



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERIA (ICAI)

GRADO EN INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA

MODELO DE SIMULACIÓN Y CONTROL DE UN PROCESO DE FANGOS ACTIVOS

Autor: Aitor Barrena Arzamendi

Directores: María del Mar Clereda Castro, Carlos Morales Polo

Madrid

Mayo 2015



Proyecto realizado por el alumno/a:

Aitor Barrena Arzamendi

Fdo.: 

Fecha: 29 / 5 / 2015

Autorizada la entrega del proyecto cuya información no es de carácter
confidencial

LOS DIRECTORES DEL PROYECTO

María del Mar Cledera Castro y Carlos Morales Polo

Fdo.:  

Fecha: 29 / 5 / 2015

Vº Bº del Coordinador de Proyectos

Fernando de Cuadra García

Fdo.:

Fecha: / /



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

INGENIERO ELECTROMECÁNICO



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERIA (ICAI)

GRADO EN INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA

MODELO DE SIMULACIÓN Y CONTROL DE UN PROCESO DE FANGOS ACTIVOS

Autor: Aitor Barrena Arzamendi

Directores: María del Mar Clereda Castro, Carlos Morales Polo

Madrid

Mayo 2015



RESUMEN DEL PROYECTO

En los últimos tiempos debido a la industrialización y al creciente desarrollo de la actividad humana ha provocado un aumento en la contaminación de las aguas. Al comienzo de esta etapa las aguas eran capaces de estabilizarse naturalmente ya que el grado de contaminación no era muy grande, sin embargo, a medida que pasan los años los vertidos y contaminantes son más complejos y en mayores cantidades y es por ello porque en la actualidad es imprescindible un saneamiento y tratamiento de nuestras aguas.

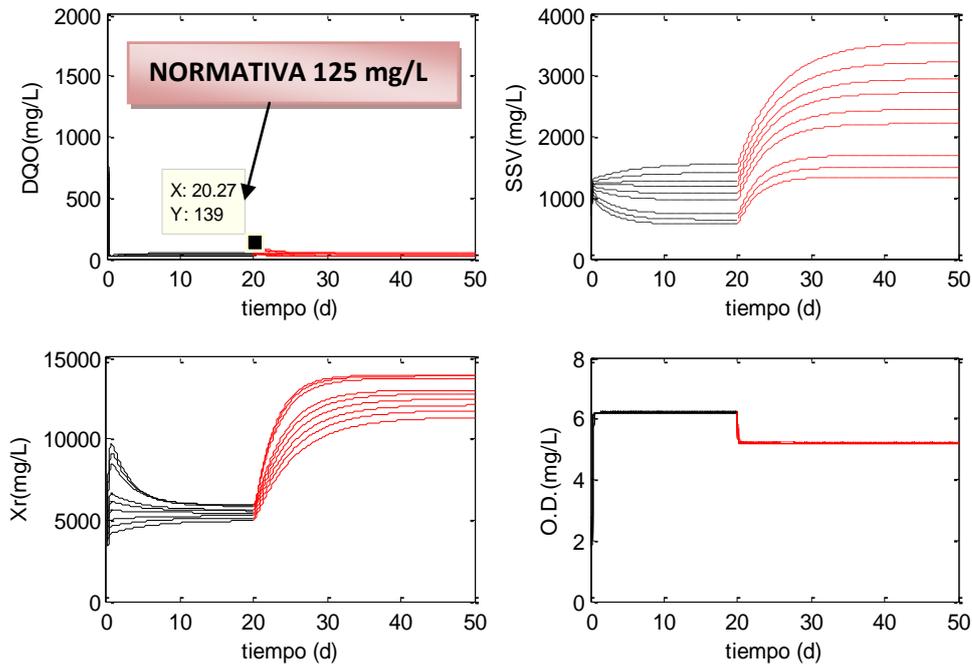
En este proyecto se estudiará el control de un tratamiento biológico de fangos activos. En toda depuradora hay dos tipos de líneas, la de aguas y la de fangos. En la línea de aguas se producen diferentes tratamientos, en primer lugar un pre-tratamiento dónde se eliminan los sólidos mayores, después el tratamiento primario que consiste en un proceso de clarificación, sedimentación y decantación. Por último se encuentra el tratamiento secundario, en el que se centra este proyecto, dónde se intenta disminuir hasta los valores establecidos por la Unión Europea la demanda bioquímica de oxígeno ($DBO < 125 \text{ mg/L}$).

Con la finalidad de controlar una planta de lodos activados, es necesario prever el comportamiento de los fangos al cambiarles las condiciones de funcionamiento. Para ello, es preciso realizar simulaciones y un balance de masa dinámico en el sistema sobre los diferentes parámetros a medir. Los parámetros relevantes para este estudio son la DBO y el Oxígeno Disuelto (OD), sobre los que se realizan los controles posteriores. Las ecuaciones que han permitido este control han sido respectivamente:

$$1) \frac{dS}{dt} = \frac{Qf}{V} S_f - \frac{Qo}{V} S - \mu \frac{X}{Y}$$

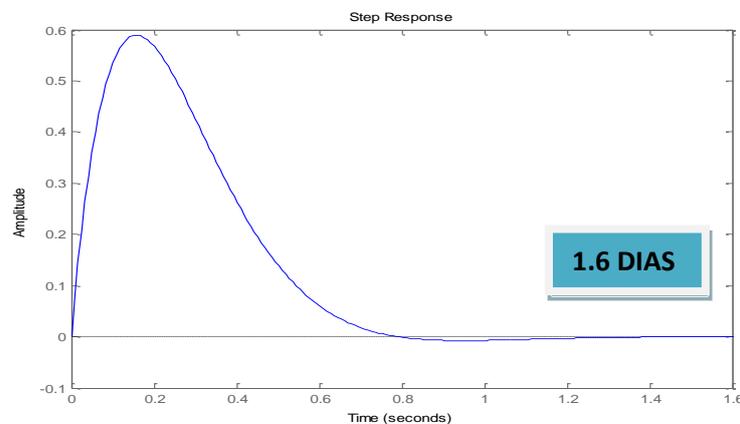
$$2) \frac{dCO_2}{dt} = \frac{Qf}{V} CO_{2f} - \frac{Qo}{V} CO_2 - \mu \frac{X}{Y_{O_2}} - bX + kla_w(C_{Sr} - CO_2)$$

Una vez realizadas las simulaciones se concluye que cuando se trabaja con caudales variables en el sistema se producen picos de caudal dando lugar a grandes variaciones que hay que controlar con el objetivo de alcanzar el régimen permanente lo antes posible siempre por debajo del límite establecido por la UE.



El siguiente paso consiste en obtener las plantas de ambos casos, el de la DBO y el de la OD, partiendo de las ecuaciones anteriores. Una vez obtenidas el proceso se basa en simular con diferentes controles hasta alcanzar el que llega al régimen permanente en menor tiempo. Se estudia en primer lugar la respuesta en frecuencia del sistema con un control proporcional (P), comprobando que se cumplen las especificaciones recomendadas en el diseño de controles.

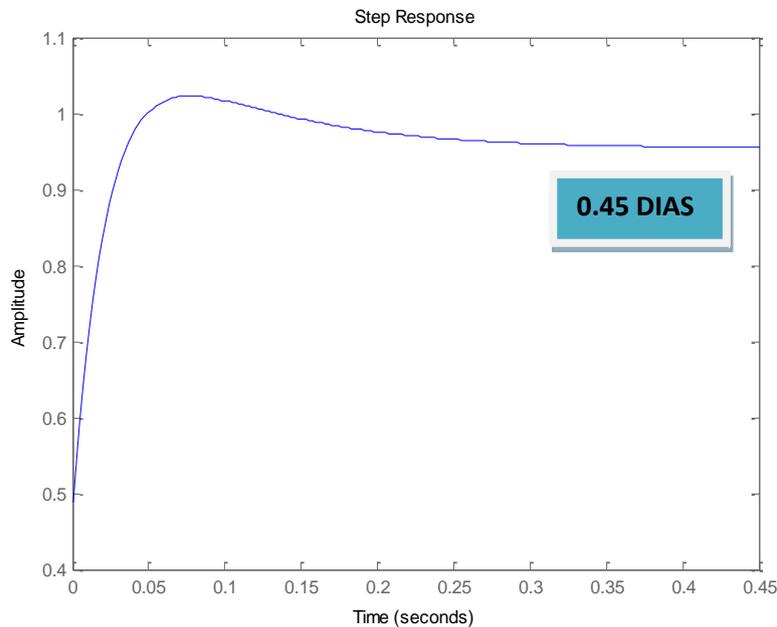
A continuación se estudia la respuesta temporal de ambos sistemas. En el caso de la DBO se alcanza el régimen permanente a los 1.6 días.





Se necesita un sistema más rápido y sin error, viendo la respuesta temporal se deduce que el error no es relevante ya que es mínimo con un control proporcional que es el que proporciona mayor error. En cuanto a la rapidez los más rápidos son o el control proporcional diferencial (PD) o el control proporcional integral diferencial (PID), la diferencia entre ambos es que el PID elimina el error con la parte integral mientras que el PD tiene error. Como en nuestro caso el error es irrelevante se probarán ambos hasta obtener el control más rápido.

Finalmente el mejor control resulta ser el PID con unos valores de $D=0.1$ e $I=0.01$ dando lugar a la siguiente respuesta temporal para el caso de la DBO.



Siendo el control final:

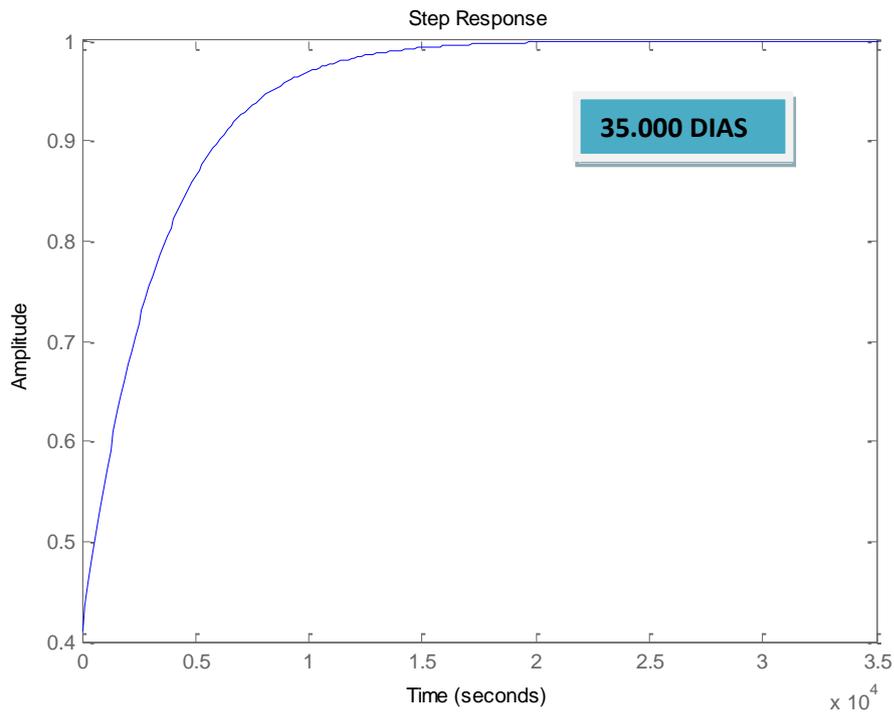
$$C(s) = (0.1s + 1) * \frac{(0.01s + 1)}{0.01s}$$

Para el caso del O.D. se necesita utilizar una simplificación de la ecuación diferencial 2) para conseguir la linealidad necesaria para el control. Esta simplificación es la ecuación de Eckenfelder and McCarty:

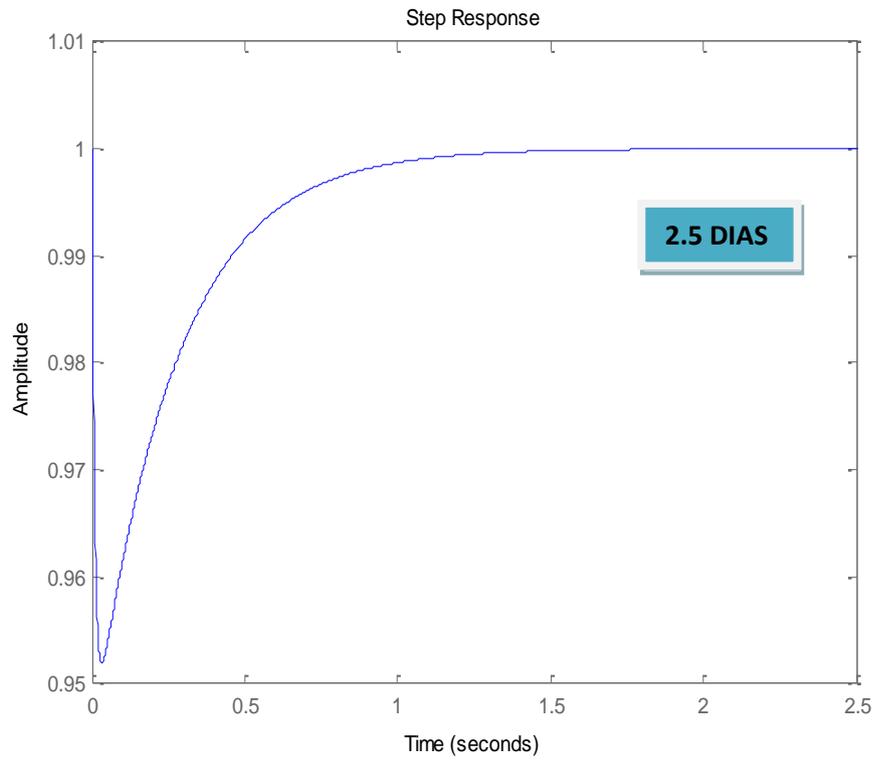


$$\frac{dO_2}{dt} = a \cdot D_0 \cdot \frac{Q_r}{Q_f} + b \cdot X \cdot \frac{dQ_r}{dt}$$

Con esta ecuación y siguiendo el mismo proceso que con el control de la DQO se obtiene que la respuesta temporal del sistema se alcanza en 35.000 días, un valor muy grande.



Se necesita un control mucho más rápido. El control PD no consigue disminuir lo suficiente este tiempo, llegando a valores en torno a 20.000 días. Finalmente, igual que en el caso de la DQO, el mejor control es el PID consiguiendo un tiempo de régimen permanente de 2.5 días con unos valores de **D=0.25** e **I=0.01**.



Siendo el control final:

$$C(s) = 0.0125 * \frac{(1 + 0.25s) * (1 + 0.01s)}{0.01s}$$



ABSTRACT

Nowadays, due to the industrialization and the development of human activity, water pollution has increased. At the beginning, water was capable to be stabilized naturally as the degree of contamination was not high, however, as time passes, discharges and pollutants become more complex and in higher quantities. That is why nowadays water treatment is needed.

