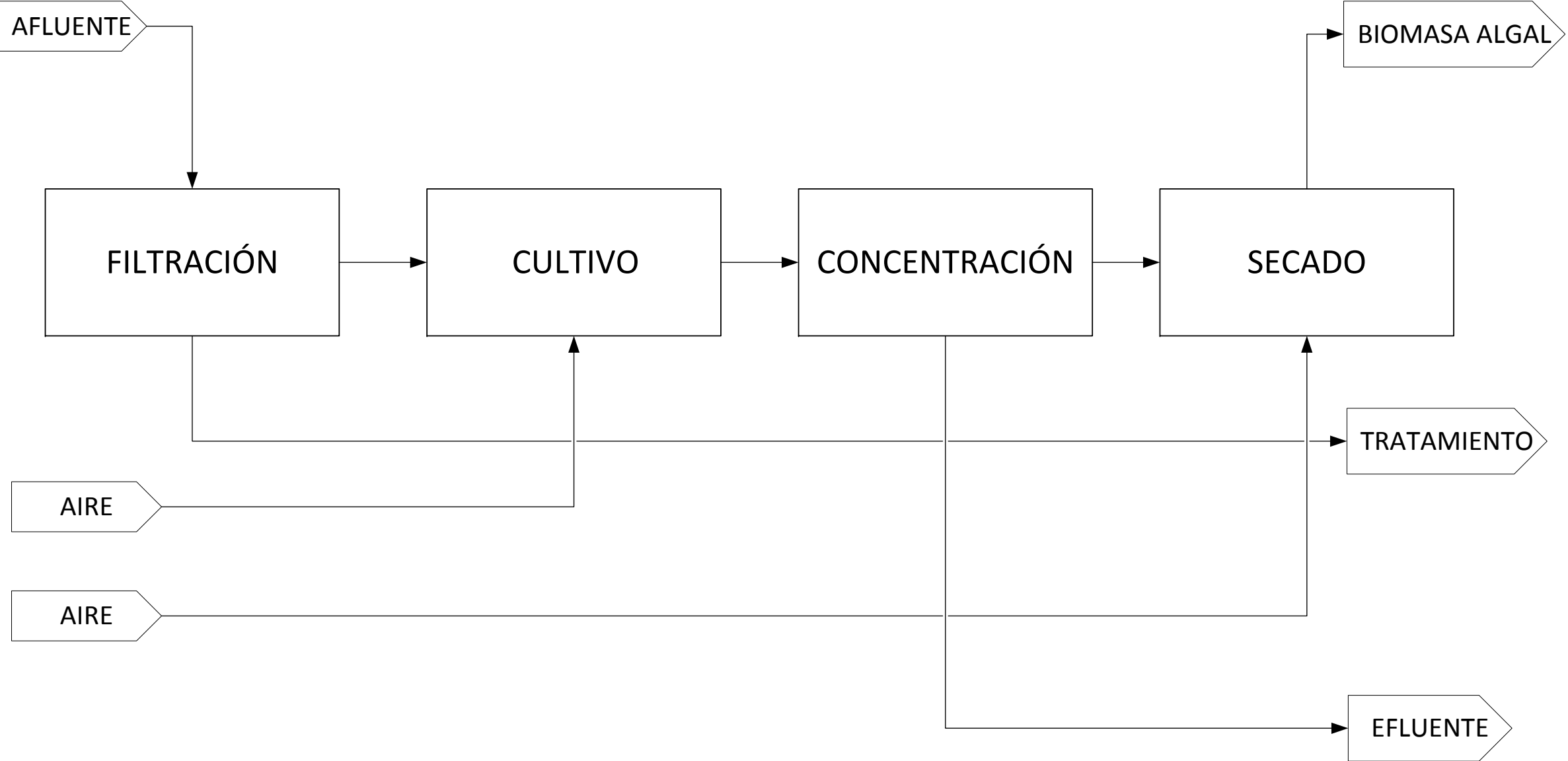


ANEXOS

ANEXO A

A.1. Diagrama de Bloques



NOTAS GENERALES

NOTAS

A.2. Diagrama de proceso

T-101
TANQUE DE
ALIMENTACIÓN DEL
AGUA RESIDUAL

P-101 A/B
BOMBAS DE
ALIMENTACIÓN DEL
AGUA RESIDUAL

F-101
FILTRACIÓN CON
MEMBRANAS

F-102
FILTRO DE
PARTÍCULAS

P-106
BOMBA DEL
PERMEADO

F-103
FILTRO DE
PARTÍCULAS

F-104
FILTRO
DEL AIRE

B-101
SOPLANTE DEL
BIORREACTOR

BR-101
BIORREACTOR

P-102
BOMBAS DEL
BIORREACTOR

P-103
BOMBAS DE LA
RECIRCULACIÓN

CV-101
CENTRÍFUGA
DE DISCOS

P-104
BOMBAS DEL
AGUA TRATADA

P-105
BOMBAS DEL
CONCENTRADO

B-101
SOPLANTE DEL
SECADO EN ESPRAY

F-105
FILTRO
DEL AIRE

S-101
SECADO
EN SPRAY

C-101
CICLÓN

E-101
CALENTADOR
ELÉCTRICO

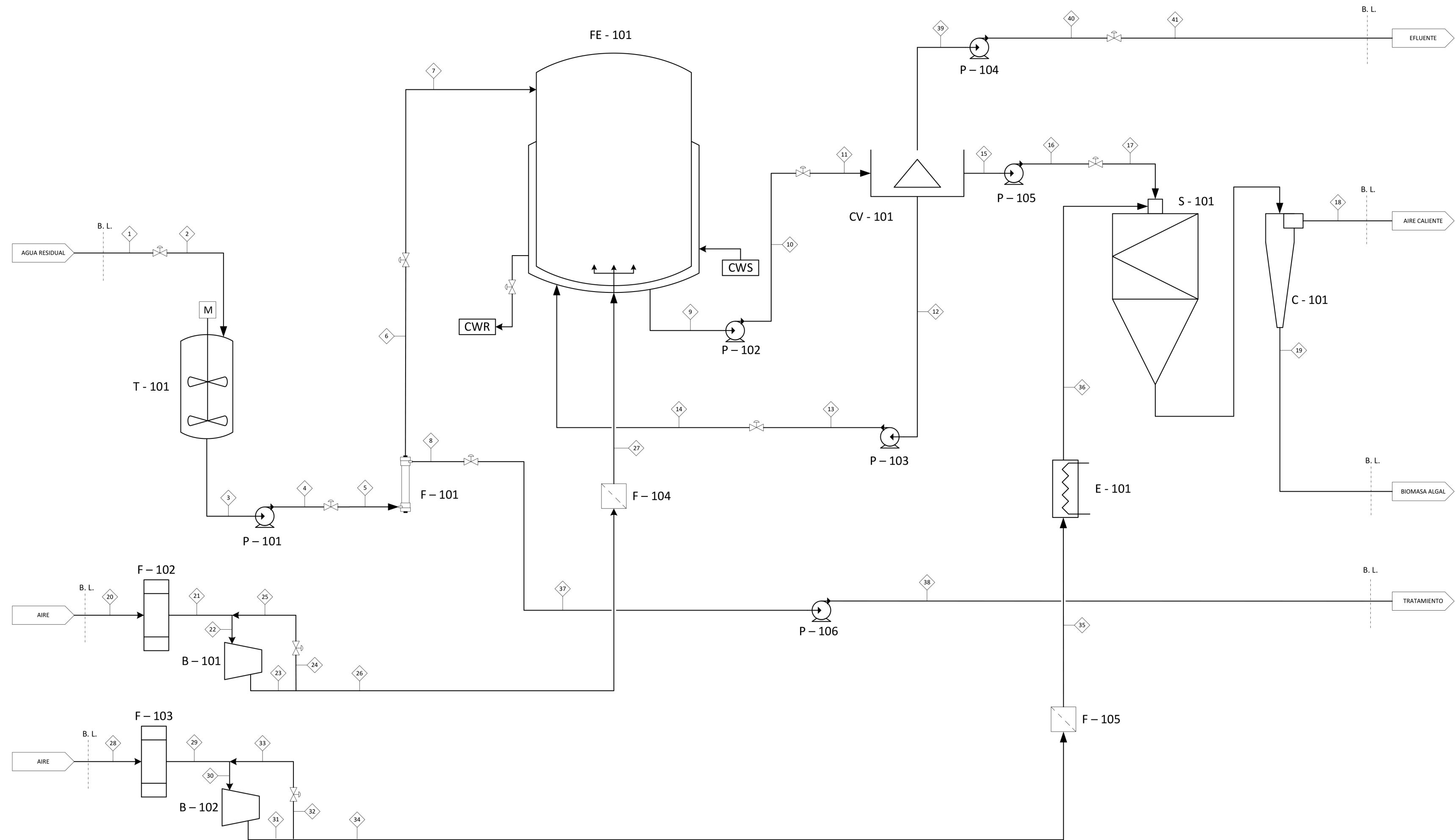


TABLA DE CORRIENTES

Corriente	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41			
Desde	Agua Residual	Agua Residual	T-101	P-101	P-101	F-101	F-101	F-101	F-101	F-101	P-102	P-102	CV-101	P-103	P-103	CV-101	P-105	P-105	C-101	C-101	Aire	F-102	F-102	B-101	B-101	B-101	B-101	F-104	Aire	F-103	B-102	B-102	B-102	B-102	B-102	F-105	E-101	F-101	P-106	CV-101	P-104	P-104		
Hasta	T-101	T-101	P-101	F-101	F-101	FE-101	FE-101	P-106	P-102	CV-101	CV-101	P-103	FE-101	FE-101	P-105	S-101	S-101	Aire Caliente	Biomasa algal	F-102	B-101	B-101	B-101	B-101	B-101	B-101	F-104	FE-101	F-103	B-102	B-102	B-102	B-102	F-105	E-101	S-101	P-106	Tratamiento	P-104	Efluente	P-104	Efluente		
Presión (bar)	1	1	1,3	2,5	2,1	2	1,6	2	0,30	1,20	1,5	1,2	2,21	1,81	1,2	2,8	2,4	2,4	2,4	0,9	0,9	1,1	1,6	1,6	1,2	1,6	1,5	0,9	0,9	1,8	3	3	2,6	2,9	2,7	2,2	2,4	2,4	1,2	1,5	1,1			
Temperatura (°C)	15	15	15	15	15	15	15	15	28	28	28	28	28	28	28	25	25	40	40	17	17	20	30	30	30	30	29	28	17	17	17	17	17	17	17	200	15	15	28	25	22			
Caudal (m³/d)	2,245	2,245	2,245	2,245	2,245	2,000	2,000	0,245	3,500	3,500	3,500	1,500	1,500	1,500	0,278	0,278	0,278	2673,032	0,003	169,205	169,205	169,205	169,205	169,205	169,205	169,205	169,205	2525,980	2525,980	2525,980	2525,980	2525,980	2525,980	2525,980	2243,734	0,245	0,245	1,722	1,722	1,722				
Componentes (kg/d)																																												
SST	1,960	1,960	1,960	1,960	1,960	0	0	8,000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	0	0	0	0			
DQOpart	2,604	2,604	2,604	2,604	2,604	0	0	10,630	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,604	2,604	0	0	0	0		
DQOsoluble	5,208	5,208	5,208	5,208	5,208	5,208	5,208	0	0,456	0,456	0,456	0,195	0,195	0,195	0,036	0,036	0,036	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,224	0,224	0,224		
