.2. Caldera

Los requerimientos de calor en la planta se satisfacen con calderas que calientan el aceite térmico Therminol 66 hasta 290°C y 280°C. Al tener temperaturas de entrada de aceite diferentes, se necesitará como mínimo tener 2 calderas, una para calentar el aceite hasta 290°C que requiere el equipo E-201 y otra para calentar hasta 280°C, ya que se utilizará como circuito primario produciendo un caudal que se aprovechará a partir de intercambiadores para calentar la corriente que requiere el equipo C-402B.

Debido a que las necesidades de aceite térmico del equipo E-402B son bastante altas, se opta por poner dos calderas en serie y de esta manera obtener mejor rendimiento.

A continuación se presentan los equipos con requerimientos de aceite térmico

Tabla 11.9.3 Equipos con requerimientos de Therminol 66.

Equipo	T [°] entrada aceite (°C)	T [°] salida aceite (°C)	Caudal aceite térmico (kg/s)
E-201	160	290	19.59
E-202	200	250	1.88
C-402B	230	280	108.9

Las siguientes calderas tratarán el aceite térmico de los siguientes equipos:

- CO-1001: E-201
- CO-1002: E-202(a partir de un intercambiador), C-402B
- CO-1003: E-202(a partir de un intercambiador), C-402B

Para explicar el método de cálculo para elegir la caldera correcta, se expone el ejemplo de la caldera CO-1001.

La potencia térmica necesaria de la caldera para obtener aceite térmico a 290°C vendrá dada por el calor necesario que se necesita intercambiar para calentar aceite de los equipos desde la temperatura de entrada a la caldera hasta 290°C. Para el cálculo del calor necesario que se necesita intercambiar para calentar el aceite térmico, se utiliza la *Ecuación 11.9.8*

$$Q = M_{aceite\ total} \cdot \overline{Cp} \cdot (T_{salida} - T_{entrada}) \quad Ecuación\ 11.9.8$$

Dónde:

- Q : calor necesario a intercambiar para calentar aceite térmico (kJ/s).
- $M_{aceite\ total}$: caudal másico total de aceite térmico (kg/s).
- $\overline{C_p}$: calor específico medio de aceite térmico (kJ/Kg·°C).
- $T_{entrada}$: temperatura de entrada de aceite térmico a la caldera (°C).
- T_{salida} : temperatura de salida de aceite térmico en la caldera (°C).

$$M_{aceite\ total} = \sum m_{aceite} \quad Ecuación\ 11.9.9$$

Dónde:

- $M_{aceite\ total}$: caudal másico total de aceite térmico (kg/s).
- m_{aceite} : caudal másico de cada equipo (kg/s).

Aplicando la *Ecuación 11.9.9* se obtiene un caudal másico total de entrada en la caldera de: $M=19.59$ kg/s

$$T_{entrada} = \frac{\sum(m_{aceite} \cdot T'_{entrada})}{M_{aceite\ total}} \quad Ecuación\ 11.9.10$$

Dónde:

- m_{aceite} : caudal másico de cada equipo (kg/s).
- $M_{aceite\ total}$: caudal másico total de aceite térmico (kg/s).
- $T'_{entrada}$: temperatura de entrada de aceite térmico de cada uno de los equipos (°C).
- $T_{entrada}$: temperatura de entrada de aceite térmico en la caldera (°C).

Para el diseño de la caldera CO-201 la temperatura de entrada a la caldera es el de la salida del equipo E-201, por lo tanto, el calor intercambiado es de: **Q=5350 kJ/s**

Para poder calcular la potencia térmica de la caldera se sobredimensiona el calor intercambiado un 25%, tal y como se muestra en la *Ecuación 11.9.10*.

$$P = 1.25 \cdot Q \quad Ecuación\ 11.9.10$$

Dónde:

- P : potencia térmica (kJ/s).
- Q : calor necesario que se necesita intercambiar para calentar el aceite térmico (kJ/s).