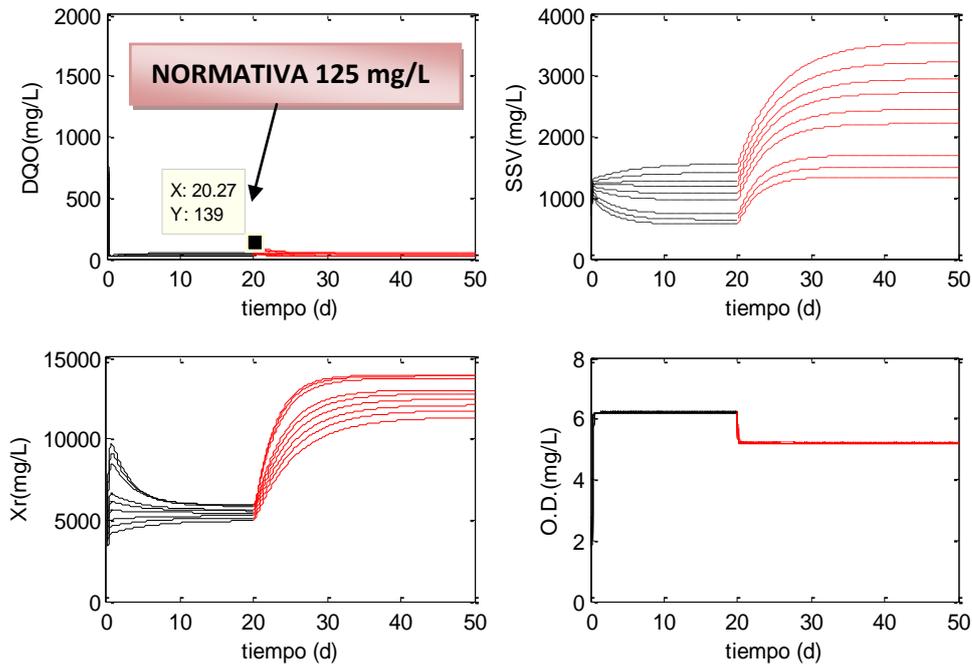
In this project the control of an activated sludge biological treatment will be studied. In all waste water treatment plants (WWTP), two different lines co-exist, the water and sludge lines. In water line different treatments are produced: First of all a pre-treatment, where the largest solids are removed, followed by the primary treatment a clarification, settling and decanting process. Finally there is a secondary treatment or biological treatment, in which this project is based on. This treatment is in charge of reducing the BOD (Biological Oxygen Demand) value below the limit set by the European Union (BOD<25 mg / L).

In order to control an activated sludge plant, it is necessary to predict the behaviour of the sludge when the operating conditions change. In order to achieve this, simulations and dynamic mass balance systems on the different parameters measured are required. The relevant parameters for this project are BOD and Dissolved Oxygen (DO), on which subsequent controls are performed. The equations that allowed this control were respectively:

$$1) \frac{dS}{dt} = \frac{Qf}{V} Sf - \frac{Qo}{V} S - \mu \frac{X}{Y}$$

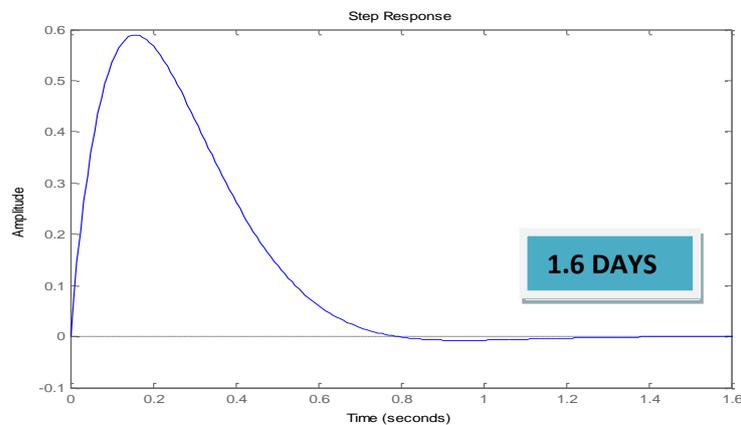
$$2) \frac{dCo_2}{dt} = \frac{Qf}{V} Co_{2f} - \frac{Qo}{V} Co_2 - \mu \frac{X}{Y_{O_2}} - bX + kla_w(C_{sr} - Co_2)$$

Once these simulations are completed, the main conclusion is that all parameters depend on water flows. Large variations of flows (entrance, recirculation...) must be controlled in order to set constant discharge values, the steady state and always below the limited established by the EU.



The next step is to obtain the plants of both parameters, the BOD and OD, based on equations [1] and [2]. Once obtained, the next step is to simulate different controls to achieve the one which reaches the steady state in less time. First the frequency response of the system with a proportional control (P) is studied, ensuring that the recommended controls design specifications are met.

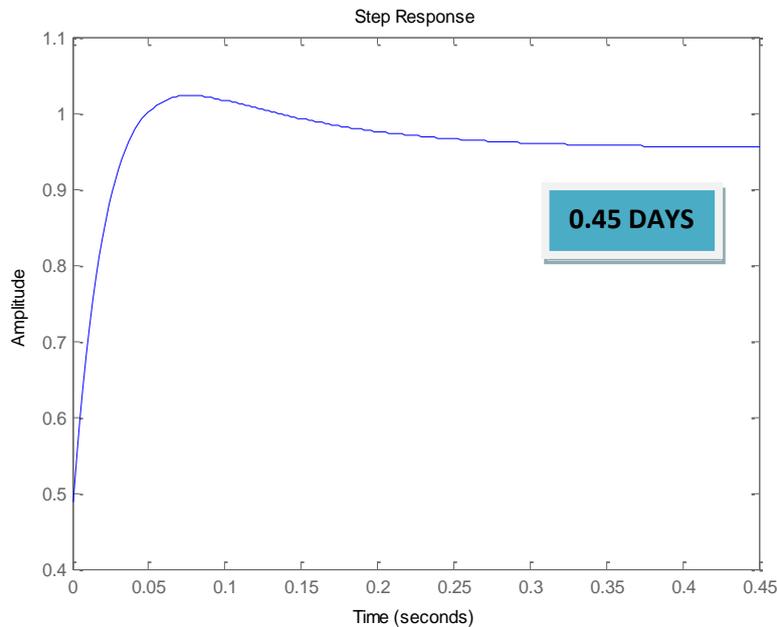
Then the temporal response of both systems is studied. In the case of the BOD the steady state is reached at 1.6 days.





A faster and non-error system is needed. Time response shows that the error is not relevant because is minimum in a proportional control (The control with the highest error). About the speed, proportional derivative control (PD) and proportional integral derivative control (PID) are the faster ones, the difference between them is that the PID error is eliminated by the integral part while the PD has error. As in our case the error is irrelevant both be tested to obtain the fastest control.

Finally the best control is the PID with values of $D = 0.1$ and $I = 0.01$ giving rise to the following temporal response in the case of the BOD.



The final control is:

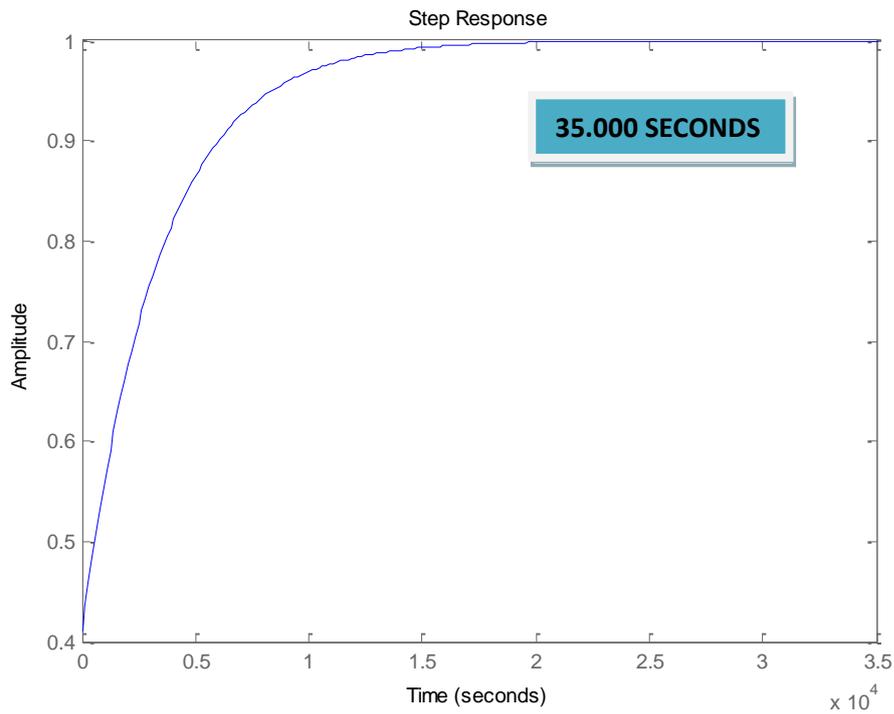
$$C(s) = (0.1s + 1) * \frac{(0.01s + 1)}{0.01s}$$

In order to study the D.O. control, a simplification of the differential equation is needed. Eckenfelder and McCarty equation is the best option to ensure a linear system:

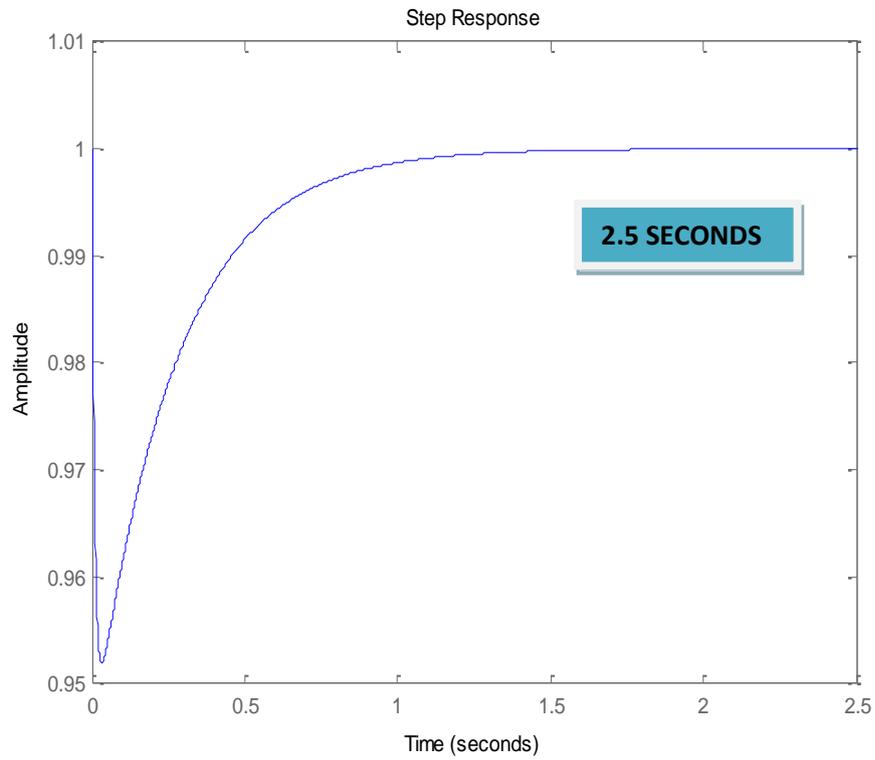


$$\frac{dO_2}{dt} = a \cdot D_0 \cdot \frac{Q_r}{Q_f} + b \cdot X \cdot \frac{dQ_r}{dt}$$

Following the same process, it is demonstrated that the steady state period is reached in 35.000 days, so a control to reduce this time is needed.



A faster control, compared with the BOD one, is needed. PD is not capable of reducing that time (Only 20.000 days mark is achieved). Due to this, the best option is to implementate a PDI control, that reaches the steady state period in 2.5 days, with the parameter values **D=0.25** and **I=0.01**.



The final control is:

$$C(s) = 0.0125 * \frac{(1 + 0.25s) * (1 + 0.01s)}{0.01s}$$



ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	24
1.1 Historia del agua.....	24
1.1.1 Origen	24
1.1.2 Tipos de agua.....	26
1.1.3 Composición del agua	29
1.1.4 Propiedades físicas del agua	30
1.1.5 Propiedades químicas del agua.....	32
1.2 Industrialización y contaminación.....	33
1.2.1 Origen natural	33
1.2.2 Origen antropogénico	34
1.3 Soluciones	37
1.3.1 Tratamiento de aguas para consumo humano	37
1.3.2 Tratamientos de agua residuales urbanas	40
1.3.3 Tratamiento de aguas para la industria y de vertidos industriales.....	42
2. ESTADO DEL ARTE	43
2.1 Pozo de grueso	44
2.2 Desbaste.....	45
2.3 Tamizado	46
2.4 Desarenado-Desengrasado	46
2.5 Balsa de homogeneización.....	47
2.6 Decantadores. Primario y Secundario.....	48
2.7 Decantación mejorada químicamente: Coagulación, Flocculación, Decantación (CFD) 49	
2.8 Tratamiento biológico por filtros biológicos o lechos bacterianos	50
2.9 Tratamiento biológico por biodiscos.....	51
2.10 Lagunaje	52
2.11 Lechos de turba	53
2.12 Humedales artificiales	53
2.13 Eliminación de nitrógeno por Nitrificación-Desnitrificación en el biológico.....	54
2.14 Filtración en medio granular (Arena/Antracita/Granate).....	55



2.15	Adsorción sobre Carbón Activo.....	56
2.16	Intercambio Iónico	56
2.17	Desinfección por cloración.....	57
2.18	Desinfección por dióxido de cloro.....	58
2.19	Desinfección por cloraminas	58
2.20	Desinfección por ozono.....	58
2.21	Desinfección por radiación ultravioleta	58
2.22	Espesamiento de lodos por gravedad.....	59
2.23	Espesamiento de lodos por flotación.....	60
2.24	Estabilización química de lodos.....	60
2.25	Digestión aerobia de lodos.....	61
2.26	Digestión anaerobia de lodos.....	61
2.27	Filtros de bandas	62
2.28	Filtros prensa.....	62
2.29	Centrífugas	63
2.30	Eras de secado.....	63
4.	SIMULACIONES.....	69
4.1	Esquema.....	69
4.2	Variables de influencia	70
4.3	Ecuaciones.....	70
4.4	Caudales fijos.....	72
4.5	Caudales variables.....	80
5.	CONCLUSIONES	87
6.	CONTROLES	88
6.1	Control DQO	88
6.2	Control O.D.....	100
7.	REFERENCIAS.....	110

**ÍNDICE DE FIGURAS**

Figura 1. Distribución del agua en la Tierra.....	29
Figura 2. Variación de la densidad del agua en torno a la temperatura de congelación.....	31
Figura 3. Estructura molecular del agua.	32
Figura 4. Vertido de petróleo en Galicia (España) en 2002.....	36
Figura 5 Esquema de una planta potabilizadora de aguas subterráneas y superficiales.....	38
Figura 6. Proceso de cal-soda.....	39
Figura 7. Composición de las aguas residuales urbanas.	40
Figura 8. Tratamiento primario, secundario y terciario de las aguas residuales urbanas.	42
Figura 9. Diagrama de flujos general para el tratamiento de un agua industrial.	43
Figura 10. Pozo de gruesos.....	45
Figura 11. Proceso y rejas de desbaste	45
Figura 12. Tamizado	46
Figura 13. Desengrasado	47
Figura 14. Balsa de homogeneización.....	47
Figura 15. Decantador primario	48
Figura 16. Decantador secundario	49
Figura 17. Coagulación, floculación y decantación (CFD)	50
Figura 18. Tratamiento biológico por filtros biológicos o lechos bacterianos	51
Figura 19. Tratamiento biológico por biodiscos.....	51
Figura 20. Lagunaje	52
Figura 21. Lechos de turba	53
Figura 22. Humedades artificiales.....	54
Figura 23. Eliminación de nitrógeno por Nitrificación-Desnitrificación	55
Figura 24. Filtración en medio granular	55
Figura 25. Columnas de adsorción sobre carbón activo	56
Figura 26. Intercambio iónico con resinas	57
Figura 27. Arqueta para la desinfección por cloración	57
Figura 28. Desinfección por radiación ultravioleta	59
Figura 29. Espesamiento de lodos por gravedad	59
Figura 30. Espesamiento de lodos por flotación.....	60
Figura 31. Estabilización química de lodos por adición de productos químicos.....	60
Figura 32. Digestión aerobia de lodos.....	61
Figura 33. Digestión anaerobia de lodos.....	61
Figura 34. Filtros de bandas	62
Figura 35. Filtros de bandas	62
Figura 36. Eras de secado.....	63
Figura 37. Proceso de fangos activos.	65
Figura 38. Esquema de reacciones en proceso de digestión anaerobia.	66
Figura 39. Digestor primario y secundario de la digestión anaerobia de fangos.....	67