Nitrógeno	4,378	4,378	4,378	4,378	4,378	4,378	4,378	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Fósforo	2,178	2,178	2,178	2,178	2,178	2,178	2,178	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Microalgas	0	0	0	0	0	0	0	0	7,000	7,000	7,000	12,000	12,000	12,000	2,227	2,227	2,227	0	2,227	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Aire	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3207,639	0	203,046	203,046	203,046	203,046	203,046	203,046	203,046	203,046	203,046	203,046	203,046	203,046	203,046	203,046	203,046	203,046	203,046	203,046	203,046	203,046	203,046	203,046	203,046		
Componentes (kg/m³)																																												
SST	0,873	0,873	0,873	0,873	0,873	0	0	8,000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8,000	8,000	0	0	0	0		
DQOpart	1,160	1,160	1,160	1,160	1,160	0	0	10,630	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10,630	10,630	0	0	0	0		
DQOsoluble	2,320	2,320	2,320	2,320	2,320	2,604	2,604	0	0,130	0,130	0,130	0,130	0,130	0,130	0,130	0,130	0,130	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,130	0,130	0,130	
Nitrógeno	1,950	1,950	1,950	1,950	1,950	2,189	2,189	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Fósforo	0,970	0,970	0,970	0,970	0,970	1,089	1,089	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Microalgas	0	0	0	0	0	0	0	0	2,000	2,000	2,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	0	8,000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Aire	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,200	0	1,200	1,200	1,200	1,200	1,200	1,200	1,200	1,200	1,200	1,200	1,200	1,200	1,200	1,200	1,200	1,200	1,200	1,200	1,200	1,200	1,200	1,200	1,200		

NOTAS GENERALES

NOTAS

JUAN CASTRO BUSTAMANTE

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

DISEÑO DE UNA PLANTA PILOTO PARA EL
CRECIMIENTO DE MICROALGAS HETERÓTROFAS

PFD - A3 - 101



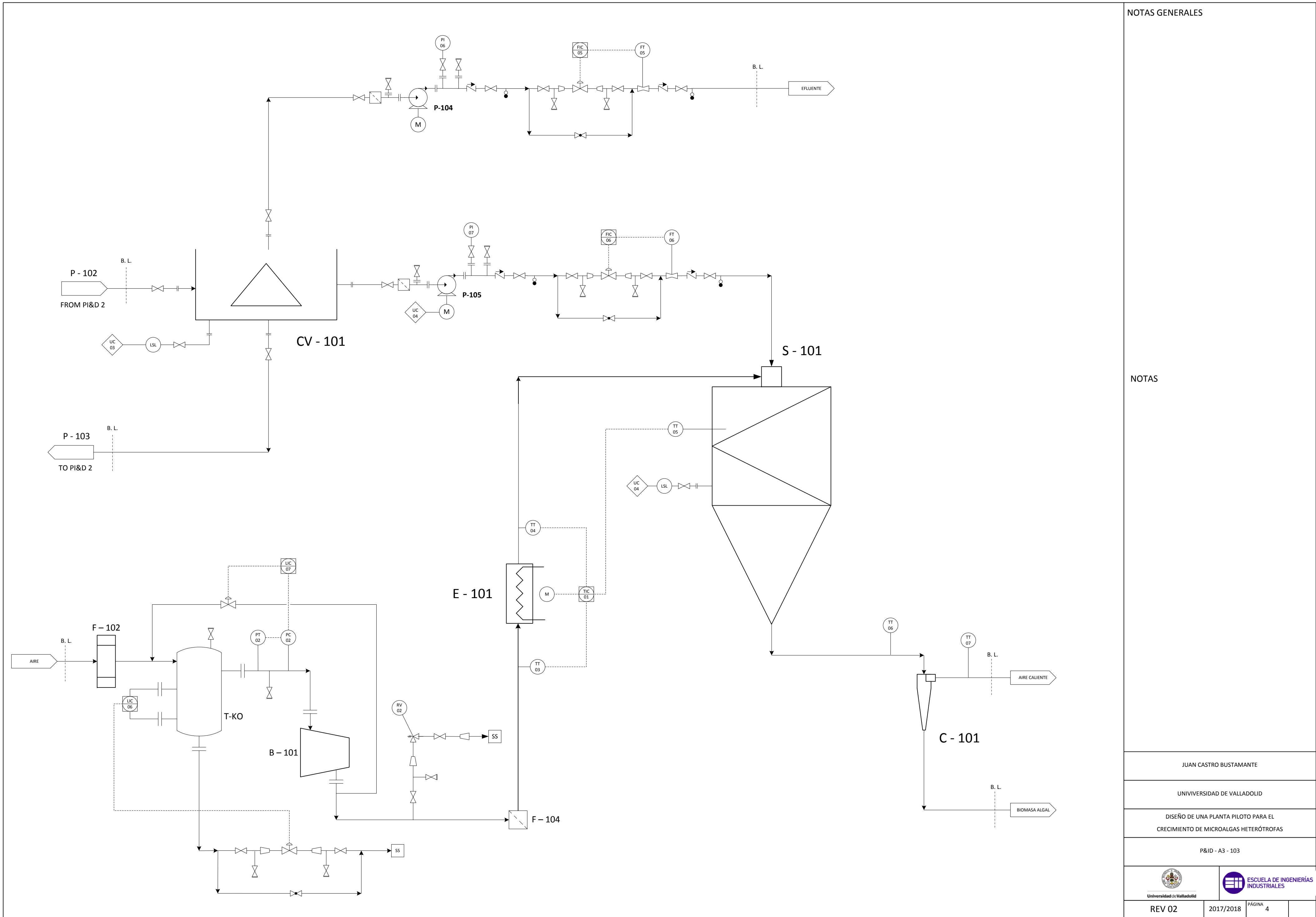
REV 05



2017/2018

PÁGINA 1

A.3. Diagramas P&ID



NOTAS GENERALES

NOTAS

JUAN CASTRO BUSTAMANTE			
UNIVERSIDAD DE VALLADOLID			
DISEÑO DE UNA PLANTA PILOTO PARA EL CRECIMIENTO DE MICROALGAS HETERÓTROFAS			
P&ID - A3 - 103			
			
REV 02	2017/2018	PÁGINA	4

ANEXO B

B.1. Cálculos para el diseño de los tanques de almacenamiento

B.1.1. Diseño mecánico del tanque de almacenamiento del agua residual

En primer lugar, se tomará el tiempo de residencia para abastecer al proceso el tiempo suficiente para trabajar en régimen estacionario, cumpliendo así con las necesidades definidas en el punto 4.4 de la base de cálculo.