La potencia resultante es de **6687.4 kW**. Para proporcionar esta potencia se ha elegido una caldera de la casa ATTSU, concretamente el modelo FT-7000; que cuenta con una potencia térmica útil de 8140 kW.

Aunque con una caldera se cubren las necesidades de calor, se decide instalar una segunda caldera y de esta manera si una de las dos falla se podría continuar operando. De esta manera, cada caldera trabajara a una potencia respecto la máxima posible.

$$W_{\text{caldera}}(\%) = \frac{6687.4/2}{8140} \cdot 100 = 41\%$$

Como combustible se utilizara gas natural, la cantidad necesaria se calcula con la siguiente ecuación:

$$Q_{\text{gas natural}} = \frac{P}{\text{PCI}_{\text{gas natural}} \cdot \phi} \cdot 3600 \quad \text{Ecuación 11.9.11}$$

Dónde:

- $Q_{\text{gas natural}}$: caudal volumétrico de gas natural (m^3/h).
- P: potencia (kW)
- PCI: poder calorífico inferior (37600 kJ/m^3).
- ϕ : rendimiento (Se considera del 85%).

Se obtiene $Q_{\text{gas natural}} = 753.3 \text{ m}^3/\text{h}$

A continuación se muestra a modo de resumen el rendimiento de las dos calderas.

Tabla 11.9.4. Rendimiento de las calderas.

Ítem	Rendimiento (%)	$Q_{\text{gas natural}} (\text{m}^3/\text{h})$
CO-1001	41%	753.3
CO-1002	86%	676.2
CO-1003	86%	1014

11.9.3. Electricidad

La planta dispone de un grupo electrógeno para asegurar la continuidad del suministro eléctrico de equipos, sala de control, servicios de iluminación, entre otros.

A continuación se presenta el consumo energético de los equipos más importantes para el proceso de producción.

Tabla 11.9.5.Requerimientos eléctricos de los equipos de cada área.

	Equipo	P(kW)
Área 100	P-101	0.264
	M-201	8.360
	CR-201	0.702
Área 200	CR-202	0.324
	CR-203	0.214
	P-201	0.055
Área 300	CR-301	3.511
Área 400	P-401	0.691
	P-402	0.001
	P-403	0.313
	M-401	18.36
Área 500	CR-501	0.368
Área 800	TR-401 A	60.0
	TR-401 B	60.0
	TR-301	8.5
	TR-302	8.5
TOTAL		170.2

Por otro lado, las necesidades de iluminación de la planta son:

Tabla 11.9.6. Requerimientos eléctricos de iluminación en la planta.

	Descripción de la zona	Área (m2)	P (lux)	P (W/m2)	P (kW)
Área 100	Almacenamiento de materias primeras	412	200	10	4.12
Área 200	Reacción de formación de VAM	485	500	25	12.14
Área 300	Primera etapa de separación	177	500	25	4.42
Área 400	Segunda etapa de separación	486	500	25	12.15
Área 500	Separación del gas	477	500	25	11.92
Área 600	Purificación del VAM	350	500	25	8.75
Área 700	Producto final	687	200	10	6.87
Área 800	Social	2500	1000	50	125.00
Área 900	Taller y almacén	100	1000	50	5.00
Área 1000	Servicios	440	500	25	10.99
Área 1100	Residuos	350	500	25	8.75
Área 1200	Sala de control	300	1000	50	15.00
					TOTAL 225.11

Se obtiene un consumo total de **395.28 kW**. Debido a que no se precisa de datos de consumo de algunos equipos, así como de ciertas zonas, se sobredimensiona este valor un 25%. Por lo tanto, se considera que el consumo de la planta será de 494.09kW. Con un factor de potencia de 0.8, se obtiene que:

$$P_{kVA} = \frac{494.09}{0.8} = 617.6 \text{ kVA}$$

El grupo electrógeno del que se dispone, es de la casa FGWilson, concretamente el modelo P715-3 con una capacidad eléctrica de 715 kVA.