Figura 40. Esquema de una espesadora de gravedad..... 68

Figura 41. Código de datos para las simulaciones. 72

Figura 42. Código Simulación 1 74

Figura 43. Gráficas de la Simulación 1..... 75

Figura 44. Código de la Simulación 2 76

Figura 45. Gráficas de la Simulación 2..... 77

Figura 46. Código de la Simulación 3 78

Figura 47. Gráficas de la Simulación 3..... 79

Figura 48. Código de la Simulación 1 80

Figura 49. Gráficas de la Simulación 1..... 81

Figura 50. Código de la Simulación 2 82

Figura 51. Gráficas de la Simulación 2..... 83

Figura 52. Código de la Simulación 3 83

Figura 53. Gráficas de la Simulación 3..... 84

Figura 54. Código de la Simulación 4 85

Figura 55. Gráficas de la Simulación 4..... 86

Figura 56. Diagrama Nichols del Control DQO 89

Figura 57. Diagrama Nichols con K=100..... 90

Figura 58. Respuesta temporal con control P 92

Figura 59. Respuesta temporal con control PD y D=1000 93

Figura 60. Respuesta temporal con control PD y D=100..... 93

Figura 61. Respuesta temporal con control PD y D=50..... 94

Figura 62. Respuesta temporal con control PD y D=1..... 94

Figura 63. Respuesta temporal con control PD y D=0.1..... 95

Figura 64. Respuesta temporal con control PID y D=100 e I=100..... 96

Figura 65. Respuesta temporal con control PID y D=100 e I=1..... 96

Figura 66. Respuesta temporal con control PID y D=1 e I=100..... 97

Figura 67. Respuesta temporal con control PID y D=1 e I=1..... 97

Figura 68. Respuesta temporal con control PID y D=0.25 e I=0.1..... 98

Figura 69. Respuesta temporal con control PID y D=0.1 e I=0.01..... 98

Figura 70. Sobrepasso del sistema con control PID..... 99

Figura 71. Diagrama Nichols para el control OD 101

Figura 72. Diagrama de Nichols con K=0.0125..... 101

Figura 73. Respuesta temporal del sistema con control P 102

Figura 74. Respuesta temporal con control PD y D=1000 103

Figura 75. Respuesta temporal con control PD y D=100..... 103

Figura 76. Respuesta temporal con control PD y D=50..... 104

Figura 77. Respuesta temporal con control PD y D=1..... 104

Figura 78. Respuesta temporal con control PD y D=0.1..... 105

Figura 79. Respuesta temporal con control PID con D=100 e I=100..... 106

Figura 80. Respuesta temporal con control PID con D=100 e I=1..... 106

Figura 81. Respuesta temporal con control PID con D=1 e I=100..... 107

Figura 82. Respuesta temporal con control PID con D=1 e I=1..... 107



Figura 83. Respuesta temporal con control PID con $D=0.5$ e $I=0.02$ 108
Figura 84. Respuesta temporal con control PID con $D=0.25$ e $I=0.01$ 109



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades físicas del agua.....	30
Tabla 2. Principales contaminantes según el tipo de industria.....	35
Tabla 3. Intervalo de parámetros representativos de las aguas residuales urbanas.....	41
Tabla 4. Variables de influencia.	70
Tabla 5. Valores de los caudales fijos.....	73



1. INTRODUCCIÓN

1.1 Historia del agua

1.1.1 Origen

El agua es un elemento esencial para la vida. Para conocer si siempre hubo agua en el Planeta Tierra es necesario establecer un punto de referencia, si se escoge la historia humana para ello la respuesta es sí. Incluso se afirma la presencia del agua desde hace unos 3.900 millones de años (m.a.) por la aparición de restos de algas de origen acuático y sedimentos de esa edad formados por la acción del agua. Sin embargo, ¿dónde se encontraba el agua entre los 4.500 m.a. cuando comienza a formarse la Tierra y los 3.900 m.a. época en la que se tienen los primeros indicios de su existencia?

Teniendo en cuenta que la estructura interna de la Tierra, formada por corteza, manto y núcleo, es el resultado de un proceso de diferenciación gravitatoria por diferencia de densidades y que los impactos produjeron un incremento calórico, se produjo la fusión parcial y posibilitaron la separación de estas capas. Junto a las capas internas también se empezó a formar una capa externa llamada atmósfera formada por los gases expulsados hacia el exterior en un proceso llamado desgasificación. Casi al mismo tiempo en que se formaba la atmósfera primitiva empezaba a solidificarse la capa más externa del Planeta creando de este modo la primera corteza terrestre. Se estima que entre el 80% y 85% de los gases de la atmósfera fueron expulsados en forma precoz y muy intensa durante los primeros 100 millones de años y luego se siguieron acumulando otros en forma lenta pero continua durante los 4.400 millones de años posteriores.

La atmósfera primitiva estaba formada principalmente por dióxido de carbono, vapor de agua, nitrógeno y cantidades en menor cantidad de metano, amoníaco, dióxido de azufre y ácido clorhídrico. Carecía de oxígeno a diferencia de la actual.

Debido a altas temperaturas en las fases iniciales de la formación de la Tierra el agua habría estado en forma de vapor de agua, las moléculas situadas en la parte más alejada de la atmósfera se dividían en sus átomos



fundamentales debido a las radiaciones ultravioleta incidentes procedentes del Sol liberando átomos de hidrógeno que se dispersaban por el espacio.

Sin embargo este proceso no fue muy prolongado ya que la formación de la corteza terrestre creó una superficie aislante que mantuvo la temperatura de la superficie alrededor de los 50 ° C, temperatura en la que el agua se encuentra en estado líquido. Este hecho permitió que en la Tierra se conservara el agua desde el origen de la atmósfera primitiva: el vapor de agua que aún se conservaba en los estratos inferiores de la atmósfera, al descender la temperatura superficial, comenzó a condensarse y a precipitar en forma de agua líquida acumulándose sobre la superficie terrestre formando un protoocéano más cálido que el actual, a partir del cual se desarrolló el primer ciclo del agua formando tempranamente procesos sedimentarios en medios acuosos y posteriormente las condiciones propicias para el desarrollo de las primeras formas de vida. De esta forma se explica el origen del agua líquida a partir de la condensación del vapor de agua atmosférico durante la desgasificación, pero ¿qué ocurría antes de esto?

Al estudiar la composición de los meteoritos y de muchas rocas ígneas, tanto aquellas formadas por el enfriamiento del magma en profundidad como por el enfriamiento de la lava de la superficie, muestran la presencia de agua en ellas entre un 0,5% y 5% de su peso. Esta agua se encontraba en estado líquido (formando las denominadas inclusiones fluidas) o bien formando parte de la composición química de algunos minerales, en estos casos no está en forma de agua líquida sino en forma de hidroxilos (OH⁻). La unión de los hidroxilos forma agua en estado gaseoso que, por su baja densidad, asciende hacia la atmósfera.

Otra posible explicación tiene origen extraterrestre, es decir, el agua aportada por cometas que impactaron en las fases iniciales de la creación planetaria.

En conclusión se puede afirmar que el agua siempre estuvo presente en nuestro Planeta porque formaba parte del Universo a los 4.600 m.a. en que consideramos el origen del planeta.



1.1.2 Tipos de agua

Existen numerosos y diferentes tipos de agua según su composición, propiedades, uso y forma de hallarse que se muestran a continuación:

- **Agua Potable.** El agua consumida por las personas y animales sin ocasionar riesgo de contraer ningún tipo de enfermedad.
- **Agua salada.** Agua en la que la concentración de sales es alta (más de 10.000 mg/L).
- **Agua salobre.** Agua que contiene una concentración de sales menor que la marina, comprendido entre 1000 – 10.000 mg/L.
- **Agua dulce.** Agua natural con una baja concentración de sales, o generalmente considerada adecuada, previo tratamiento, para producir agua potable.
- **Agua dura.** Agua con gran contenido de iones positivos. La dureza está determinada por el número de átomos de calcio y magnesio presentes en ella.
- **Agua blanda.** Agua sin dureza significativa.
- **Agua negras.** Agua de abastecimiento de una comunidad después de haber sido contaminada por alguno de sus usos. Puede ser una combinación de residuos, líquidos o en suspensión, de tipo doméstico, municipal e industrial, juntos con las aguas subterráneas y de lluvia que puedan estar presentes.
- **Agua grises.** Agua domésticas residuales compuestas por agua de lavar procedente de la cocina, cuarto de baño, aguas de los fregaderos y lavadoras.



- **Aguas residuales.** Agua de un sistema de alcantarillado que contiene materia orgánica disuelta o suspendida.
- **Agua bruta.** Agua sin sufrir ningún tipo de tratamiento o que entra en una planta para su posterior tratamiento.
- **Aguas muertas.** Aguas con déficit de oxígeno.
- **Agua alcalina.** Agua con un pH superior a 7.
- **Agua capilar.** Agua que se encuentra en el suelo por encima del nivel freático debido a la capilaridad.
- **Agua de desborde.** Agua que se inyecta a través de una fisura en una capa de hielo.
- **Agua de formación.** Agua que es retenida en los intersticios de una roca sedimentaria en la época en que ésta se formó.
- **Agua de gravedad.** Agua en la zona no saturada que se mueve por la fuerza de la gravedad.
- **Agua de suelo.** Agua situada en la zona superior del suelo o en la zona de aireación cerca de la superficie, de forma que puede ser cedida a la atmósfera a través de la evapotranspiración.
- **Agua disfórica.** Agua pobre en nutrientes y que contiene altas concentraciones de ácido húmico.
- **Agua estancada.** Agua inmóvil en determinadas zonas de un río, lago, estanque o acuífero.
- **Agua fósil.** Agua infiltrada en un acuífero durante una época antigua geológica bajo condiciones morfológicas y climáticas diferentes a las actuales y almacenada desde entonces.
- **Agua freática.** Agua subterránea en la zona de saturación y que tiene una superficie libre.



- **Agua funicular.** Agua presente en los poros mayores que rodea las partículas del suelo formando, en los puntos de contacto con dichas partículas, anillos que se fusionan entre ellos.
- **Agua primitiva.** Agua que proviene del interior de la Tierra que ha existido antes en forma de agua atmosférica o superficial.
- **Agua magmática.** Agua impulsada hasta la superficie terrestre desde una gran profundidad por el movimiento ascendente de rocas ígneas intrusivas.
- **Agua metamórfica.** Agua expulsada de las rocas durante el proceso de metamorfismo.
- **Agua subterránea.** Agua que se encuentra en la zona saturada del suelo, zona formada principalmente por agua. Se mueve lentamente desde lugares con alta elevación y presión hacia lugares de contrarias propiedades como los ríos y lagos.
- **Agua superficial.** Agua natural abierta a la atmósfera, como la de los ríos, lagos, charcas, reservorios, corrientes, océanos, mares, estuarios y humedales.

El agua de la Tierra se clasifica principalmente en agua dulce (3%) y agua salada (97%) y dentro del agua dulce se encuentra todos los tipos vistos anteriormente. Se resume este hecho mediante la Figura 1.

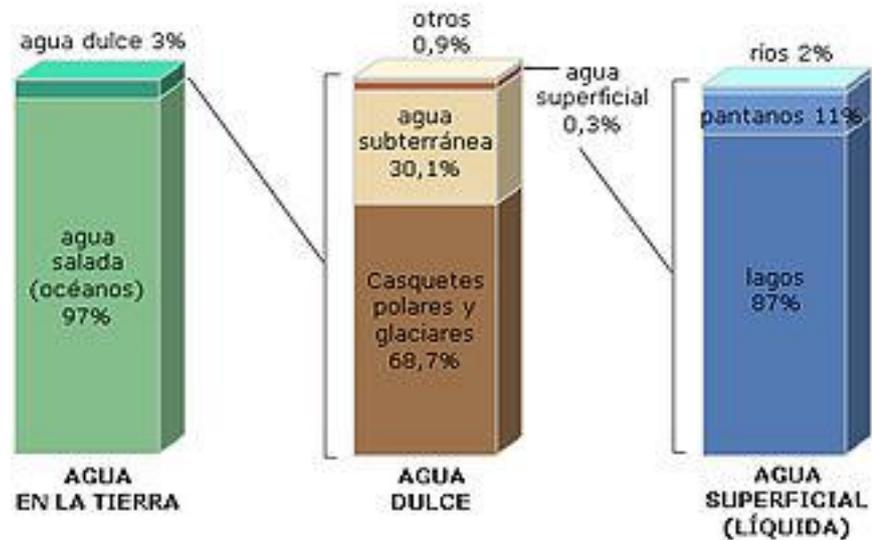


Figura 1. Distribución del agua en la Tierra

1.1.3 Composición del agua

Hallar la composición exacta del agua, ha dado lugar a muchísimas investigaciones, utilizándose dos métodos generales: análisis y síntesis.

En el primero, se parte de un peso conocido del compuesto, que se descompone en sus elementos constituyentes, determinando sus pesos respectivos.

Sin embargo, en el método de síntesis lo que se determina son las proporciones en que los elementos se combinan para formar el compuesto.

Las primeras respuestas se le atribuyen al químico americano Edward W. Morley (1838-1923) de la Universidad Western Reserve de Ohio. Este químico utilizó el método de síntesis para la determinación de la composición del agua. Se pesaban por separado el oxígeno y el hidrógeno y se hacían reaccionar en un aparato especial provisto de electrodos de platino entre lo que se hacía saltar una chispa eléctrica. El agua formada se condensaba y se pesaba.



Tras numerosos ensayos Morley llegó al dato de que la relación de pesos de cada átomo para formar la molécula de agua es de 15,9994 para el oxígeno y 2* 1,00797 para el hidrógeno.

En cuanto al volumen, la electrolisis del agua muestra que la relación es de 2 a 1 entre el hidrógeno y el oxígeno respectivamente.

1.1.4 Propiedades físicas del agua

El agua pura es un líquido inodoro, insípido, transparente y prácticamente incoloro ya que únicamente en grandes espesores alcanza un tono azul-verdoso.

Las propiedades físicas se resumen en la Tabla 1.

PROPIEDADES FÍSICAS DEL AGUA

Peso molecular	... 18,016	Presión crítica	... 218,4 atm
Punto de congelación	... 0°C (32°F)	Calor de fusión	... 79,7 cal/g
Punto de ebullición	... 100°C (212°F)	Calor de vap. A 100°C	... 539,5 cal/g
Temperatura crítica	... 374,2°C	Calor específico	... 1 cal/g. °C

Tabla 1. Propiedades físicas del agua.

La densidad del agua aumenta al elevar la temperatura de 0 a 4 °C donde alcanza su máximo con un valor de 1 g/mL. Por encima o por debajo de esta temperatura el agua se dilata y por tanto la densidad disminuye. Por ello, en comparación con las demás sustancias el agua tiene una peculiaridad, con respecto a la densidad, ya que las demás se dilatan con la temperatura. Otro aspecto diferenciador es su gran expansión al pasar de estado líquido al sólido.

El agua congela a 0° C y se convierte en hielo, y como su densidad es 0,917 g/mL a esta temperatura, el hielo flota sobre el agua al tener una densidad menor. Este hecho es increíblemente raro, ya que casi todas las sustancias se contraen al solidificarse.