$$\tau = \frac{Q_L}{V}; \quad V = \tau \cdot Q_L$$

$$V = 24 \, h \cdot 2 \, \frac{m^3}{d} \cdot \frac{d}{24 \, h} = 2 \, m^3$$

Aplicando un sobredimensionamiento del 20%, para garantizar una mayor seguridad, el volumen final del tanque será:

$$V = 2,4 \, m^3$$

Con el material seleccionado (acero inoxidable 304), se pueden calcular los espesores requeridos para soportar la presión interna definida en la base de diseño ($P_{\text{diseño}} = 3,5 \, \text{barg}$)

Selección de la geometría del tanque:

Seleccionada la relación altura/diámetro como:

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

Se puede calcular el diámetro interior del tanque:

$$V = \frac{\pi}{4} \cdot D_i^2 \cdot L$$

$$D_i = 1,15 \, m$$

$$L = 2,3 \, m$$

Determinación del número de anillos:

Para determinar el número de anillos que componen el cuerpo del tanque, se debe seleccionar una altura del anillo (ha), entre los valores estandarizados 1,8 – 2,4 m cada anillo. Eligiendo un valor de:

$$ha = 2,3 \, \frac{m}{\text{anillo}}$$

Por lo que el número de anillos se calcula con la altura total del tanque:

$$n = \frac{L}{ha} = \frac{2,3 \text{ m}}{2,3 \frac{\text{m}}{\text{anillo}}} = 1 \text{ anillos}$$

Diseño del cuerpo:

El espesor de la pared del cuerpo del tanque requerido para resistir la carga hidrostática será mayor que el calculado por condiciones de diseño, incluyendo la tolerancia por corrosión, o por condiciones de prueba hidrostática, pero en ningún caso deberá ser menor a lo que se muestra en la Tabla 35:

Diámetro Nominal (m)	Espesor Nominal (mm)
$D < 15$	5
$15 \leq D < 36$	6
$36 \leq D \leq 60$	8
$D > 60$	10

Tabla 35. Mínimo espesor del cuerpo. API 650

Cálculo del espesor del cuerpo:

Los espesores del cuerpo se calculan según las condiciones de diseño, para cada anillo del cuerpo, según las ecuaciones siguientes:

$$t_d = \frac{4,9 \cdot D \cdot (H - 0,3) \cdot G}{S_d} + CA$$

$$t_t = \frac{4,9 \cdot D \cdot (H - 0,3)}{S_t}$$

Donde las tensiones S_d y S_t , se obtienen a partir de la norma API 650 Stainless Steel y presentan los siguientes valores:

Table S-2a—(SI) Allowable Stresses for Tank Shells.

Type	Min. Yield MPa	Min. Tensile MPa	Allowable Stress (S_d) (in MPa) for Maximum Design Temperature Not Exceeding					S_t Ambien
			40°C	90°C	150°C	200°C	260°C	
201-1	260	515	155	136	125	121	--	234
201LN	310	655	197	172	153	145	143	279
304	205	515	155	155	140	128	121	186
304L	170	485	145	132	119	109	101	155
316	205	515	155	155	145	133	123	186
316L	170	485	145	131	117	107	99	155
317	205	515	155	155	145	133	123	186
317L	205	515	155	155	145	133	123	186

Table S-3a—(SI) Allowable Stresses for Plate Ring Flanges

Type	Allowable Stress (S_t) (in MPa) for Maximum Design Temperature Not Exceeding				
	40°C	90°C	150°C	200°C	260°C
201-I	155	133	115	104	--
201LN	197	167	151	143	138
304	140	115	103	95	89
304L	117	99	88	81	75
316	140	119	107	99	92
316L	117	97	87	79	73
317	140	119	108	99	92
317L	140	119	108	99	92

Tabla 36. Tensiones máximas permitidas

Donde las tensiones S_d y S_t , son:

$$S_d = 155 \text{ MPa}$$

$$S_t = 140 \text{ MPa}$$

La corrosión CA en el tanque se supone de 0,03 mm/año, un valor relativamente bajo, pero normal en este caso, puesto que el fluido de trabajo, agua, no es corrosivo.

$$CA = 0,03 \frac{\text{mm}}{\text{año}} \cdot 20 \text{ años} = 0,6 \text{ mm}$$

Luego, los espesores de diseño y de prueba hidrostática del cuerpo, para cada anillo, serán:

Espesor de diseño		Espesor de prueba hidrostática	
t_d (mm)	6,073	t_t (mm)	0,081

Tabla 37. Espesores de diseño del tanque de almacenamiento de agua residual

Diseño del fondo:

Generalmente los fondos de los tanques de almacenamiento están fabricados de placas de acero con un espesor menor al usado en el cuerpo.

El diámetro del fondo será:

$$D_{\text{fondo}} = D_0 + 50 \text{ mm} = (D_i + 2 \cdot e) + 0,05 \text{ m} = 1,21 \text{ m}$$

Las placas del fondo se seleccionan con un espesor mínimo de 6 mm y una anchura mínima de 1800 mm, por lo que podremos determinar el área de placa y el número de placas necesarias.

$$\text{Área placa} = \text{Anchura mínima}^2 = 3,24 \text{ m}^2$$

$$\text{Área fondo} = \frac{\pi}{4} \cdot D_{\text{fondo}}^2 = \frac{\pi}{4} \cdot 1,21^2 = 1,15 \text{ m}^2$$

$$N_{\text{placas}} = \frac{A_{\text{fondo}}}{A_{\text{placa}}} = \frac{1,15 \text{ m}^2}{3,24 \text{ m}^2} = 0,355 \approx 1 \text{ placa}$$

Diseño del techo:

En este caso, se tiene un techo tipo domo (casquete esférico) del que se debe conocer el espesor mínimo del techo (t_d). Se seleccionará el mayor valor entre t_d y 5 mm, es decir, el más restrictivo.

$$t_d = 141 \cdot R \cdot \int \frac{P_h}{E} + CA$$

Donde:

- El radio R será: $R = D_0/2 = 0,58 \text{ m}$.
- La tensión admisible para placas del techo (P_h) se obtiene a partir de la siguiente Tabla 38:

Table S-5a—(SI) Yield Strength Values in MPa

Type	Yield Strength (in MPa) for Maximum Design Temperature Not Exceeding				
	40°C	90°C	150°C	200°C	260°C
201-1	260	199	172	157	--
201LN	310	250	227	214	207
304	205	170	155	143	134
304L	170	148	132	121	113
316	205	178	161	148	137
316L	170	145	130	119	110
317	205	179	161	148	138
317L	205	179	161	148	138

Tabla 38. Límites elásticos.

- El módulo de elasticidad (E) se obtiene a partir de la siguiente Tabla 39:

Table S-6a—(SI) Modulus of Elasticity at the Maximum Design Temperature

Maximum Design Temperature (°C) Not Exceeding	Modulus of Elasticity (MPa)
40	194,000
90	190,000
150	186,000
200	182,000
260	179,000

Tabla 39. Módulos de elasticidad según la temperatura.

- La corrosión CA en el techo se supone similar a la del cuerpo (CA=10mm).

Por lo que el espesor mínimo correspondiente al techo será:

$$t_d = 8,67 \text{ mm}$$

Diseño del agitador:

Haciendo uso de los valores típicos de las dimensiones características de un tanque agitado, recogidas en la Tabla 6, podemos calcular el resto de las dimensiones, de modo que resulte:

$$\frac{D}{D_T} = \frac{1}{3} \rightarrow D = 0,383 \text{ m}$$

$$\frac{H}{D_T} = 1 \rightarrow H = 0,383 \text{ m}$$

$$\frac{W_B}{D_T} = \frac{1}{12} \rightarrow W_B = 0,096 \text{ m}$$

$$\frac{Z_A}{D} = 1 \rightarrow Z_A = 0,383 \text{ m}$$

$$\frac{W}{D} = \frac{1}{5} \rightarrow W = 0,08 \text{ m}$$

$$\frac{L}{D} = \frac{1}{4} \rightarrow L = 0,096 \text{ m}$$

Para el cálculo de la potencia de agitación se usará el número de potencia, que relaciona el tipo de agitador con las propiedades del fluido.

$$N_P = \frac{P_0 \cdot g}{\rho \cdot N^3 \cdot D^5}$$

$$N_P = f(Re, Fr)$$

Con la gráfica del número de potencia tomada de (Coulson, et al., 2002), reflejada en la Ilustración 33, se determina el número de potencia.

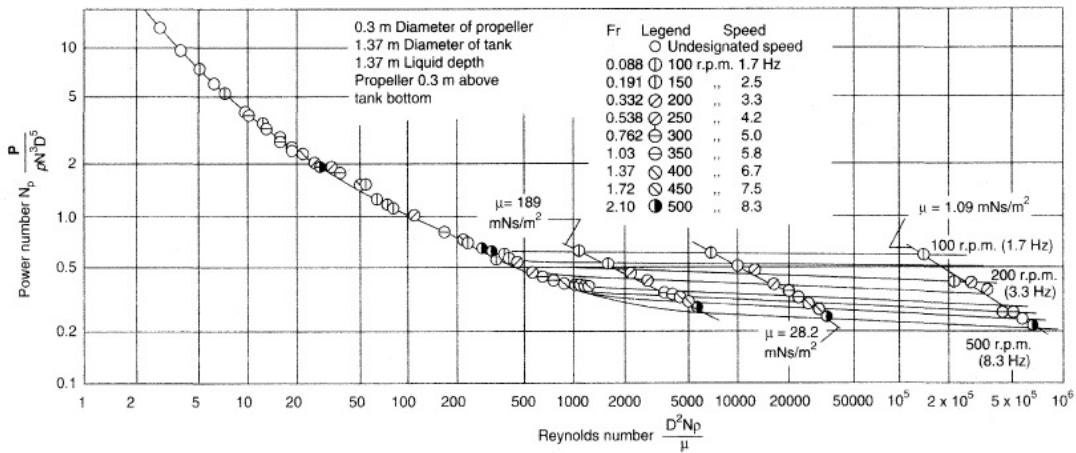


Ilustración 33. Gráfica del Número de Potencia (Coulson, et al., 2002)

$$Re = \frac{\rho \cdot D^2 \cdot N}{\mu} = \frac{1000 \frac{kg}{m^3} \cdot (0,383 m)^2 \cdot 2,5 \frac{rev}{s}}{1 \cdot 10^{-3} \frac{kg}{m \cdot s}} = 3,66 \cdot 10^5$$

$$N_p = 0,5$$

La potencia transferida al fluido por el agitador será entonces de:

$$P_0 = \frac{N_p \cdot \rho \cdot N^3 \cdot D^5}{g} = \frac{0,5 \cdot 1000 \frac{kg}{m^3} \cdot (0,383 m)^5 \cdot \left(2,5 \frac{rev}{s}\right)^3}{9,8 \frac{m}{s^2}} = 6,57 W$$

Tomando un motor con una eficiencia del 80%, la potencia consumida en la agitación será:

$$P = \frac{P_0}{\eta} = \frac{6,57 W}{0,8} = 8,22 W$$

B.2. Cálculos para el diseño del sistema de Ultrafiltración

B.2.1. Parámetros de diseño

Con los valores habituales del caudal de filtrado se obtiene el área necesaria para filtrar la corriente de salida del tanque de alimentación. Por lo tanto, con la densidad de permeado determinada en la base de diseño, se calcula el área de filtrado del sistema.

$$A_F = \frac{Q_P}{J_P} = \frac{2 \frac{m^3}{d}}{0,03 \frac{m^3}{m^2 \cdot h} \cdot \frac{24 h}{d}} = 2,7 m^2$$

Con la membrana comercial ROMICON® 5" PM500 de 2,7 mm de diámetro por fibra y área de filtrado, $A_m = 3,7 \text{ m}^2$, se puede conocer entonces el número de membranas necesarias:

$$N_m = \frac{A_F}{A_m} = \frac{2,7 \text{ m}^2}{3,7 \text{ m}^2} = 0,75$$

Por lo que, se ha tomado 1 módulo de membranas ROMICON® de área $A_m = 3,7 \text{ m}^2$.

B.2.2. Balance de materia

ALIMENTACIÓN

Q_0

$SST_0 = 0,873 \text{ kg/m}^3$

$DQO_{part_0} = 1,16 \text{ kg/m}^3$

$DQO_{sol_0} = 2,32 \text{ kg/m}^3$

$N_0 = 1,95 \text{ kg/m}^3$

$P_0 = 0,97 \text{ kg/m}^3$

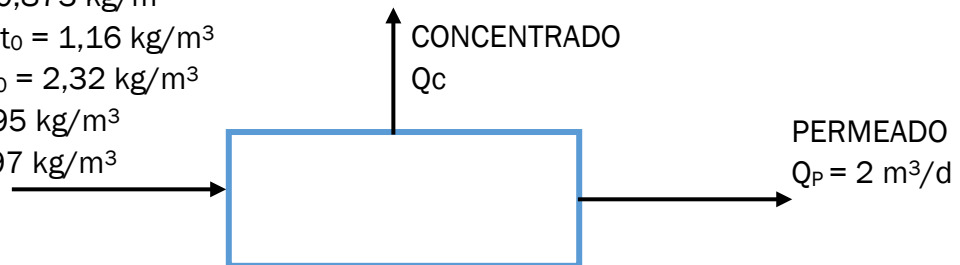


Ilustración 34. Balance de materia del sistema de Ultrafiltración.

Se asume una total retención de los sólidos (SST) y de la DQO particulada (DQO_{part}), sin embargo, la DQO soluble (DQO_{sol}) no será retenida. Además, se fija una concentración de sólidos en el concentrado de $SST_C = 8 \text{ kg/m}^3$

Con los datos que aparecen en la Ilustración 34 tendremos definidas el resto de las corrientes.

Balance de materia a los sólidos:

$$\dot{m}_{SST_C} = \dot{m}_{SST_0} \rightarrow Q_0 \cdot SST_0 = Q_C \cdot SST_C \rightarrow Q_C = 0,109 \cdot Q_0$$

Balance de materia global:

$$Q_0 = Q_C + Q_P = Q_C + 2 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}$$

Sustituyendo la expresión del caudal de concentrado en función de la alimentación, se obtiene:

$$Q_0 = \frac{2}{1 - 0,109} = 2,245 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}$$

Por lo tanto, el caudal de concentrado es:

$$Q_C = 2,245 \frac{m^3}{d} \cdot 0,109 = 0,245 \frac{m^3}{d}$$

Balance de materia a la DQO_{sol}:

$$Q_0 \cdot DQO_{sol_0} = Q_C \cdot DQO_{sol_C} + Q_P \cdot DQO_{sol_P}$$

$$DQO_{sol_C} = 0 \frac{kg}{m^3} \rightarrow DQO_{sol_P} = Q_0 \cdot \frac{DQO_{sol_0}}{Q_P} = 2,245 \cdot \frac{2,32}{2} = 2,604 \frac{kg}{m^3}$$

Balance de materia a la DQO_{part}:

$$Q_0 \cdot DQO_{part_0} = Q_C \cdot DQO_{part_C} + Q_P \cdot DQO_{part_P}$$

$$DQO_{part_P} = 0 \frac{kg}{m^3} \rightarrow DQO_{part_C} = Q_0 \cdot \frac{DQO_{part_0}}{Q_C} = 2,245 \cdot \frac{1,16}{0,245} = 10,63 \frac{kg}{m^3}$$

Balance de materia al Nitrógeno:

$$Q_0 \cdot N_0 = Q_C \cdot N_C + Q_P \cdot N_P$$

$$N_C = 0 \frac{kg}{m^3} \rightarrow N_P = Q_0 \cdot \frac{N_0}{Q_P} = 2,245 \cdot \frac{1,95}{2} = 2,189 \frac{kg}{m^3}$$

Balance de materia al Fósforo:

$$Q_0 \cdot P_0 = Q_C \cdot P_C + Q_P \cdot P_P$$

$$P_C = 0 \frac{kg}{m^3} \rightarrow P_P = Q_0 \cdot \frac{P_0}{Q_P} = 2,245 \cdot \frac{0,97}{2} = 1,089 \frac{kg}{m^3}$$

De esta forma quedan definidas todas las corrientes que componen la etapa de pretratamiento.

B.3. Cálculos para el diseño del biorreactor

B.3.1. Parámetros de Diseño

A partir de los valores de los parámetros de diseño del biorreactor de la Tabla 40, se efectúan distintos cálculos de diseño:

Parámetro	Nomenclatura	Valor
Flujo volumétrico	Q (m ³ /d)	2
Carga Másica	CM (kg DQO/kg biomasad)	0,4

Parámetro	Nomenclatura	Valor
Concentración inicial de DQO _{soluble}	S ₀ (kg/m ³)	2,604
Concentración inicial de Nitrógeno	N ₀ (kg/m ³)	2,189
Concentración inicial de Fósforo	P ₀ (kg/m ³)	1,089
Concentración en el reactor	X (kg/m ³)	2
Rendimiento eliminación DQO	E (%)	95
Oxígeno disuelto	OD (mg/L)	2
Rendimiento celular	Y (kg biomasa/kg DQO _{elim})	0,45
Velocidad de crecimiento máxima	μ _m (d ⁻¹)	1,2
Constante de respiración endógena	K _d (d ⁻¹)	0,18
Constante de velocidad de crecimiento	K _s (kg DQO/m ³)	0,140
Densidad aire (1 atm, 20 °C)	ρ _{aire} (kg/m ³)	1,2

Tabla 40. Parámetros de diseño del biorreactor

Volumen del reactor:

$$V = \frac{Q \cdot S_0}{X \cdot CM} = \frac{2 \frac{m^3}{d} \cdot 2,604 \frac{kg DQO}{m^3}}{2 \frac{kg biomasa}{m^3} \cdot 0,4 \frac{kg DQO}{kg biomasa \cdot d}} = 5,8 m^3$$