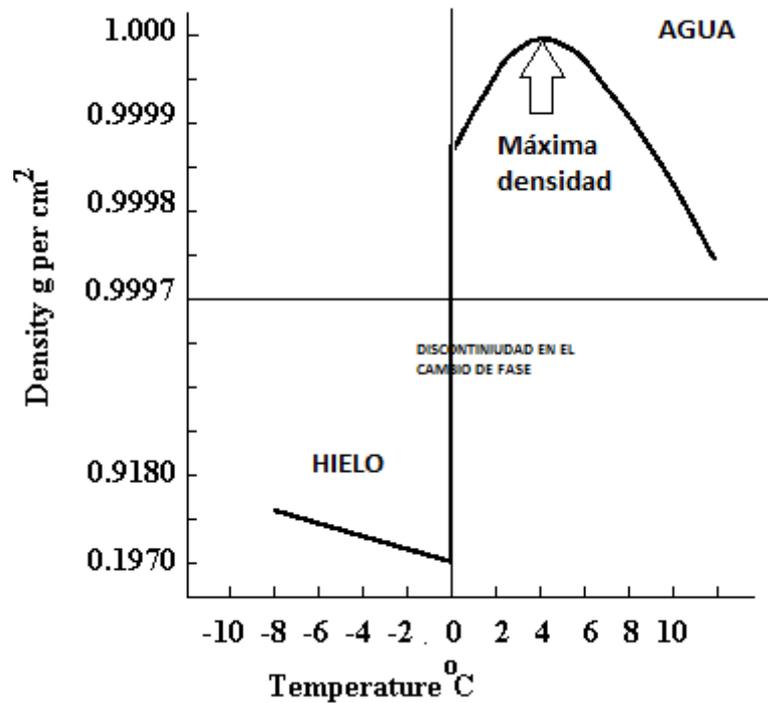


Figura 2. Variación de la densidad del agua en torno a la temperatura de congelación

El hecho de que el hielo es menos denso que el agua tiene una ventaja esencial, si con el agua ocurriese lo mismo que con las demás sustancias en los ríos, lagos, mares de las zonas frías al congelarse el hielo se iría al fondo y persistiría ahí, incluso en verano, modificando por completo el medio acuático tal y como lo conocemos en la actualidad.

El comportamiento anormal del agua en cuanto a la densidad entre los 0 y los 4 °C y con respecto a los valores elevados de los calores latentes de fusión y de vaporización se puede explicar mediante la asociación de sus moléculas, determinada por su enlace covalente y por la participación iónica a través de puentes de hidrógeno.

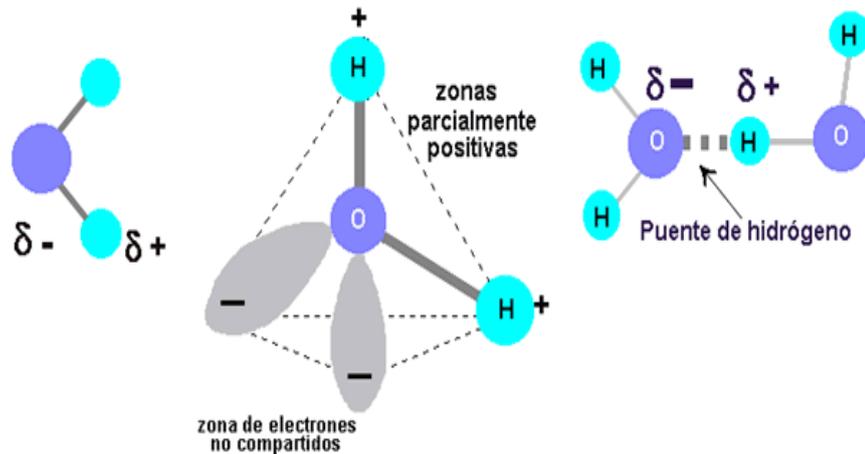


Figura 3. Estructura molecular del agua.

1.1.5 Propiedades químicas del agua

El agua, hidruro de oxígeno (H_2O), es la combinación química del hidrógeno con estructura electrónica $1s^1$ y el oxígeno $1s^2, 2s^2, 2p_x^2, 2p_y^1, 2p_z^1$ o en su configuración de hibridación de los orbitales de la segunda capa, mediante cuatro orbitales sp^3 , dirigidos desde el centro de un tetraedro a los vértices, con 6 electrones y dos vacantes para enlace. Se induce así que el ángulo Hidrógeno-Oxígeno-Hidrógeno sea ya de 90° o de $109,5^\circ$, correspondiente al estado normal o al de hibridación. Sin embargo, las medidas experimentales ofrecen como ángulo uno de $104,5^\circ$ lo que hace pensar que coexistan ambas estructuras teniendo mayor repercusión la de hibridación.

El agua tiene elevada fuerza de cohesión debido a los puentes de hidrógeno que se establecen entre sus moléculas dando lugar a una unión más fuerte entre ellas. Por otra parte, es un líquido prácticamente incompresible ya que no es nada fácil reducir su volumen de manera considerable mediante presión al mantener unas distancias intermoleculares casi fijas en sus moléculas.

Presenta una elevada tensión superficial, su superficie opone gran resistencia a romperse, y una gran capilaridad debido a las grandes fuerzas de adhesión de las moléculas de agua a las paredes de los conductos capilares y a las fuerzas de cohesión de las moléculas



entre sí. Elevado calor específico es otra de sus propiedades, hace falta mucha energía para elevar su temperatura convirtiendo el agua en un buen aislante térmico y además elevado calor de vaporización y elevada constante dieléctrica.

Por último se conoce que reacciona con los óxidos ácidos, básicos, con los metales y los no metales y se une a las sales formando hidratos.

1.2 Industrialización y contaminación

La contaminación de las aguas puede tener origen natural o antropogénico (procedente de las actividades humanas). Tras la industrialización y el creciente desarrollo de la actividad humana en este sector, en la actualidad el origen principal de la contaminación es la provocada por el hombre. Ha aumentado el uso del agua, la generación de residuos y el uso de medios de transportes fluviales y marítimos que, en muchas ocasiones, son causa de la contaminación de las aguas.

1.2.1 Origen natural

Este tipo de contaminación hace referencia a la alteración en la composición y distribución de las aguas como resultado de fenómenos naturales sin la intervención humana de por medio.

- **Corrientes marinas.** Movimientos organizados de las masas de agua que siguen un recorrido geográfico constante caracterizándose por unos niveles de temperatura y salinidad concretos y alteran las cadenas tróficas de la vida acuática. La Corriente del Niño, en Chile, es un ejemplo conocido de alteración de la cadena alimenticia como consecuencia del aumento de la temperatura del agua. En el momento en el que la superficie de los océanos se calienta más de lo normal los nutrientes del agua acaban por agotarse y el plancton muere, de este modo todos los peces que se alimentaban de ello mueren de la misma forma y por consiguiente las aves que se alimentaban de los peces también.



- **Mareas rojas.** Hecho que se produce en todos los mares cuando se produce un florecimiento súbito de grandes cantidades de plancton. El agua adquiere un color rojizo por unos pequeños organismos llamados dinoflagelados que producen toxinas que se adhieren a los tejidos de los moluscos que se alimentan del plancton resultando venenosas para muchas especies.
- **Mercurio.** El mercurio que podemos encontrar en la corteza de la Tierra y en los océanos contamina la biosfera. Ocurre lo mismo con los hidrocarburos y otros muchos elementos.

Las fuentes de contaminación natural, normalmente, son muy dispersas y no producen concentraciones altas de contaminación, excepto en algunos lugares específicos.

1.2.2 Origen antropogénico

En cambio, la contaminación humana, se concentra en zonas concretas como las zonas más industrializadas y provoca un mayor riesgo que la contaminación natural. Hay cuatro fuentes principales de contaminación antropogénica:

- **Industria.** La actividad industrial produce una gran cantidad de contaminantes y dependiendo del tipo de industria serán unos residuos u otros los que sean vertidos al agua y por consiguiente que provoquen su contaminación. En la siguiente tabla se resumen los más destacados:



Sector industrial	Substancias contaminantes principales
Construcción	Sólidos en suspensión, metales, pH.
Minería	Sólidos en suspensión, metales pesados, materia orgánica, pH, cianuros.
Energía	Calor, hidrocarburos y productos químicos.
Textil y piel	Cromo, taninos, tensoactivos, sulfuros, colorantes, grasas, disolventes orgánicos, ácidos acético y fórmico, sólidos en suspensión.
Automoción	Aceites lubricantes, pinturas y aguas residuales.
Navales	Petróleo, productos químicos, disolventes y pigmentos.
Siderurgia	Cascarillas, aceites, metales disueltos, emulsiones, sosas y ácidos.
Química inorgánica	Hg, P, fluoruros, cianuros, amoníaco, nitritos, ácido sulfhídrico, F, Mn, Mo, Pb, Ag, Se, Zn, etc. y los compuestos de todos ellos.
Química orgánica	Organohalogenados, organosilícicos, compuestos cancerígenos y otros que afectan al balance de oxígeno.
Fertilizantes	Nitratos y fosfatos.
Pasta y papel	Sólidos en suspensión y otros que afectan al balance de oxígeno.
Plaguicidas	Organohalogenados, organofosforados, compuestos cancerígenos, biocidas, etc.
Fibras químicas	Aceites minerales y otros que afectan al balance de oxígeno.
Pinturas, barnices y tintas	Compuestos organoestámicos, compuestos de Zn, Cr, Se, Mo, Ti, Sn, Ba, Co, etc.

Tabla 2. Principales contaminantes según el tipo de industria.

- **Vertidos urbanos.** Corresponde a los residuos orgánicos que se producen debido a la actividad doméstica además de todo tipo de sustancias que son arrastradas por el sistema de alcantarillado: emisiones de los coches (hidrocarburos, plomo, otros metales, etc), sales, ácidos, etc. Actualmente existe una normativa por la cual se exige la existencia de depuradoras o proceso de tratamiento previo al vertido de estos residuos que está disminuyendo el impacto de este tipo de contaminación. Sin embargo, en España la depuración de aguas residuales aún es insuficiente ya que

menos de la mitad de la población trata sus aguas residuales como obliga la Directiva Comunitaria.

- **Navegación.** Emite diferentes tipos de contaminantes pero sobretodo hidrocarburos. Otro aspecto importante a tener en cuenta es el hecho de los vertidos de petróleo, accidentales o no, que provocan importantes daños ecológicos como sucedió en Galicia (España) el 13 de noviembre del 2002.
- **Agricultura y ganadería.** Es una forma bastante difusa de contaminación del agua debido a los trabajos agrícolas que emiten vertidos pesticidas, fertilizantes y restos orgánicos de animales y plantas. Estos elementos son arrastrados por las aguas de riego llevando consigo sales compuestas de nitrógeno, fósforo y azufre contaminando las aguas subterráneas.

En explotaciones ganaderas la contaminación procede de los restos orgánicos que se depositan en el suelo y de los vertidos de aguas cargadas de materia orgánica.



Figura 4. Vertido de petróleo en Galicia (España) en 2002.



1.3 Soluciones

De la misma manera que las aguas tienen contaminantes naturales, también poseen sus propios mecanismos naturales de purificación por lo que hasta la llegada de la industrialización han sido autosuficientes para lograr su descontaminación.

La llegada de la industrialización y los tiempos modernos han provocado un aumento en la cantidad y una diversificación en la naturaleza de los contaminantes que llegan al agua y en muchos casos han superado las capacidades de descontaminación natural de las aguas provocando la necesidad de su tratamiento. Las aguas procedentes de los usos domésticos han sufrido una disminución notable del oxígeno disuelto (OD), las procedentes de las industrias y minerías, además de una disminución del OD presentan elevadas cargas contaminantes por contener productos orgánicos y metales pesados.

La purificación natural del agua contiene procesos físicos como la dilución, sedimentación, filtración, etc.; químicos como oxidación-reducción, disolución-precipitación, etc.; y biológicos. El tratamiento de las aguas se puede englobar en tres grandes partes, la purificación de las de uso doméstico, las de aplicación industrial y el acondicionamiento para su vertido de las aguas residuales urbanas y industriales.

1.3.1 Tratamiento de aguas para consumo humano

Uno de los grandes e importantes avances en este aspecto ha sido que el desarrollo de la tecnología ha permitido reducir drásticamente el contagio de enfermedades transmitidas a través del agua potable como el cólera o las fiebres tifoideas. La causa principal de la contaminación de los abastecimientos de agua para bebida son los residuos domésticos, por ello es prioritario el control y tratamiento de las aguas tanto subterráneas como superficiales que sirven de aprovisionamiento.

Dependiendo del tipo de agua entrante en una planta potabilizadora el esquema de la misma será diferente. En la Figura 5 se representa

tanto el esquema de una planta potabilizadora con agua entrante subterránea como superficial.

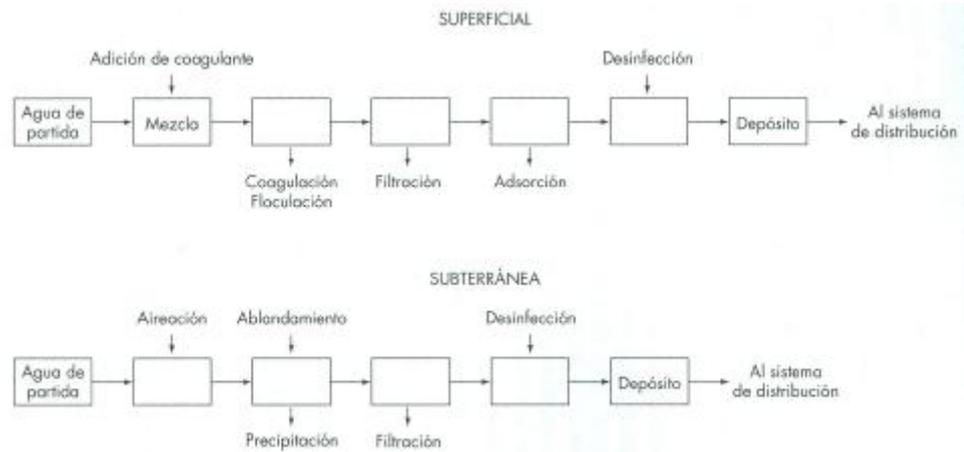


Figura 5 Esquema de una planta potabilizadora de aguas subterráneas y superficiales.

En ambos procesos el agua entrante tiene que ser sometida a un proceso de aireación para purgar los gases disueltos que le dan un olor desagradable. Posteriormente ha de seguir alguno de los tres procesos siguientes: eliminación de partículas, eliminación de sustancias disueltas y eliminación de los gérmenes patógenos.

Las aguas superficiales presentan normalmente un aspecto turbio como consecuencia de la presencia de partículas coloidales que se eliminan mediante coagulación-floculación. Las partículas coloidales están cargadas eléctricamente por lo que no se pueden agrupar para formar partículas mayores que sedimentarían, por ello mediante coagulantes (sulfatos de aluminio o de hierro) se neutralizan estas cargas y permite la formación, esta vez sí, de partículas que sedimentan en lo que se conoce como floculación.

Por su parte, las aguas subterráneas se suelen someter a un proceso de **aireación** para eliminar gases indeseables y para suministrar al agua el oxígeno necesario para que se produzcan reacciones beneficiosas desde el punto de vista de la purificación. El siguiente proceso al que se someten es al de **ablandamiento** que consiste principalmente en reducir la dureza del agua. La dureza se debe a la presencia de compuestos de calcio y magnesio en solución y en menor medida otros iones divalentes. Para lograr el ablandamiento



se utilizan dos procesos: el de la cal-soda y el de resinas cambiadoras de iones.

El de la cal-soda consiste en añadir cal al agua logrando un pH superior a 10 y los iones bicarbonatos solubles se convierten en carbonatos insolubles que se separan mediante filtración. Un inconveniente de este proceso es que suele ocurrir que el agua que viene del proceso de ablandamiento con cal-soda contiene partículas muy finas de carbonato cálcico que no precipitan dando lugar a depósitos en las tuberías, para solucionarlo se somete al agua a un proceso de recarbonatación con dióxido de carbono para convertir las partículas de carbonato en bicarbonatos solubles.

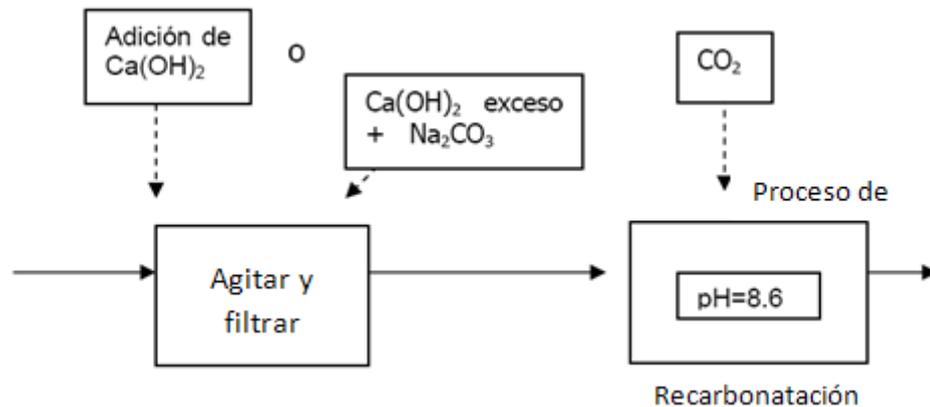


Figura 6. Proceso de cal-soda

El otro método implica la sustitución de los cationes responsables de la dureza por el ión sodio que produce sales solubles. Este proceso se conoce también como intercambio iónico y se utilizan zeolitas (silicatos complejos de aluminio y sodio) que se encuentran en la naturaleza o materiales sintéticos similares denominadas resinas cambiadoras. En el momento en el que la capacidad de intercambio está agotada, la zeolita puede regenerarse haciendo pasar a través de la columna de zeolita una disolución concentrada de cloruro de sodio.

Sin embargo, las resinas cambiadoras son mejores ablandadoras que las zeolitas al tener un armazón hidrocarbonado de elevado peso

molecular al cual están enlazados químicamente grupos cargados negativamente o positivamente.

Otra operación a la que son sometidas las aguas tanto subterráneas como las superficiales es al de **desinfección** eliminando los patógenos. El método más utilizado para ello es el de cloración con cloro gas o hipoclorito resultando muy efectivo contra las bacterias pero no tanto contra los virus. Para combatir ambos de manera exitosa el proceso utilizado es la ozonización que usa el ozono como elemento desinfectante.

1.3.2 Tratamientos de agua residuales urbanas

Las aguas residuales urbanas son una compleja mezcla de agua que se representa en la Figura 7. Formada en más de un 99% por agua y el resto por contaminantes orgánicos e inorgánicos.

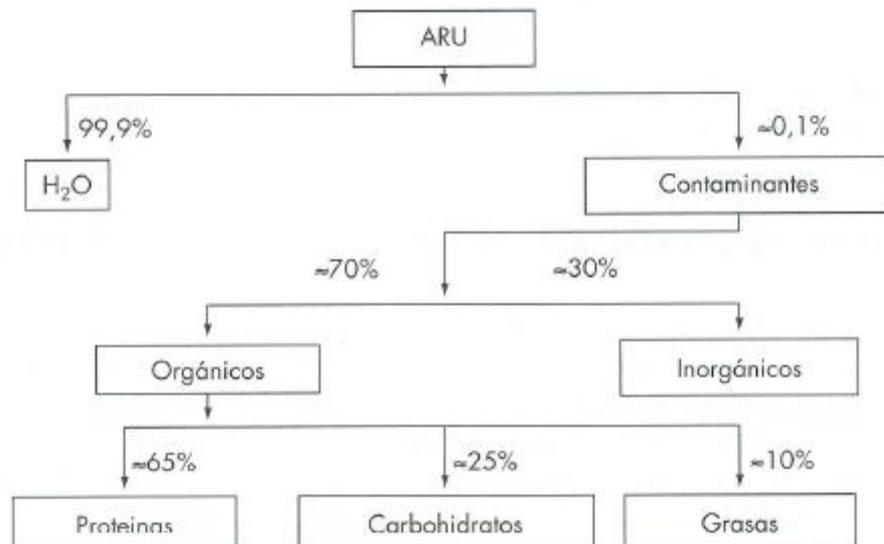


Figura 7. Composición de las aguas residuales urbanas.

Las aguas urbanas hacen referencia a las aguas domésticas procedentes de las áreas residenciales junto con las aguas residuales provenientes de los establecimientos comerciales o industriales. Con el tratamiento de este tipo de aguas se pretende, por un lado, rebajar el contenido de determinados contaminantes y no de todos,



y en segundo lugar, reducir su concentración y no de eliminarlos completamente.

Para caracterizar el agua residual municipal se usan los siguientes parámetros: turbidez, sólidos en suspensión, sólidos totales disueltos, acidez, oxígeno disuelto (OD), y demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y demanda química de oxígeno (DQO). Para conocer un rango de valores de algunos parámetros representativos se muestra la Tabla 3, pero debido a que este tipo de aguas varía ampliamente sus características sólo tiene carácter orientativo.

El grado de tratamiento de un agua residual irá acorde al grado de depuración necesario para cumplir la normativa que sea de aplicación. Se llevan a cabo en plantas de tratamiento que están diseñadas para que el agua sea sometida a tratamientos primarios, secundarios y terciarios.

Parámetro	Concentración (mg/l)
Demanda bioquímica de oxígeno, 5 días	200-500
Demanda química de oxígeno	250-1.000
Sólidos totales	200-1.000
Sólidos en suspensión	100-350
Nitrógeno total Kjeldahl	20-80
Fósforo total	5-20

Tabla 3. Intervalo de parámetros representativos de las aguas residuales urbanas.

Los tratamientos primarios eliminan la materia insoluble y reducen la DBO. Según la EPA (Environmental Protection Agency) un tratamiento primario es aquel que reduce entre un 30 y un 40% la DBO siendo todos procesos físicos (cribado, molienda, desarenado, tanque para sedimentación, desaceitado y desengrasado).

Los tratamientos secundarios son procesos biológicos que intentan rebajar la DBO y la DQO (filtros de goteo, biodiscos y procesos de **fangos activados**).

Por último, los tratamientos terciarios son procesos físicos, biológicos o químicos que se usan para eliminar los contaminantes disueltos o en suspensión que se quedan después del tratamiento

secundario (coagulación seguida de filtración, adsorción, polímeros sintéticos como adsorbentes y ozono).

Los tres tratamientos se reflejan en la Figura 8.



Figura 8. Tratamiento primario, secundario y terciario de las aguas residuales urbanas.

1.3.3 Tratamiento de aguas para la industria y de vertidos industriales

En la industria el agua se utiliza principalmente para procesos de calefacción y refrigeración, como disolvente, como diluyente y para fines generales de limpieza. Aunque no requiere unos niveles estrictos de pureza si debe reunir ciertas características:

No debe producir incrustaciones en las paredes de los equipos en los que se utilice, no debe contener elementos corrosivos que provoquen daños en los equipos y ni tiene que tener ni algas ni limos bacteriológicos ni otros tipos de microorganismos.

Las aguas procedentes de actividades industriales deberán ser depuradas antes de su vertido, la composición de ellas es muy variable y depende del tipo de actividad a diferencia de las residuales urbanas cuya composición es más uniforme. De esta manera los procesos de tratamiento dependerán del tipo de

contaminante. Si el nivel de contaminación no es muy elevado y/o el contaminante no es muy peligroso, las industrias suelen verter las aguas a la red general urbana mediante el pago de un “cánon de vertido”.

Es muy aconsejable estudiar las posibles modificaciones en los procesos de fabricación, o la posible recuperación de productor intermedios, o la reutilización del agua residual con el fin de ahorrar tanto en el agua de suministro como en el tratamiento de aguas residuales que se generan. En el caso de plantas industriales que usan una enorme variedad de operaciones, resulta adecuado homogeneizar las aguas residuales en una balsa antes de su vertido.

Si el agua residual se va a someter a un tratamiento biológico se ha de controlar los valores del pH y la presencia de metales pesados y compuestos orgánicos tóxicos debido a la influencia sobre el desarrollo de los microorganismos. En la Figura 9 se presenta el diagrama de flujos del tratamiento de un agua residual industrial.

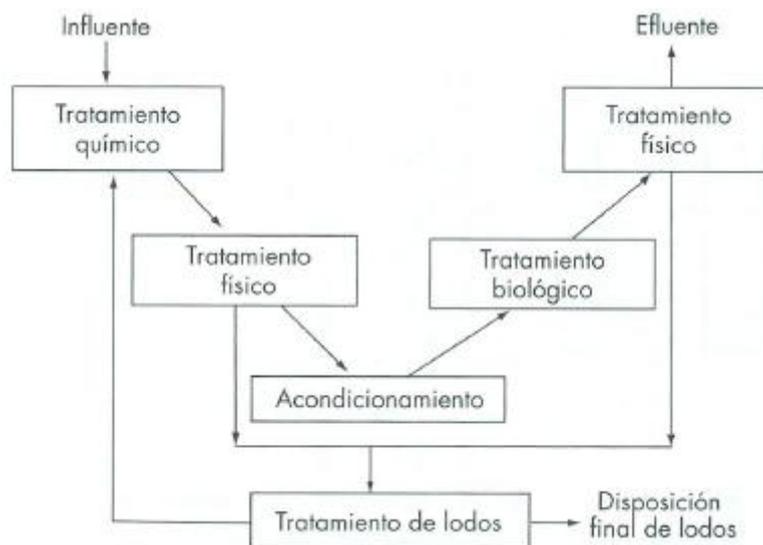


Figura 9. Diagrama de flujos general para el tratamiento de un agua residual industrial.

2. ESTADO DEL ARTE



El tratamiento de aguas residuales tiene un control poco estandarizado ya que cada tratamiento es diferente, con distintas variables a controlar. Los procesos físico-químicos no presentan dificultad para su control automático, sin embargo, procesos biológicos como el de fangos activos, en el que intervienen microorganismos, el control se vuelve más complicado por la aleatoriedad y la necesidad de predicción del comportamiento poblacional microbiano.

Lo usual en este tipo de controles es asegurar el correcto funcionamiento en cuanto a caudal, y mantener constante el nivel de biomasa suspendida para intentar asegurar un rendimiento de depuración constante, y debido a esto cada planta presentará un control especial en función principalmente de su caudal, contaminación y concentración microbiana.

Por ello no es que haya poco hecho hasta ahora sino muy variado y específico para cada planta, agua y contaminación.

A continuación se explican las tecnologías disponibles en la actualidad para la depuración y purificación del agua.

2.1 Pozo de grueso

Para evitar posteriores problemas de obstrucción en la depuración se utiliza una balsa, cuadrada o rectangular, para eliminar los grandes sólidos.

Con el objetivo de evitar que sedimente la materia orgánica el tiempo de retención en la balsa tiene que ser reducido eliminando únicamente los sólidos grandes haciéndolos pasar por una reja muy ancha o retirándolos por extracción mediante una pala.

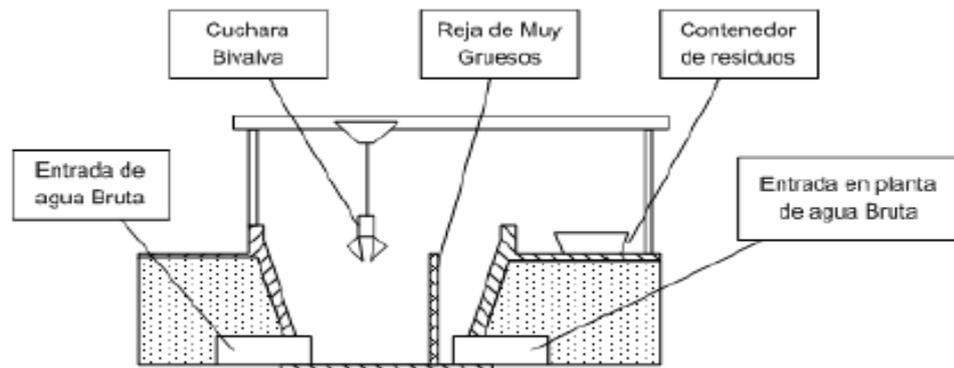


Figura 10. Pozo de gruesos.

2.2 Desbaste

Es una etapa similar a la anterior que se encuentra al comienzo de cualquier EDAR (Estación depuradora de aguas residuales) y que consiste en la eliminación de los sólidos de mayor tamaño mediante unas rejillas que sirven de filtro.

Puede ser desbaste grueso, medio o fino dependiendo de la separación entre rejillas o barrotes. El grueso es para sólidos de tamaño mayor de 5 cm, el medio entre 10 y 25 mm y por último el fino para sólidos entre 3 y 5 mm. Es normal en esta etapa que se utilice una secuencia de desbastes, comenzando por el grueso, después por el medio y al final por el fino para conseguir un mejor filtrado.

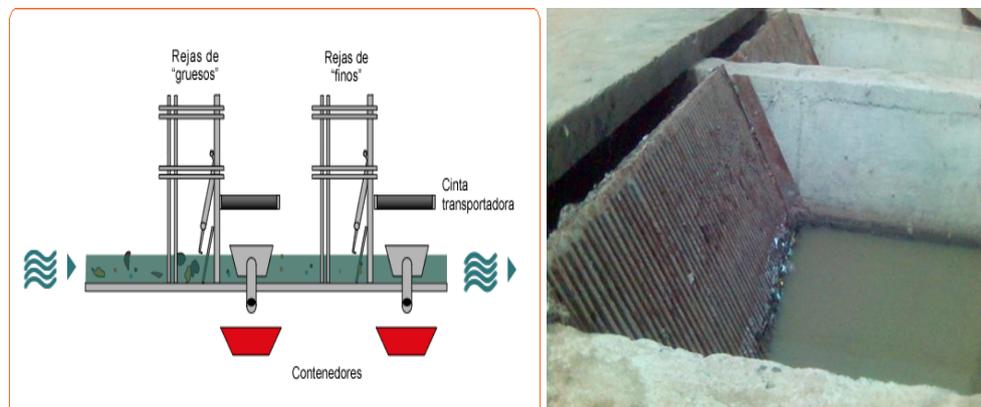


Figura 11. Proceso y rejillas de desbaste

2.3 Tamizado

Es un proceso similar al desbaste, únicamente varía que en vez de ser una rejas es una malla y además de mayor precisión. El tamaño de sólido es de entre 5 y 0,2 mm.



Figura 12. Tamizado

2.4 Desarenado-Desengrasado

- El desarenado es un proceso de eliminación de arenas o sólidos rápidamente sedimentables. Las arenas son sólido de tamaño mayor de 0,2 mm y que no han podido ser eliminados mediante el tamizado, y con un peso específico suficiente para poder decantar. Se utiliza un depósito en el cual por la propia acción de su peso las arenas se van sedimentando hacia el fondo y se recolectan o por peines o mediante un depósito de fondo inclinado.
- El desengrasado consiste en eliminar la grasa y aceites. Se realiza mediante flotación, en el que se inyecta una corriente de aire ascendente al agua que hay dentro de un tanque. Las burbujas de agua son capaces de arrastrar las partículas de grasa y aceite hacia la superficie y una vez allí se eliminan mediante un barrido.
- Existe la posibilidad de combinar ambos procesos dando lugar al desarenado-desengrasado.



Figura 13. Desengrasado

2.5 Balsa de homogeneización

Es una gran balsa en la que se va almacenando el agua residual por dos razones:

- Homogeneizar el caudal: consigue un caudal constante a la salida de la balsa para que la planta opere con mayor eficacia, siempre al mismo caudal evitando problemas de sobrellegada de agua residual.
- Homogeneizar la contaminación: logra que el agua residual mezclada y almacenada obtenga una contaminación constante y uniforme.



Figura 14. Balsa de homogeneización



2.6 Decantadores. Primario y Secundario

Los decantadores son grandes depósitos, circulares o rectangulares, en los que se produce la eliminación de sólidos en suspensión que van sedimentando en el fondo debido su propio peso. En las superficies quedan trazas de espuma o grasas, que se eliminan fácilmente con un barrido o un rebosado.