Aplicando un factor de sobredimensionamiento del 20%, el volumen real del reactor será:

$$V = 7,877 m^3$$

El biorreactor será de forma cilíndrica, respetando siempre una relación de altura/diámetro (L/D) de 1,5:

$$\frac{L_T}{D_T} = 1,5$$

$$V = L_T \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D_T^2$$

Sustituyendo los valores conocidos, se obtiene:

$$L_T = 2,826 m$$

$$D_T = 1,884 \text{ m}$$

Carga volumétrica:

$$CV = \frac{Q \cdot S_0}{V} = \frac{2 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \cdot 2,604 \frac{\text{kg DQO}}{\text{m}^3}}{7,877 \text{ m}^3} = 0,661 \frac{\text{kg DQO}}{\text{m}^3 \cdot \text{d}}$$

Concentración de DQO en el efluente:

$$S = S_0 \cdot \left(1 - \frac{E}{100}\right) = 2,604 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \left(1 - \frac{95}{100}\right) = 0,13 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Producción de microorganismos:

$$P_X = Y \cdot Q \cdot (S_0 - S)$$

$$P_X = 0,45 \frac{\text{kg biomasa}}{\text{kg DQO}_{\text{elim}}} \cdot 2 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \cdot (2,604 - 0,13) \frac{\text{kg DQO}}{\text{m}^3} = 2,226 \frac{\text{kg biomasa}}{\text{d}}$$

Tiempo de retención celular:

$$TRC = \frac{V \cdot X}{P_X} = \frac{7,88 \text{ m}^3 \cdot 2 \frac{\text{kg biomasa}}{\text{m}^3}}{2,226 \frac{\text{kg biomasa}}{\text{d}}} = 5,848 \text{ días} \cong 6 \text{ días}$$

Este tiempo indica la edad de los lodos formados en el tratamiento.

Tiempo hidráulico de residencia:

$$TRH = \frac{V}{Q} = \frac{7,88 \text{ m}^3}{2 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}} = 3,26 \text{ días}$$

Este tiempo indica el tiempo teórico que permanecen las partículas de líquido en el proceso de tratamiento (tiempo de residencia en el sistema).

Velocidad de crecimiento:

$$r_x = \mu \cdot X$$

dónde:

$$\mu = \mu_m \frac{S}{K_S + S} = 1,2 \text{ d}^{-1} \cdot \frac{0,521 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{0,140 \frac{\text{kg DQO}}{\text{m}^3} + 0,521 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0,946 \text{ d}^{-1}$$

por lo tanto:

$$r_x = 0,946 \text{ d}^{-1} \cdot 2 \frac{\text{kg biomasa}}{\text{m}^3} = 1,892 \frac{\text{kg biomasa}}{\text{m}^3 \cdot \text{d}}$$

Velocidad de utilización del sustrato:

$$r_s = \frac{-\mu_m X S}{Y(K_S + S)} = \frac{-1,2 \text{ d}^{-1} \cdot 2 \frac{\text{kg biomasa}}{\text{m}^3} \cdot 0,521 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{0,35 \frac{\text{kg biomasa}}{\text{kg DQO}_{elim}} \left(0,140 \frac{\text{kg DQO}}{\text{m}^3} + 0,521 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)} = -5,40 \text{ d}^{-1}$$

Requisitos de nutrientes:

Se comparan las cantidades de nutrientes presentes en el agua residual con las requeridas según (Ferrer Polo & Seco Torrecillas, 2007).

- **Nitrógeno:**

$$\dot{m}_{N_0} = 0,087 \cdot Px + Q_0 = 0,087 \cdot 2,227 \frac{\text{kg biomasa}}{\text{d}} + 2 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} = 2,19 \frac{\text{kg}}{\text{d}}$$

- **Fósforo:**

$$\dot{m}_{P_0} = 0,017 \cdot Px + \frac{Q_0}{2} = 0,017 \cdot 2,227 \frac{\text{kg biomasa}}{\text{d}} + \frac{2 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}}{2} = 1,04 \frac{\text{kg}}{\text{d}}$$

Los valores presentes en agua residual de estudio son:

$$\dot{m}_{N_0} = N_0 \cdot Q_0 = 2,189 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 2 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} = 4,378 \frac{\text{kg}}{\text{d}}$$

$$\dot{m}_{P_0} = P_0 \cdot Q_0 = 1,089 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 2 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} = 2,178 \frac{\text{kg}}{\text{d}}$$

Lo que confirma que cumple con los requisitos nutricionales necesarios para un correcto crecimiento celular.

Necesidades de oxígeno:

$$R_0 = a \cdot Q \cdot (S_0 - S) + b \cdot X \cdot V$$

Donde:

$$a = (0,5 + 0,01 \cdot TRC) = (0,5 + 0,01 \cdot 6 \text{ d}) = 0,56 \frac{\text{kg O}_2}{\text{kg DQO}}$$

$$b = \frac{0,13 \cdot TRC}{1 + 0,16 \cdot TRC} = \frac{0,13 \cdot 6 \text{ d}}{1 + 0,16 \cdot 6 \text{ d}} = 0,398 \frac{\text{kg O}_2}{\text{kg biomasa} \cdot \text{d}}$$

- a, es el coeficiente de utilización de oxígeno para la síntesis (kg O₂/kg DQO).
- b, es el coeficiente de respiración endógena (kg O₂/kg biomasa · d)

$$R_0 = 0,56 \frac{kg O_2}{kg DQO} \cdot 2 \frac{m^3}{d} \cdot (2,604 - 0,130) \frac{kg DQO}{m^3} + 0,398 \frac{kg O_2}{kg biomasa \cdot d} \cdot 2 \frac{kg biomasa}{m^3} \cdot 7,878 m^3$$

$$R_0 = 9,041 \frac{kg O_2}{d}$$

Diseño del sistema de aireación:

El número de difusores utilizados para distribuir el aire en el interior del biorreactor dependerá del caudal medio de cada difusor. Se han seleccionado los difusores de burbuja fina de 9" de la empresa BARMATEC, cuyo caudal de aire de operación está entre 1,5 y 8 m³/h por difusor (BARMATEC, s.f.).

La eficiencia de los difusores dependerá de la profundidad a la que se encuentren estos, siguiendo las curvas proporcionadas por el fabricante (Ilustración 35), tendremos dicha eficiencia:

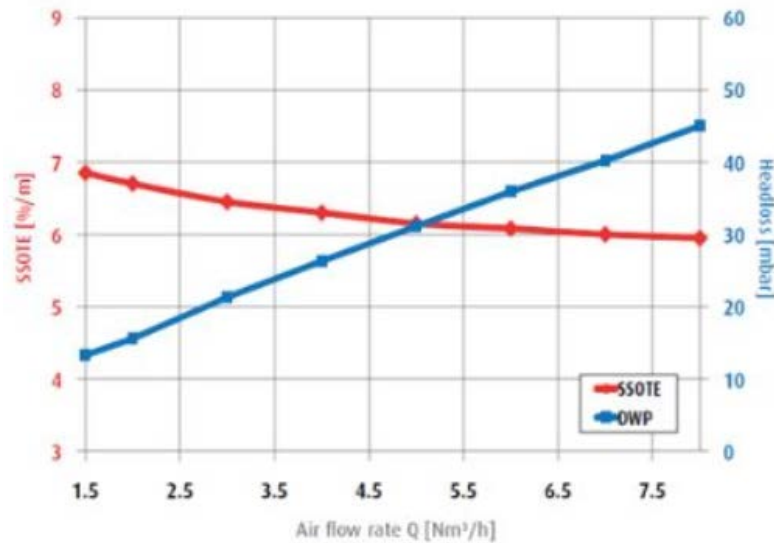


Ilustración 35. Curvas Difusores (BARMATEC, s.f.).

Tomando un caudal medio por difusor de 4,5 m³/h, tendremos una eficiencia de:

$$e = SSOTE \cdot L_T = 6,5 \frac{\%}{m} \cdot 2,826 m = 18,37\%$$

La demanda de oxígeno necesaria en este caso se han calculado anteriormente, por lo que el caudal de aire dependerá de la eficiencia de los difusores seleccionados:

$$R_{aire} = R_0 \cdot \left(\frac{100}{24}\right) \cdot \left(\frac{1}{\rho_{aire}}\right) \cdot \left(\frac{1}{e}\right)$$

$$R_{aire} = 8,951 \frac{kg O_2}{d} \cdot \left(\frac{100}{24}\right) \cdot \left(\frac{1}{1,2 \frac{kg}{m^3}}\right) \cdot \left(\frac{1}{0,184}\right) = 170,9 \frac{m^3}{d}$$

$$Q_G = R_{aire} = 7,121 \frac{m^3}{h}$$

Luego el número de difusores de burbuja fina necesarios será:

$$N_D = \frac{Q_G}{Q_D} = \frac{7,121 \frac{m^3}{h}}{4,5 \frac{m^3}{h}} \cong 2 \text{ difusores}$$

Para el diseño del compresor se necesita conocer la presión de columna de agua que el gas suministrado por el compresor debe superar, más la pérdida de carga debida al atravesar los difusores en el interior del biorreactor.

$$\Delta P_{biorreactor} = \rho \cdot g \cdot H_L = 1000 \frac{kg}{m^3} \cdot 9,8 \frac{m}{s^2} \cdot 2,826 m = 27694,22 Pa$$

$$\Delta P_{difusor} = 0,03 \frac{bar}{difusor} \cdot 2 \text{ difusores} \cdot \frac{101325 Pa}{1 bar} = 6079,5 Pa$$

El aire es tomado del exterior a presión atmosférica. Por lo tanto, como mínimo el flujo de aire tendrá que entrar al biorreactor a unos 2 bar.

El trabajo del compresor en condiciones isoentrópicas viene dado por la ecuación definida en el apartado 6.3.

$$\dot{W}_1 = P_1 \cdot v_1 \cdot \left(\frac{\gamma}{\gamma - 1}\right) \cdot n \cdot \left[\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma \cdot n}} - 1\right]$$

donde:

- P_1 , presión de entrada (Pa)
- P_2 , presión de salida (Pa)
- v_1 , volumen específico del gas (m^3/kg)
- γ , ratio de la capacidad calorífica ($\gamma = C_p/C_v = 1,4$)
- n , número de etapas del compresor

La presión de entrada será la atmosférica y la presión de salida necesaria por los difusores será:

$$P_2 = P_{atm} + \frac{L_T}{10,33 m} \cdot 101325 Pa + \Delta P_{difusor} + \Delta P_{biorreactor}$$

Quedando definida la presión de salida P_2 como la presión a la profundidad en que se introduce el aire, incluyendo un factor de seguridad correspondiente a la pérdida de carga en las tuberías del sistema. Teniendo en cuenta la presión normal del aire (101325 Pa o 1,033 kg/cm²) correspondiente a una columna de agua de 10,33 m (Ramalho, 1996).

Por lo tanto:

$$P_2 = 101325 \text{ Pa} + \frac{2,826 \text{ m}}{10,33 \text{ m}} \cdot 101325 \text{ Pa} + 6079,5 \text{ Pa} + 27694,22 \text{ Pa} \\ = 162817,84 \text{ Pa}$$

El volumen específico a la presión de entrada a 17 °C es:

$$v_1 = \frac{1}{\rho_{\text{aire}}} = \frac{1}{1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0,833 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Lo que resulta un trabajo de compresión de:

$$W = 101325 \text{ Pa} \cdot 0,833 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \left(\frac{1,4}{1,4 - 1} \right) \cdot \left[\left(\frac{184096 \text{ Pa}}{101325 \text{ Pa}} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} - 1 \right] = 42,89 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Tomando una eficiencia del 80%, la energía suministrada al compresor es:

$$W_{\text{real}} = \frac{42,89 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{0,75} = 57,19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

A continuación, se calcula la potencia necesaria para cumplir con las necesidades de aire que se deben introducir en el biorreactor:

$$\dot{W} = W_{\text{real}} \cdot R_{\text{aire}} \cdot \rho_{\text{aire}} = 57,19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot 7,121 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \cdot 1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cong 2 \text{ kW}$$

La potencia por unidad de volumen entregada por el aire será:

$$\frac{\dot{W}}{V} = \frac{2 \text{ kW}}{7,88 \text{ m}^3} = 0,253 \frac{\text{kW}}{\text{m}^3}$$

Con estos cálculos, quedaría definido el sistema de aireación del biorreactor.

B.3.2. Balance de materia

Siguiendo con el dimensionado del biorreactor en base al tratamiento de fangos activados de una EDAR, se ha realizado en conjunto el balance de materia del biorreactor aerobio y de la etapa de separación, que en este caso será una centrífuga de discos. Donde Q_0 será el caudal de alimentación al

biorreactor, Q_R el caudal de recirculación, Q_E el caudal de agua tratada y Q_W el caudal de la biomasa algal que llegará al secadero en spray.

Además, se supone que en la centrífuga se separa completamente toda la biomasa. Luego $X_E \approx 0$, porque toda la biomasa está compuesta de sólidos en suspensión que sedimentarán. El agua residual de entrada al biorreactor estará libre de microorganismos, luego $X_0 \approx 0$. Las concentraciones de microorganismos en la recirculación y en la purga son iguales $X_W = X_R$.

Se asume que sólo las microalgas son las partículas que sedimentan y que además lo hacen en la centrífuga y no en el reactor. Además, se supone que la materia orgánica (el sustrato), es soluble y por tanto sólo son considerados como sólidos las células. El considerar al sustrato como soluble, implica que la concentración de la materia orgánica en el efluente que abandona el sistema S_E es igual a la corriente de salida del reactor S , y a su vez igual a la concentración de sustrato en los lodos que se forman en la centrífuga S_W . La centrífuga separa la fase sólida (biomasa), de la líquida, pero la concentración de sólidos en las corrientes (que si cambian), no afecta a la concentración de sustrato en la fase líquida. Por tanto: $S \approx S_S \approx S_W$.

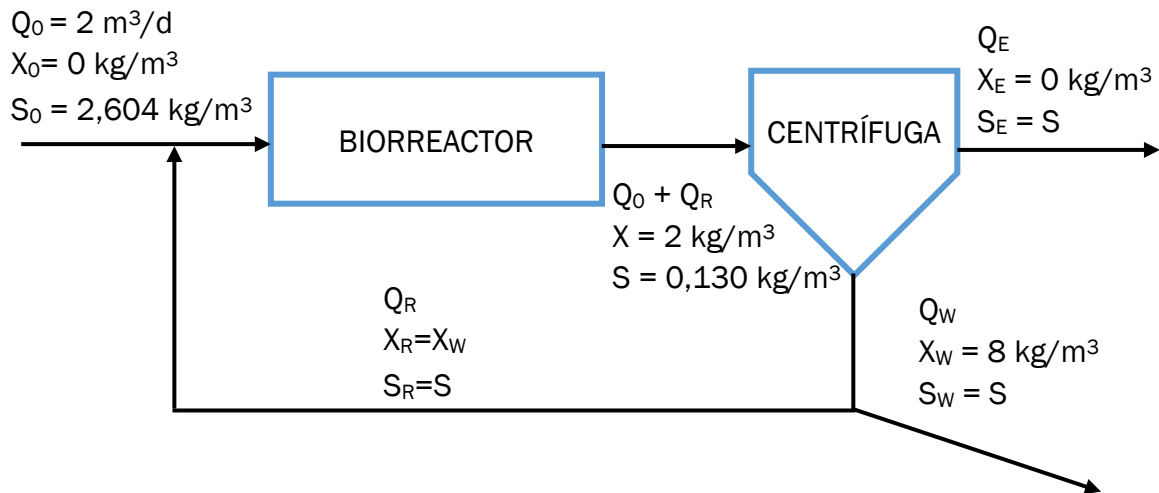


Ilustración 36. Balance de materia del Biorreactor.

La tasa de recirculación se toma de los valores medios de los parámetros en procesos de fangos activados, que para una mezcla completa están entre 0,25 y 1 (Ferrer Polo & Seco Torrecillas, 2007).

$$r = \frac{Q_R}{Q_0} = 0,75 \rightarrow Q_R = 0,75 \cdot 2 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} = 1,5 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}$$

Con los valores reflejados en la Ilustración 36, se pueden determinar el resto de las incógnitas con los correspondientes balances de materia:

Balance de materia global a la biomasa:

Entrada biomasa + Producción biomasa = Salida biomasa

$$Q_0 \cdot X_0 + P_X = Q_E \cdot X_E + Q_W \cdot X_W \rightarrow Q_0 \cdot 0 + P_X = Q_E \cdot 0 + Q_W \cdot X_W$$

$$Q_W \cdot X_W = P_X \rightarrow Q_W = \frac{2,227 \frac{kg}{d}}{8 \frac{kg}{m^3}} = 0,278 \frac{m^3}{d}$$

Balance de materia global:

$$Q_0 = Q_E + Q_W \rightarrow Q_E = 2 \frac{m^3}{d} - 0,278 \frac{m^3}{d} = 1,722 \frac{m^3}{d}$$

B.4. Cálculos para el diseño de la centrífuga

B.4.1. Parámetros de diseño

Estas han sido ecuaciones utilizadas para el cálculo del factor sigma y el caudal máximo:

$$\Sigma = \frac{2\pi}{3} \omega^2 N \tan \theta (r_2^3 - r_1^3)$$

$$Q_{max} = \left[\frac{D_p^2 (\rho_p - \rho)}{18\mu} \right] \cdot \left[\frac{2\pi}{3} \right] \omega^2 N \tan \theta (r_2^3 - r_1^3)$$

Después se ha calculado el factor del efecto de la gravedad:

$$Z = \frac{\omega^2 \cdot r}{g}$$

Mediante el cálculo iterativo se han determinado los parámetros de diseño de la centrífuga de discos. Para esto se ha hecho uso de la herramienta “Solver”, disponible en el programa “Microsoft Office Excel”.