El decantador primario consiste en la eliminación de la contaminación procedente de los sólidos en suspensión mientras que el secundario se basa en la sedimentación de la materia orgánica producida tras la digestión liberándola de la contaminación.



Figura 15. Decantador primario



Figura 16. Decantador secundario

2.7 Decantación mejorada químicamente: Coagulación, Floculación, Decantación (CFD)

En el caso en el que la contaminación esté disuelta y no sedimente y no pueda ser eliminada mediante un proceso de decantación simple se utiliza una decantación mejorada químicamente. Añadir productos químicos adecuados logra flocular y decantar los sólidos disueltos en el agua residual.

El proceso se realiza en tres fases independientes, cada una de ellas en una balsa.

- Coagulación. Se añade el coagulante con el que se consigue romper y neutralizar la carga eléctrica de las partículas disueltas. La balsa es de agitación intensa.
- Floculación. Después de que haya sido eliminada la carga de las partículas estas pasan al tanque de floculación de agitación lenta. Debido a la agitación y a que las cargas ahora carecen de carga, las partículas se combinan entre sí formando flóculos (partículas de mayor tamaño formadas por la unión de varias).
- Por último, los flóculos formados se llevan a un decantador y allí sedimentan por su propio peso al haber aumentado su tamaño en los procesos anteriores.



Figura 17. Coagulación, floculación y decantación (CFD)

2.8 Tratamiento biológico por filtros biológicos o lechos bacterianos

Es otro proceso aerobio habitual en la depuración. La diferencia con los fangos activos es que en vez de que las bacterias estén suspendidas en las aguas residuales en este caso están adheridas a una superficie porosa denominada lecho.

El agua residual se riega sobre el lecho y por lo tanto está obligada a atravesarlo a través de las porosidades a la vez que las bacterias digieren la materia orgánica.

Es habitual encontrar reactores de lechos con ventiladores en el fondo para favorecer la corriente de aire. Constructivamente suelen ser torres cilíndricas de gran altura para tener una gran cantidad de manto bacteriano.



Figura 18. Tratamiento biológico por filtros biológicos o lechos bacterianos

2.9 Tratamiento biológico por biodiscos

Es una variante de tratamiento biológico aerobio. La diferencia es el uso de unos discos porosos que giran a los que se adhieren las bacterias.

El lecho adherido está parcialmente cubierto por agua y por aire. Al estar continuamente girando, las bacterias alternan fases en agua y en aire dando lugar a los procesos de digestión y respiración respectivamente.



Figura 19. Tratamiento biológico por biodiscos



2.10 Lagunaje

Es un tratamiento biológico que consiste en almacenar las aguas residuales durante largos periodos de tiempo y unas bacterias oxidan la materia orgánica.

Es sencillo, de bajo consumo energético, bajo coste y buena integración dentro del medio ambiente. Hay varios tipos de lagunas:

- Aerobias. Con una concentración suficiente de oxígeno para conseguir la supervivencia de bacterias aerobias. El oxígeno se consigue mediante la propia respiración de algas.
- Anaerobias. Debido al fango no hay suficiente oxígeno circulando por la laguna.
- Facultativas. Son lagunas en las que la parte baja es anaerobia y la superficie aerobia.
- Aireadas. Se inyecta oxígeno para favorecer la respiración.
- Maduración. Lagunas aerobias poco profundas para reducir patógenos.



Figura 20. Lagunaje

2.11 Lechos de turba

Se engloba dentro de los tratamientos blandos, se utilizan bacterias y otros microorganismos que se fijan en la turba para el tratamiento del agua residual.

La turba actúa como filtro reteniendo los sólidos en suspensión y las grasas del pretratamiento, absorbe los contaminantes disueltos y actúa también como soporte de las bacterias que oxidan la materia orgánica disuelta.

Son de 0,5 m de profundidad aproximadamente y una superficie de 150 m por donde se hace pasar el agua a tratar.



Figura 21. Lechos de turba

2.12 Humedales artificiales

Este tratamiento biológico está basado en hacer pasar el agua residual a través de una plantación de especies adecuadas a vivir parcialmente sumergidas.

Las raíces de los compuestos eliminan la materia orgánica y también se usan para eliminar nitrógeno al alternar etapas anóxicas y aireadas. La plantación absorbe a su vez fósforo.



Figura 22. Humedades artificiales

2.13 Eliminación de nitrógeno por Nitrificación-Desnitrificación en el biológico

Este proceso se suele combinar con un tratamiento biológico de fangos activos alternando etapas anóxicas con aireaciones que producen la eliminación de nitrógeno además de eliminar la materia orgánica.

En primer lugar se utiliza una balsa anóxica, después una balsa aireada de fangos activos, otra balsa anóxica y por último una balsa aireada para ayudar a la respiración de las células.

Al usar cuatro balsas implica un gran espacio, por lo que se utiliza una cámara circular en las que se alternan zonas aireadas y zonas anóxicas.

Se puede incluir no sólo en procesos de fangos activos sino que también en procesos biológicos como biodiscos y lechos bacterianos, realizando la correspondiente alternancia de zonas aireadas y anóxicas.



Figura 23. Eliminación de nitrógeno por Nitrificación-Desnitrificación

2.14 Filtración en medio granular (Arena/Antracita/Granate)

Se eliminan sólidos y patógenos al circular el agua residual por un medio poroso filtrante.

El sistema consiste en un depósito cilíndrico vertical donde se encuentra el medio filtrante (arena, antracita y granate), el agua se inyecta en la parte superior y se hace pasar a través de estos medios eliminando así la contaminación indeseada.



Figura 24. Filtración en medio granular

2.15 Adsorción sobre Carbón Activo

En este caso el agua residual se hace pasar por una columna porosa de carbón activo atrayendo hacia la superficie la materia orgánica. Permite eliminar materia orgánica, compuestos orgánicos volátiles, color, olor... etc, por lo que es un proceso que asegura gran calidad del agua.



Figura 25. Columnas de adsorción sobre carbón activo

2.16 Intercambio Iónico

Método de eliminación de sales o iones en los que el agua residual entra en contacto con una resina produciéndose un cambio iónico en la superficie de contacto resina-agua. La resina queda cargada con los iones indeseados, mientras que la resina cede al agua sus iones no dañinos.

Según el tipo de ión a eliminar se utiliza un tipo de resina u otra. Destacan las resinas catiónicas de ácido fuerte y débil, y las resinas aniónicas de base fuerte y débil.

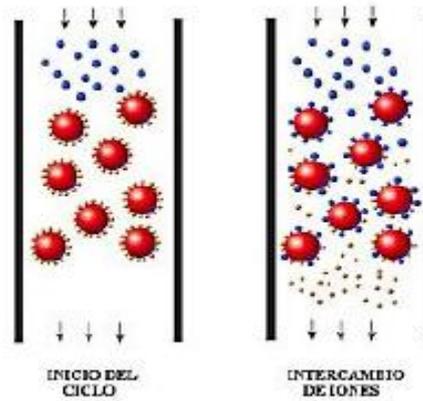


Figura 26. Intercambio iónico con resinas

2.17 Desinfección por cloración

Consiste en la desinfección de las aguas mediante la adición de cloro en forma de Cl_2 . Para ello se utiliza una arqueta por la que se hace pasar el agua residual y se añade el cloro.

Con pH elevado no es un método efectivo provocando mal olor y sabor.



Figura 27. Arqueta para la desinfección por cloración



2.18 Desinfección por dióxido de cloro

De la misma forma que el anterior pero esta vez desinfectando el agua mediante cloro en forma de ClO_2 . Como desventaja tiene que no reacciona con el amonio y por lo tanto no lo consigue eliminar formando subproductos como clorito y cloratos.

2.19 Desinfección por cloraminas

Desinfecta por medio de cloro en forma de NH_2Cl , NHCl_2 y NCl_3 . Es más estable que los dos anteriores pero presenta menor poder de desinfección.

2.20 Desinfección por ozono

Este método pretende desinfectar mediante la adición de ozono O_3 , es muy efectivo oxidando hierro, manganeso y sulfuros. Consigue eliminar los problemas de olor, color y sabor pero requiere mucha energía para generar el ozono y por tanto es menos económico.

2.21 Desinfección por radiación ultravioleta

Pretende realizar la desinfección por medio de la aplicación de radiación UV a capas finas de agua. Es muy efectivo en la desactivación de virus y no produce residual por lo que hay que aplicarlo a capas finas de agua muy limpia siendo así extremadamente lento.



Figura 28. Desinfección por radiación ultravioleta

2.22 Espesamiento de lodos por gravedad

El objetivo de este proceso es reducir lo máximo posible la humedad de los lodos primarios de depuración adecuándolos a su posterior digestión o estabilización.

Debido a la densidad de estos fangos, pueden espesar por acción de su propio peso, compactándose en el fondo de un decantador. El lodo se extrae en la parte inferior y se lleva a la digestión.



Figura 29. Espesamiento de lodos por gravedad

2.23 Espesamiento de lodos por flotación

Con este método se intenta reducir al máximo la humedad de los lodos biológicos de depuración. Al contrario que el anterior no pueden espesar debido a la densidad de estos fangos y se utiliza unos soplantes como ayuda para arrastrar el fango a la superficie.



Figura 30. Espesamiento de lodos por flotación

2.24 Estabilización química de lodos

Consiste en estabilizar los lodos añadiendo compuestos químicos como cal CaCO_3 . Con ello se eliminan patógenos y demás microorganismos indeseados que pueden ser peligrosas.



Figura 31. Estabilización química de lodos por adición de productos químicos

2.25 Digestión aerobia de lodos

Los lodos se estabilizan por digestión aerobia, con aire. El mecanismo es el mismo que el de fangos activos pero sin recirculación.



Figura 32. Digestión aerobia de lodos

2.26 Digestión anaerobia de lodos

Lo contrario al anterior, es decir, sin presencia de aire. Se realiza en reactores completamente cerrados donde se elimina la materia orgánica de los lodos y se transforma en biogás.



Figura 33. Digestión anaerobia de lodos

2.27 Filtros de bandas

Se utiliza en la deshidratación de lodos. Consiste en la filtración a través de una tela filtrante móvil, que envuelve al lodo mientras es prensado pasando por unos rodillos consiguiendo que la tela absorba la humedad y que quede el lodo deshidratado.



Figura 34. Filtros de bandas

2.28 Filtros prensa

El objetivo es el mismo al anterior pero esta vez se realiza mediante la aplicación de presión al lodo, comprimiéndolo entre unas placas cuadradas de tela filtrante.



Figura 35. Filtros de bandas



2.29 Centrifugas

Esta vez es haciendo girar el lodo a gran velocidad dentro de un depósito para conseguir su deshidratación.

2.30 Eras de secado

Por último, es el método más sencillo y rudimentario para la deshidratación de lodos consistente en la exposición del lodo en un terreno abierto al ambiente para que se deshidrate por sí mismo.



Figura 36. Eras de secado



3. FANGOS ACTIVADOS

Es un proceso biológico aerobio, es decir, se lleva a cabo en presencia de aire. Es el más utilizado para llevar a cabo el tratamiento secundario de un agua residual debido a su sencillez y eficacia en la depuración de las aguas. El objetivo es reducir los niveles de DQO y DBO del agua residual:

- **DQO:** Demanda química de oxígeno. Cantidad de oxígeno necesaria para oxidar la materia orgánica y convertirla en dióxido de carbono y agua. Se mide en mg/L.
- **DBO:** Demanda bioquímica de oxígeno. Cantidad de oxígeno que los microorganismos necesitan consumir durante la degradación de la materia orgánica. Se mide en mg/L.

EN AMBOS CASOS, CUANTO MAYOR SEAN MAYOR SERÁ LA CONTAMINACIÓN DEL AGUA RESIDUAL.

Se pretende flocular la materia orgánica disuelta en el agua residual por acción de bacterias y microorganismos. Ambos se ponen en contacto con el agua residual en un tanque llamado tanque de aireación en el que se inyecta aire para promover la respiración de las bacterias. Los microorganismos, en suspensión en el agua, transforman la materia orgánica biodegradable en nuevas células, CO_2 , H_2O y subproductos que floculan y pueden eliminarse por decantación. Para mantener las condiciones aerobias es necesario, aparte de la aireación del tanque, una agitación del conjunto.

Tras unas 8 horas de agitación, los microorganismos se separan en un tanque de sedimentación secundario donde no hay materia orgánica disponible para ser metabolizada por ellos, por tanto es necesario bombear una parte de ellos de nuevo al tanque de aireación consiguiendo que el proceso de eliminación de materia orgánica continúe.

El sistema de fangos activos o lodos activados está formado por una balsa de aireación y un tanque de sedimentación. Es necesario recircular parte de los fangos obtenidos al contener los microorganismos encargados de la digestión y al tenerse que mantener unos niveles constantes de ellos en el tanque de aireación.

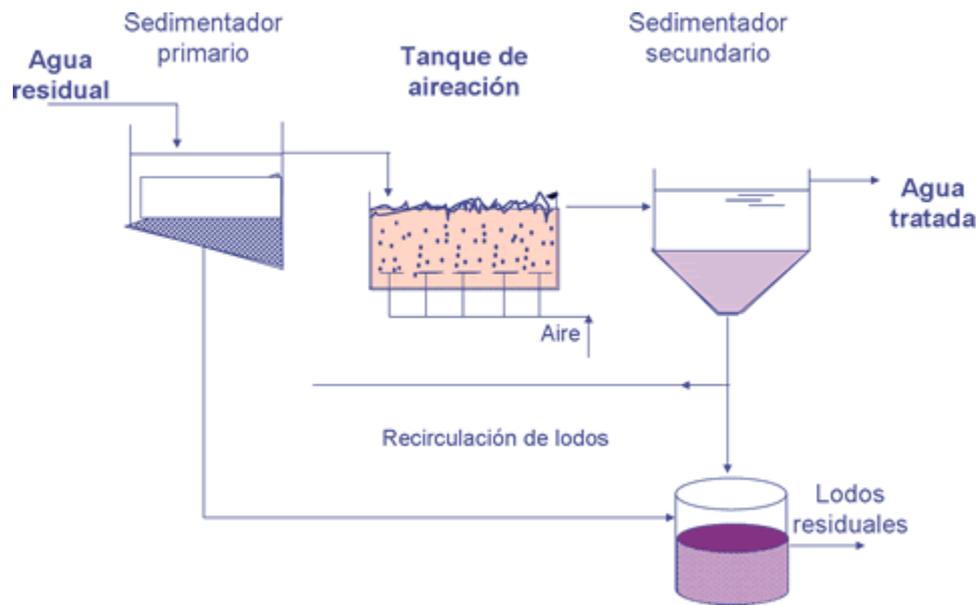


Figura 37. Proceso de fangos activos.

Este proceso consigue mayores velocidades de eliminación de DBO y DQO que los filtros de goteo pero sus costes son mayores.

Las balsas de fangos activados se diseñan teniendo en cuenta la materia orgánica y los microorganismos existentes en el agua residual. Existe un parámetro que relaciona ambos conceptos y se representa como **F/M** (de food y microorganismos), estando **F** relacionado con la DBO y la **M** con los sólidos en suspensión del tanque de aireación. A esta relación se la denomina como relación de carga. Si esta relación es baja, es decir, poca comida para muchos microorganismos, estos podrán transformar una gran parte de la materia orgánica consiguiendo alto niveles de depuración. En el caso contrario, mucha comida para pocos microorganismos, estos no serán capaces de eliminar toda la materia orgánica del agua consiguiendo niveles inferiores de depuración.

Además del oxígeno y de los microorganismos aerobios, para la oxidación biológica y el crecimiento de nuevos microorganismos, es necesario unas cantidades de nitrógeno y fósforo: $1\text{kg de N} \rightarrow 15\text{-}30\text{ kg DBO}$; $1\text{kg de P} \rightarrow 80\text{-}150\text{ kg de DBO}$. Metales pesados como el plomo o el mercurio son tóxicos y desactivan el proceso.