Para el cálculo iterativo con “Solver” se han utilizado los valores medios de la base de cálculo.

Parámetro	Nomenclatura	Rango
Factor de efecto centrífugo	Z	5000 - 15000
Número de discos	N	50 - 200
Angulo de inclinación	θ (°)	35 - 50

Tabla 41. Valores de la base de cálculo para el diseño de la centrífuga de discos

Se ha fijado el valor del caudal máximo como el caudal de alimentación de la centrífuga, calculado en el balance de materia en el punto B.3.2, con un porcentaje de sobredimensionado del 20%:

$$Q_{max} = (Q_0 + Q_R) \cdot 1,2 = (2 + 1,5) \cdot 1,2 = 4,2 \frac{m^3}{d}$$

Los resultados obtenidos mediante el cálculo iterativo se recogen la siguiente Tabla 42, y se detallan también en el apartado 6.4. de diseño de la centrífuga.

Parámetro	Nomenclatura	Valor
Tamaño de partícula	D_p (μm)	5
Caudal máximo	Q_{max} (m^3/d)	4,2
Velocidad angular	ω (rpm)	9454
Número de discos	N	50
Ángulo de inclinación	θ ($^\circ$)	35
Radio interior	r_1 (m)	0,11
Radio exterior	r_2 (m)	0,109
Factor sigma	Σ	19357
Factor de efecto centrífugo	Z	10901,1

Tabla 42. Resultados de los parámetros de diseño de una centrífuga de discos.

B.5. Cálculos para el diseño del secado en espray

B.5.1. Balance de energía

Con el balance de materia de la centrífuga de discos, se podrán conocer los flujos másicos y la composición de la alimentación del secadero en espray. Por lo que la corriente W de salida, será la alimentación del secado en espray.

Se asume que los únicos sólidos presentes en la corriente será la biomasa algal y el resto será agua líquida, por lo que la composición de la alimentación se calcula directamente con la densidad:

$$m = Q \cdot \rho = 0,278 \frac{m^3}{d} \cdot \frac{d}{24 h} \cdot 1000 \frac{kg}{m^3} = 11,57 \frac{kg}{h}$$

$$m_X = Q \cdot X = 0,278 \frac{m^3}{d} \cdot \frac{d}{24 h} \cdot 8 \frac{kg}{m^3} = 0,093 \frac{kg}{h}$$

$$m_{H_2O} = m - m_X = 11,57 \frac{kg}{h} - 0,093 \frac{kg}{h} = 11,477 \frac{kg}{h}$$

El flujo másico de agua será el que se elimina en el secadero mediante la evaporación.

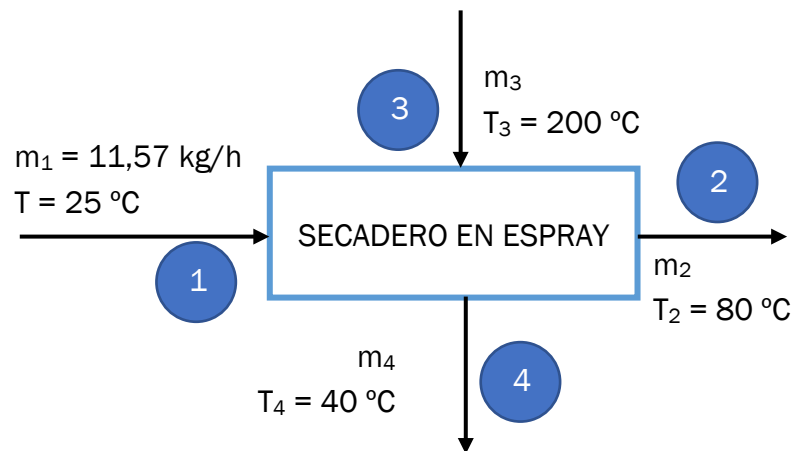


Ilustración 37. Balance de energía del Secadero en Espray

La cantidad de agua a eliminar se aproximará a la totalidad presente en la corriente de entrada (1) y se considera que la humedad presente en la corriente de entrada del aire es despreciable.

La corriente de aire permanecerá constante, por lo que $m_3 = m_4 = m_{aire}$.

Balance de energía:

$$m_{H_2O} \cdot cp_{H_2O} \cdot (T_4 - T_1) + m_{H_2O} \cdot (-\Delta H_v) = m_{aire} \cdot cp_{aire} \cdot (T_3 - T_4)$$

La entalpía de vaporización para el agua y los calores específicos del agua y del aire serán:

$$(-\Delta H_v) = 1940,7 \frac{kJ}{kg}$$

$$cp_{H_2O} = 1,976 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$cp_{aire} = 1,023 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

La cantidad de aire necesario para poder secar el agua presente en la corriente de entrada será:

$$\begin{aligned} 11,477 \frac{kg}{h} \cdot 1,976 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C} \cdot (200 - 25) ^\circ C + 11,477 \frac{kg}{h} \cdot 1940,7 \frac{kJ}{kg} \\ = m_{aire} \cdot 1,023 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C} \cdot (200 - 40) \\ m_{aire} = 98,825 \frac{kg}{h} \end{aligned}$$

Balance de energía del intercambiador:

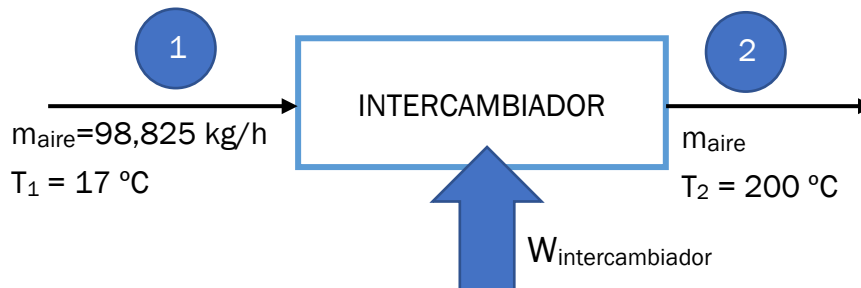


Ilustración 38. Balance de energía del intercambiador eléctrico

$$W_{intercambiador} = m_{aire} \cdot cp_{aire} \cdot (T_1 - T_2)$$

$$W_{intercambiador} = 98,825 \frac{kg}{h} \cdot \frac{1 h}{3600 s} \cdot 1,023 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C} \cdot (200 - 17) ^\circ C = 5,1 kW$$

Con una eficiencia del 90%, el consumo real será:

$$W_{real} = \frac{5,1 kW}{0,9} = 5,7 kW$$

B.5.2. Diseño del compresor para el secadero

Se utilizará un compresor que, siguiendo las especificaciones del fabricante del secadero en spray (GEA), dé una presión a la entrada del secadero de 2 bar. Por lo tanto:

$$P_2 = P_{atm} + \Delta P_{intercambiador} + \Delta P_{secadero}$$

$$P_2 = 101325 \text{ Pa} + 250 \text{ Pa} + 202650 \text{ Pa} = 304225 \text{ Pa}$$

El volumen específico a la presión de entrada a 17 °C es:

$$v_1 = \frac{1}{\rho_{aire}} = \frac{1}{1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0,833 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Lo que resulta un trabajo de compresión de:

$$W = 101325 \text{ Pa} \cdot 0,833 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \left(\frac{1,4}{1,4 - 1} \right) \cdot \left[\left(\frac{304225 \text{ Pa}}{101325 \text{ Pa}} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} - 1 \right] = 109,1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Tomando una eficiencia del 80%, la energía suministrada al compresor es:

$$W_{real} = \frac{109,1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{0,75} = 145,42 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

A continuación, se calcula la potencia necesaria para cumplir con las necesidades de aire que se deben introducir en el biorreactor:

$$\dot{W} = W_{real} \cdot m_{aire} = 145,42 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot 98,825 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \cong 4 \text{ kW}$$

B.6. Cálculos para el diseño de las tuberías

Se detallan los cálculos para la corriente 1 a modo de ejemplo.

Los valores iniciales conocidos son:

Parámetro	Nomenclatura	Valor
Caudal	Q (m ³ /d)	3,33
Velocidad	u (m/s)	2
Densidad agua	ρ (kg/m ³)	1000

Tabla 43. Valores iniciales de la corriente 1.

Diámetro interior de la tubería:

A continuación, se calcula la sección necesaria, para poder obtener el diámetro interior que permita mantener una velocidad de 0,2 m/s.

$$A = \frac{Q}{v} = \frac{3,33 \frac{m^3}{d} \cdot \frac{1 d}{86400 s}}{2 \frac{m}{s}} = 1,3 \cdot 10^{-5} m^2$$

$$d_i = \sqrt{\frac{4 \cdot A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1,3 \cdot 10^{-5} m^2}{\pi}} = 0,004067 m = 4,067 mm$$

Número de Reynolds:

$$Re = \frac{u \cdot \rho \cdot d_i}{\mu} = \frac{2 \frac{m}{s} \cdot 1000 \frac{kg}{m^3} \cdot 0,004067 m}{1 \cdot 10^{-3} \frac{kg}{m \cdot s}} = 8134$$

El régimen será turbulento por ser $Re > 2100$.

Rugosidad relativa:

$$\frac{\varepsilon}{d_i} = \frac{0,046}{4,067} = 0,0113$$

Factor de fricción:

A partir del diagrama de Moody del apartado 6.7, se obtiene:

$$f = 0,0441$$

Caída de presión:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{8 \cdot f \cdot v^2 \cdot \rho}{2 \cdot d_i} = \frac{8 \cdot 0,0441 \cdot 2^2 \cdot 1000}{2 \cdot 4,067 \cdot 10^{-3}} = 128,8 \frac{Pa}{m}$$

Catálogo comercial:

En el catálogo de (Alco, s.f.) se selecciona el diámetro exterior (OD) y el espesor que permitan obtener un diámetro interior como el calculado, si no se puede obtener el valor exacto, se toma el diámetro exterior y el espesor que permitan obtener un diámetro interior inmediatamente superior al calculado anteriormente.

Si el diámetro calculado es diferente del seleccionado del catálogo, se vuelven a calcular el número de Reynolds, la rugosidad relativa y el factor de fricción.

En el catálogo comercial se selecciona:

Nominal Pipe Size	OD		Schedule 5S ¹			Schedule 10S ¹			Schedule 40S			Schedule 80S		
	in	mm	in	mm	kg/m	in	mm	kg/m	in	mm	kg/m	in	mm	kg/m
1/8	0.405	10.3	-	-	-	0.049	1.24	0.28	0.068	1.73	0.37	0.095	2.41	0.47
1/4	0.540	13.7	-	-	-	0.065	1.65	0.49	0.088	2.24	0.63	0.119	3.02	0.80
3/8	0.675	17.1	-	-	-	0.065	1.65	0.63	0.091	2.31	0.84	0.126	3.20	1.10
1/2	0.840	21.3	0.065	1.65	0.80	0.083	2.11	1.00	0.109	2.77	1.27	0.147	3.73	1.62
3/4	1.050	26.7	0.065	1.65	1.03	0.083	2.11	1.28	0.113	2.87	1.69	0.154	3.91	2.20
1	1.315	33.4	0.065	1.65	1.30	0.109	2.77	2.09	0.133	3.38	2.50	0.179	4.55	3.24
1 1/4	1.660	42.2	0.065	1.65	1.65	0.109	2.77	2.70	0.140	3.56	3.39	0.191	4.85	4.47
1 1/2	1.900	48.3	0.065	1.65	1.91	0.109	2.77	3.11	0.145	3.68	4.05	0.200	5.08	5.41
2	2.375	60.3	0.065	1.65	2.40	0.109	2.77	3.93	0.154	3.91	5.44	0.218	5.54	7.48
2 1/2	2.875	73.0	0.083	2.11	3.69	0.120	3.05	5.26	0.203	5.16	8.63	0.276	7.01	11.41
3	3.500	88.9	0.083	2.11	4.51	0.120	3.05	6.45	0.216	5.49	11.29	0.300	7.62	15.27
3 1/2	4.000	101.6	0.083	2.11	5.18	0.120	3.05	7.40	0.226	5.74	13.57	0.318	8.08	18.63
4	4.500	114.3	0.083	2.11	5.84	0.120	3.05	8.36	0.237	6.02	16.07	0.337	8.56	22.32
5	5.563	141.3	0.109	2.77	9.47	0.134	3.40	11.57	0.258	6.55	21.77	0.375	9.53	30.97
6	6.625	168.3	0.109	2.77	11.32	0.134	3.40	13.84	0.280	7.11	28.26	0.432	10.97	42.56
8	8.625	219.1	0.109	2.77	14.79	0.148	3.76	19.96	0.322	8.18	42.55	0.500	12.70	64.64
10	10.750	273.1	0.134	3.40	22.63	0.165	4.19	27.78	0.365	9.27	60.31	0.500 ²	12.70 ²	96.01 ²
12	12.750	323.9	0.156	3.96	31.25	0.180	4.57	36.00	0.375 ²	9.53 ²	73.88 ²	0.500 ²	12.70 ²	132.08 ²
14	14.000	355.6	0.156	3.96	34.36	0.188 ²	4.78 ²	41.30 ²	-	-	-	-	-	-
16	16.000	406.4	0.165	4.19	41.56	0.188 ²	4.78 ²	47.29 ²	-	-	-	-	-	-
18	18.000	457	0.165	4.19	46.81	0.188 ²	4.78 ²	53.26 ²	-	-	-	-	-	-
20	20.000	508	0.188	4.78	59.25	0.218 ²	5.54 ²	68.61 ²	-	-	-	-	-	-
22	22.000	559	0.188	4.78	65.24	0.218 ²	5.54 ²	75.53 ²	-	-	-	-	-	-
24	24.000	610	0.218	5.54	82.47	0.250	6.35	94.45	-	-	-	-	-	-
30	30.000	762	0.250	6.35	118.31	0.312	7.92	147.36	-	-	-	-	-	-

Ilustración 39. Catálogo Aalco de tuberías de acero inoxidable (Alco, s.f.)

En rojo se han marcado sobre el catálogo (Alco, s.f.) el diámetro exterior y el espesor necesarios.

$$OD = 10,3 \text{ mm}$$

$$\text{espesor} = 3,116 \text{ mm}$$

$$d_i = OD - 2 \cdot \text{espesor} = 10,3 - 3,116 \cdot 2 = 5,48 \text{ mm}$$

Como se puede observar el diámetro interior ha cambiado por lo que el Reynolds, la rugosidad relativa y el factor de forma son diferentes.

$$Re = 10960$$

Seguimos en régimen turbulento.

$$\frac{\varepsilon}{d_i} = \frac{0,046}{5,48} = 0,0084$$

$$f = 0,0411$$

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{8 \cdot f \cdot v^2 \cdot \rho}{2 \cdot d_i} = \frac{8 \cdot 0,0411 \cdot 2^2 \cdot 1000}{2 \cdot 5,48 \cdot 10^{-3}} = 120 \frac{Pa}{m}$$

Los valores prácticamente no han cambiado, pero conviene comprobarlo para evitar errores.

B.7. Cálculos para el diseño de las bombas

Se detallan los cálculos para la bomba P-101 a modo de ejemplo.

Los valores iniciales y supuestos son:

Parámetro	Nomenclatura	Valor
Caudal	Q (m ³ /d)	2,694
Velocidad	u (m/s)	2
Longitud tubería	L (m)	15
Presión tanque	P ₁ (Pa)	101325
Presión Filtración	P ₂ (Pa)	162120
Altura inicial	z ₁ (m)	2,3
Altura Final	z ₂ (m)	2,7
Presión vapor	P ⁰ (Pa)	1705,74
Rendimiento bomba	η _{bomba}	0,75

Tabla 44. Parámetros iniciales del diseño de la bomba P-101

El caudal ha sido sobredimensionado en un 20% sobre el calculado anteriormente en el Anexo B.2.2.

Perdidas debidas a la fricción:

$$\Delta P_f = \frac{\Delta P}{L} \cdot L + \frac{v^2}{2} \cdot \rho \cdot \sum K$$

$$\Delta P_f = 120 \frac{Pa}{m} \cdot 15 m + \frac{\left(2 \frac{m}{s}\right)^2}{2} \cdot 1000 \frac{kg}{m^3} \cdot (0,5 + 6 \cdot 2 + 1 + 0,7 \cdot 2 + 1)$$

$$\Delta P_f = 33600 Pa$$

Energía necesaria:

$$W = 9,8 \frac{m}{s^2} \cdot 0,41 m + \frac{60795 Pa}{1000 \frac{kg}{m^3}} - \frac{33600 Pa}{1000 \frac{kg}{m^3}} = 98,4 \frac{J}{kg}$$

Potencia consumida por la bomba:

$$W_{bomba} = \frac{W \cdot \dot{m}}{\eta_{bomba}} = \frac{98,4 \frac{J}{kg} \cdot 93,54 \frac{kg}{h} \cdot \frac{1 h}{3600 s}}{0,75} = 3,41 W$$

NPSH:

Se debe cumplir la siguiente condición para que no haya cavitación:

$$NPSH_{disponible} > NPSH_{requerido}$$

Por lo que

$$NPSH_{disponible} = \frac{22540 Pa}{1000 \frac{kg}{m^3}} + 2,5 m - \frac{19600 Pa}{1000 \frac{kg}{m^3}} - \frac{1705,74 Pa}{1000 \frac{kg}{m^3}}$$

$$NPSH_{requerido} = 1,8 \cdot Q^{0,18} = 1,8 \cdot \left(0,000031 \frac{m^3}{s} \right)^{0,18} = 1,394 \cdot 10^{-8} m$$

Por lo tanto, la bomba no cavitará.