Tanto los fangos procedentes del tratamiento primario como los microorganismos en exceso del secundario hay que estabilizarlos y llevarlos a un lugar adecuado, lo que supone una dificultad respecto al proceso general de

tratamiento. La recogida, procesado y disposición de los fangos supone del 30 al 40% de los costes de construcción y mantenimiento de la planta.

Normalmente, en los procesos de fangos activos se realiza una disminución del volumen del agua residual y después a una digestión anaerobia con el fin de reducir su olor y putrescibilidad. En el proceso de digestión anaerobia las sustancias orgánicas se convierten en dióxido de carbono y metano como elementos finales. Los procesos que se llevan a cabo se pueden resumir en tres, etapa fermentativa (fermentación ácida), etapa acetogénica (ácido acético) y etapa metanogénica (metano).

Los productos finales de la digestión anaerobia son el biogás y los lodos de digestión. El biogás es una mezcla gaseosa de metano, dióxido de carbono, hidrógeno, nitrógeno y sulfuro de hidrógeno. En la Figura 38 se muestra un esquema de las reacciones que intervienen en el proceso de digestión anaerobia.

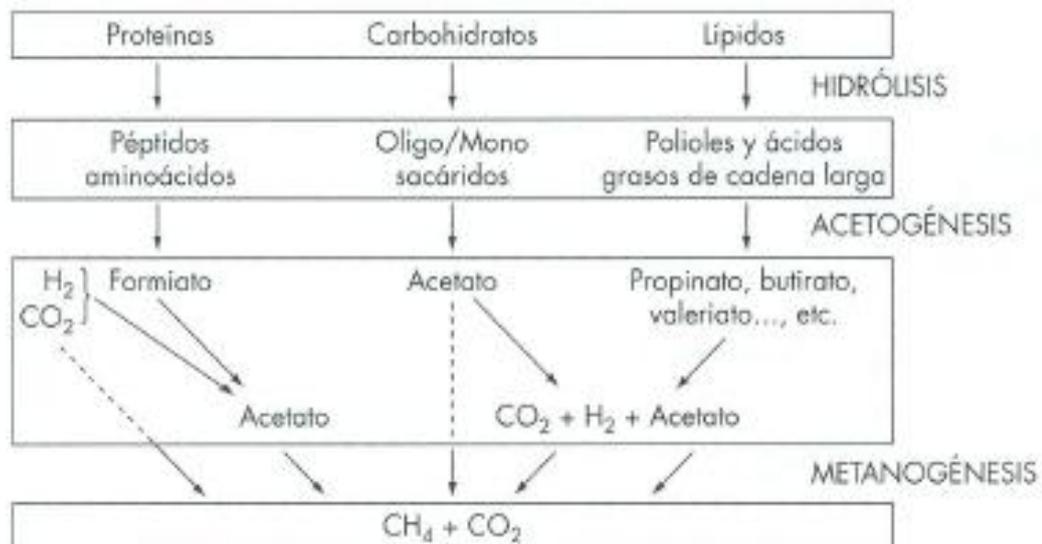


Figura 38. Esquema de reacciones en proceso de digestión anaerobia.

En la mayoría de las plantas de tratamiento de fangos por digestión anaerobia se lleva a cabo mediante dos digestores diferentes, el primario y el secundario. El primario se calienta hasta 35°C y se agita, mientras que en el secundario no se calienta ni se agita y en él ocurre una estratificación que permite cierta separación del líquido, llamado sobranse, de los sólidos. Este sobranse se vuelve a bombear a la planta principal para que vuelva a sufrir el tratamiento.

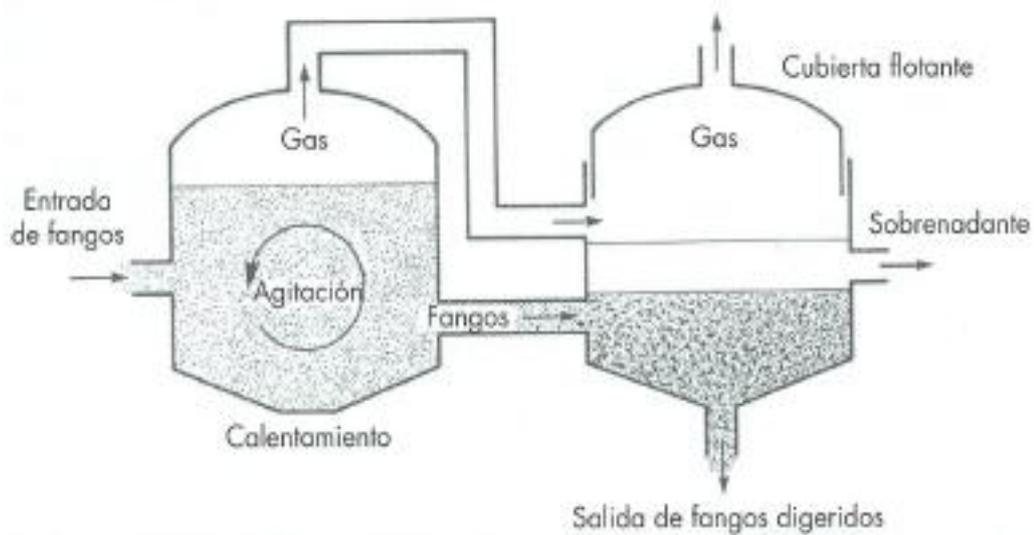


Figura 39. Digestor primario y secundario de la digestión anaerobia de fangos.

El biogás formado contiene el 60% de metano y se utiliza para producir parte de la energía eléctrica necesaria para el funcionamiento de la propia planta.

Los fangos procedentes del digestor secundario tienen líquido aún por lo que hay que eliminar esta agua que contienen.

El espesamiento de los fangos es un proceso en el que la concentración de los sólidos se aumenta y por tanto su volumen disminuye drásticamente. Para ello se utilizan espesadores de gravedad y por flotación. El esquema de un espesador por gravedad se muestra en la Figura 40, donde se puede apreciar como el fango entra por el centro y el agua se desplaza hacia fuera, pudiendo rebosar como efluente limpio. Los fangos espesados permanecen en el fondo donde son extraídos.

En un espesador por flotación se utilizan las burbujas de aire que arrastran las partículas y las llevan a la superficie donde son recogidas en forma de espuma por una raqueta de superficie.

Otro método para eliminar el agua de los fangos es mediante su secado. Se diferencia del espesamiento en que el fango una vez llevado a cabo el secado se comporta como un sólido, mientras que en el espesamiento actúa como líquido.

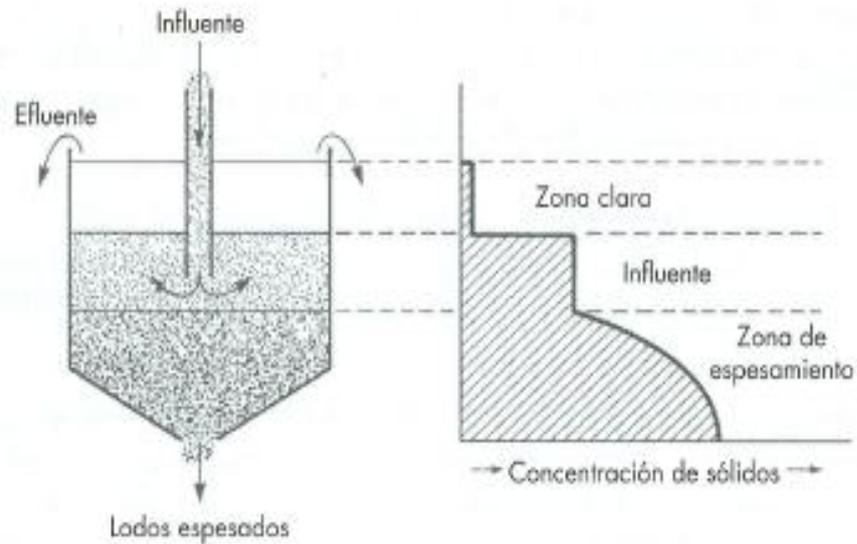


Figura 40. Esquema de una espesadora de gravedad.

El secado de fangos también puede realizarse por filtros de vacío, filtros de presión y la centrifugación.

En cuanto a la disposición definitiva de los fangos, existen varias opciones siendo una la incineración, que aprovecha su potencia calorífica media reduciendo significativamente su volumen.

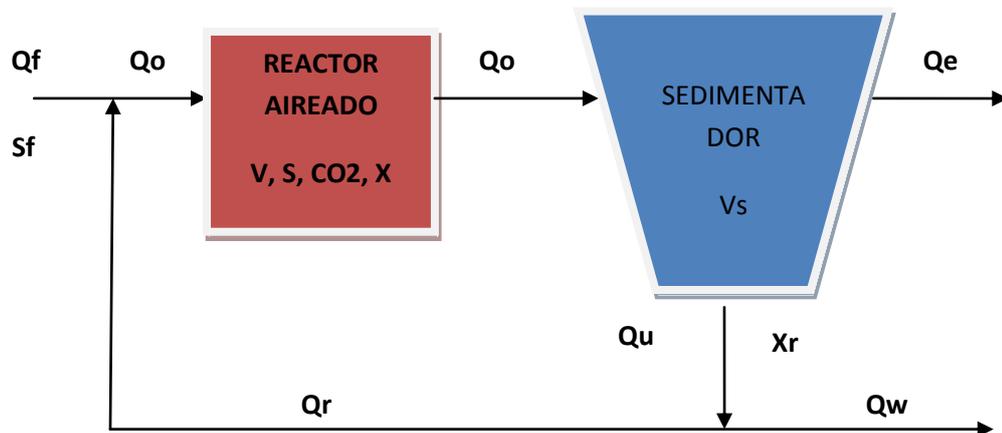


4. SIMULACIONES

4.1 Esquema

Con la finalidad de controlar una planta de lodos activados, es necesario prever el comportamiento de los fangos al cambiarles las condiciones de funcionamiento. Para ello, es preciso realizar simulaciones y un balance de masa dinámico en el sistema sobre los diferentes parámetros a medir.

El esquema del sistema de lodos activados o reactor con reciclaje que se utiliza en las simulaciones se muestra a continuación:



Q_f : Caudal afluente (m^3/d)

Q_o : Caudal en el reactor aireado (m^3/d)

Q_r : Caudal de reciclaje (m^3/d)

Q_w : Caudal de desecho (m^3/d)

Q_u : Caudal que sale del sedimentador (m^3/d)

Q_e : Caudal del agua tratada (m^3/d)

S_f : Concentración de DQO o DBO en el afluente (mg/L)

X_r : Concentración de sólidos en suspensión volátiles (SSV) en el reactor (mg/L)



4.2 Variables de influencia

Las variables sobre las que se va a estudiar su comportamiento en las simulaciones se resumen en la siguiente tabla:

VARIABLES	PARÁMETRO
DQO/DBO	S
SSV en el reactor	X
Oxígeno disuelto	CO2
SSV en el sedimentador	Xr

Tabla 4. Variables de influencia.

4.3 Ecuaciones

Los balances en el sistema para obtener el comportamiento de DQO/DBO, de los SSV, del oxígeno disuelto y de los SSV en el reactor se consiguen con las siguientes ecuaciones:

a) DQO/DBO:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{Qf}{V} Sf - \frac{Qo}{V} S - \mu \frac{X}{Y}$$

b) Biomasa en el reactor (SSV):



$$\frac{dX}{dt} = \frac{Q_r}{V} X_r - \frac{Q_o}{V} X + \mu X - k_d X$$

c) Oxígeno Disuelto (OD):

$$\frac{dC_{O_2}}{dt} = \frac{Q_f}{V} C_{O_{2f}} - \frac{Q_o}{V} C_{O_2} - \mu \frac{X}{Y_{O_2}} - bX + k_l a_w (C_{s_r} - C_{O_2})$$

d) Biomasa en el sedimentador (SSV):

$$\frac{dX_r}{dt} = \frac{Q_u}{V_s} X_r - \frac{Q_o}{V_s} X$$

e) Relaciones:

$$Q_o = Q_f + Q_r \quad \text{y} \quad Q_u = Q_w + Q_r$$

Donde:

t: Tiempo (días)

S: Concentración de DQO/DBO en el reactor (mg/L)

$C_{O_{2f}}$: Concentración de oxígeno disuelto en el afluente (mg/L)

C_{O_2} : Concentración de oxígeno disuelto en el reactor (mg/L)

C_{s_r} : Concentración de saturación de oxígeno (mg/L)

k_d : Coeficiente de muerte (días⁻¹)

Y_{O_2} : Coeficiente de rendimiento de oxígeno: mg (SSV) producidos / mg de oxígeno consumidos

$k_l a_w$: coeficiente de transferencia de oxígeno

V: Volumen del reactor

V_s : Volumen del sedimentador

μ : Velocidad específica de crecimiento (días⁻¹)

b: Kg de oxígeno para respiración endógena / día kg (SSV) en el reactor



4.4 Caudales fijos

Se dispone de un sistema de cuatro ecuaciones diferenciales y se procede a escribir el código **lodosactivados.m**. En él se escriben primero los parámetros cinéticos del sistema, después las condiciones de operación y por último las ecuaciones del balance.

```
function [dy] = lodosactivados(t,y)

%% Parámetros Dinámicos

Umax = 1.97; % (d-1)
b = 0.259; % (d-1)
Y = 0.33;
Ks = 137.3; % (mg/L)
Yo = 0.915; % Yo=a/Y
kd = 0.0601; % (d-1)

%% Condiciones de Operación

Sf = 668; % mg/L
CO2f = 0.3; % mg/L
Csr = 7.02; % mg/L
klaw = 420; % d-1
Qf = 10000; % m3/d
Qr = 500; % m3/d
Qw = 300; % m3/d
V = 7000; % m3
Vs = 250; % m3

dy = zeros(4,1); % vector columna

dy(1) = ((Qf/V)*Sf - ((Qf+Qr)/V)*y(1) - ((Umax/Y)*y(1)*y(2))/(Ks+y(1)));
dy(2) = ((Qr/V)*y(3) - ((Qf+Qr)/V)*y(2) + ((Umax*y(1)*y(2))/(Ks+y(1))) - kd*y(2));
dy(3) = ((Qf+Qr)/Vs)*y(2) - ((Qr+Qw)/Vs)*y(3);
dy(4) = klaw*(Csr-y(4)) + (Qf/V)*CO2f - ((Qf+Qr)/V)*y(4) - ((1/Yo)*Umax*y(1)*y(2))/(Ks+y(1)) - b*y(1);

end
```

Figura 41. Código de datos para las simulaciones.



Una vez se ha realizado este programa se comienza a llevar a cabo las simulaciones para cada caso, con sus códigos y resultados correspondientes. En primer lugar se harán tres simulaciones con los caudales del sistema fijos para más tarde hacerlos variables y ver como varía cada parámetro en función del tiempo.

En las tres primeras simulaciones lo valores de los caudales fijos serán los siguientes:

Caudal	Valor
Caudal afluente (Q_f)	10.000 m ³ /d
Caudal de reciclaje (Q_r)	500 m ³ /d
Caudal de desecho (Q_w)	300 m ³ /d

Tabla 5. Valores de los caudales fijos

- $Q_o = Q_f + Q_r = 10.500 \text{ m}^3/\text{d}$
- $Q_u = Q_w + Q_r = 800 \text{ m}^3/\text{d}$

1) **SIMULACIÓN : CONDICIONES INICIALES [DQO SSV Xr O₂]=[668 1000 6500 2] en mg/L**

Para llevar a cabo esta simulación se realiza el siguiente código, se usa el comando **ode45** para obtener la respuesta con las condiciones iniciales [DQO SSV Xr O₂] = [668 1000 6500 2].

```
%Declarar variables t e y
t=73eros(1,2);
y=73eros(4,1);

%Resolver las ecuaciones diferenciales de la función
[t,y]=ode45('lodosactivados',[0 25],[668 1000 6500 2]);

%Dibujar los resultados
subplot(2,2,4)
plot(t,y(:,4),'k')
xlabel('Tiempo (días)')
ylabel('O.D. (mg/L)')
```



```
subplot(2,2,3)
plot(t,y(:,3),'k')
xlabel('Tiempo (días)')
ylabel('Xr(mg/L)')

subplot(2,2,2)
plot(t,y(:,2),'k')
xlabel('Tiempo (días)')
ylabel('SSV(mg/L)')

subplot(2,2,1)
plot(t,y(:,1),'k')
xlabel('Tiempo (días)')
ylabel('DQO(mg/L)')

%Mostrar los últimos valores (Estado Estacionario)
format short g;
[t(end),y(end,1),y(end,2),y(end,3),y(end,4)]
```

Figura 42. Código Simulación 1

Con la última parte del código se puede obtener los valores finales de la simulación para cada parámetro:

t (días)	S (mg/L)	X (mg/L)	Xr (mg/L)	Co2 (mg/L)
25	63.445	455.38	5976.9	6.2232

En estas condiciones, se puede reducir la DQO de 668 a 63.445 mg/L como se observa en los resultados. Además 15 días después de iniciado el proceso todavía no se alcanza el estado estacionario; pero ya después de ese tiempo de iniciado el proceso, el sistema se encuentra en régimen permanente.

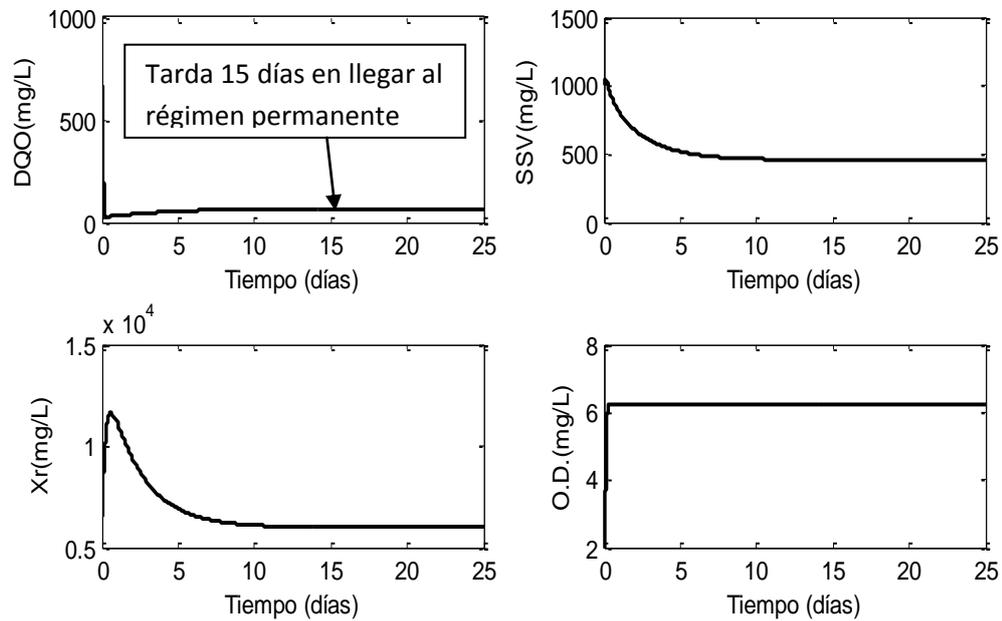


Figura 43. Gráficas de la Simulación 1

2) SIMULACIÓN : DESCARGAS INSTANTÁNEAS DE DQO DE 500 mg/L Y 1000 mg/L

También es posible realizar simulaciones a diferentes condiciones de operación; por ejemplo, para averiguar lo que pasaría si se tuviera una reducción instantánea de concentración de entrada que produjera que la concentración en el reactor se incrementara instantáneamente hasta 500 mg/L, y después hasta 1000 mg/L, bastaría con indicarlo en el programa variando la condición inicial de sustrato en el reactor (**So**).

```
%Declarar variables t e y
t=zeros(1,2);
y=zeros(4,1);

for So = 500:500:1000
[t,y]=ode45('lodosactivados',[0 20],[So 500 6500
2]);
subplot(2,2,4),plot(t,y(:,4),'k'),...
xlabel('tiempo (d)'),ylabel('O.D. (mg/L)'),...
hold on
subplot(2,2,3),plot(t,y(:,3),'k'),...
xlabel('tiempo (d)'),ylabel('Xr (mg/L)'),...
```



```
hold on
subplot(2,2,2),plot(t,y(:,2),'k'),...
xlabel('tiempo (d)'),ylabel('SSV(mg/L)'),...
hold on
subplot(2,2,1),plot(t,y(:,1),'k'),...
xlabel('tiempo (d)'),ylabel('DQO(mg/L)'),...
hold on
end
```

Figura 44. Código de la Simulación 2

Se genera la figura 45 correspondiente al comportamiento del proceso con descargar instantáneas hasta DQO de 500 mg/L y con DQO de 1000 mg/L.

Para ambos casos, la descarga hace que varíen los diferentes parámetros. Para interpretar los mismos, es necesario tomar en cuenta que, al ser una descarga instantánea, la concentración de DQO en el caudal de agua que entra al sistema inmediatamente después, vuelve a ser de 668 mg/L y constante.

Para cuando la concentración aumentó hasta 1000 mg/L, el sistema tarda alrededor de 4 días para volver a alcanzar los niveles de 63.4 mg/L, los SSV en el reactor incrementan; pero, después de 12 días vuelven a estabilizarse. Así mismo, el efecto, para volver a alcanzar el estado estacionario, es similar en el caso de los SSV en el sedimentador. También se observa que se reduce la concentración de OD debido al incremento en la concentración de los SSV en el reactor, lo que provoca un aumento en el consumo de oxígeno hasta que se alcanza de nuevo el estado estacionario.

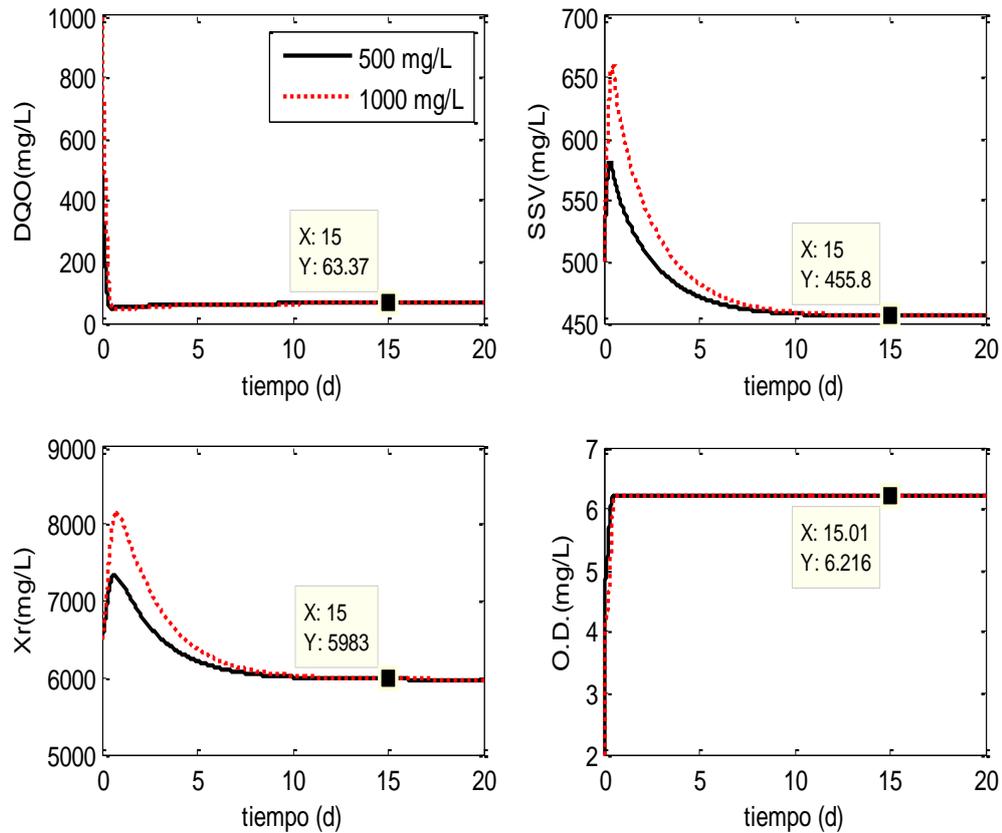


Figura 45. Gráficas de la Simulación 2

3) SIMULACIÓN : PICO DE CAUDAL A LOS 20 DÍAS DE DQO DE 1000 mg/L

Se evalúa el efecto que tendría, después de haber alcanzado el estado estacionario, que la concentración del sustrato en la entrada (S_f) incrementara y se mantuviera a 1000 mg/L. (Es preciso señalar que en la condiciones iniciales del código **lodosactivos.m** se cambió la condición inicial de $S_0 = 668$ mg/L a 1000 mg/L, con la finalidad de simular una descarga instantánea).

Para ello, cuando alcanza por primera vez el estado estacionario, antes de realizar la descarga, se guardan los valores finales de la simulación para que cuando se realice la descargar se introduzcan como valores iniciales los finales de la anterior.



```
%Declarar variables t e y
t=zeros(1,2);
y=zeros(4,1);

t1=zeros(1,2);
y1=zeros(4,1);

%Resolver las ecuaciones diferenciales de la función
[t,y]=ode45('lodosactivados',[0 20],[1000 500 6500 2]);

a1 = y(end,1);
a2 = y(end,2);
a3 = y(end,3);
a4 = y(end,4);

[t1,y1]=ode45('lodosactivados1',[20 50],[a1 a2 a3 a4]);

%Dibujar los resultados
subplot(2,2,4)
plot(t,y(:,4),'k')
xlabel('Tiempo (días)')
ylabel('O.D. (mg/L)')
hold on
subplot(2,2,4)
plot(t1,y1(:,4),'k')

subplot(2,2,3)
plot(t,y(:,3),'k')
xlabel('Tiempo (días)')
ylabel('Xr (mg/L)')
hold on
subplot(2,2,3)
plot(t1,y1(:,3),'k')

subplot(2,2,2)
plot(t,y(:,2),'k')
xlabel('Tiempo (días)')
ylabel('SSV (mg/L)')
hold on
subplot(2,2,2)
plot(t1,y1(:,2),'k')

subplot(2,2,1)
plot(t,y(:,1),'k')
xlabel('Tiempo (días)')
ylabel('DQO (mg/L)')
hold on
subplot(2,2,1)
plot(t1,y1(:,1),'k')
```

Figura 46. Código de la Simulación 3



Es posible ver que, después de que la concentración de la DQO de entrada (S_f) a 1000 mg/L pasa al reactor, la concentración en el reactor sufre un pequeño pico que alcanza cerca de los 100 mg/L. También que, aproximadamente a los 10 días de haber comenzado el proceso, la concentración vuelve a recuperarse al valor que tenía anteriormente. Recuperar la concentración de DQO con los mismo valores que cuando la concentración de entrada era de 668 mg/L es posible porque el sistema se ajusta a las nuevas condiciones; es decir, aumenta la concentración de SSV en el reactor, de 445 mg/L hasta más de 700 mg/L; y en el sedimentador pasa de cerca de 6000 mg/L hasta más de 9000 mg/L; las concentraciones se estabilizan después de 10 días. El OD sufre un ligero descenso, pero se mantiene suficientemente alto para mantener el sistema con el oxígeno requerido (> 2 mg/L).

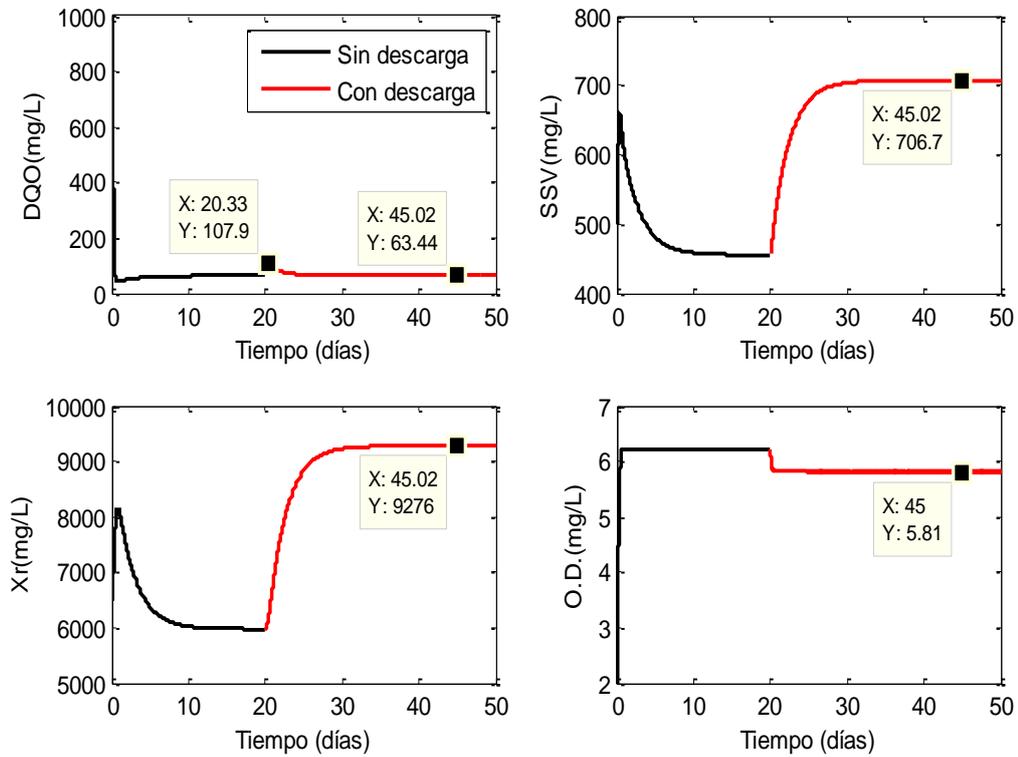


Figura 47. Gráficas de la Simulación 3



4.5 Caudales variables

En este apartado en vez de mantener constantes los caudales, se irá variando un caudal y se observará el efecto que tiene esta variación en el proceso en general y en los parámetros en concreto.

1) SIMULACIÓN: VARIACIÓN DEL CAUDAL DE DESECHO (Qw)

Se varía el caudal de desecho que proviene de los fondos del sedimentador. En esta simulación se usará un caudal de desecho que empiece en 300 m³/d hasta 1200 m³/d en saltos de 300 m³/d.

```
%Declarar variables t e y
t=zeros(1,2);
y=zeros(4,1);

for Qw = 300:300:1200
    [t,y]=ode45('VariacionQwQr',[0 20],[668 500 6500
2],[],Qw,500);
    subplot(2,2,4),plot(t,y(:,4),'k--'),...
    xlabel('tiempo (d)'),ylabel('O.D.(mg/L)'),...
    hold on
    subplot(2,2,3),plot(t,y(:,3),'k'),...
    xlabel('tiempo (d)'),ylabel('Xr(mg/L)'),...
    hold on
    subplot(2,2,2),plot(t,y(:,2),'k--'),...
    xlabel('tiempo (d)'),ylabel('SSV(mg/L)'),...
    hold on
    subplot(2,2,1),plot(t,y(:,1),'k'),...
    xlabel('tiempo (d)'),ylabel('DQO(mg/L)'),...
    hold on
end
```

Figura 48. Código de la Simulación 1

Se observa como al aumentar el caudal de desecho de lodos del sedimentador provoca que la concentración de la DQO en el reactor biológico también sea mayor. El sistema alcanza el estado estacionario cerca de los 6 días para el primer caso mientras que para el último unos 10 días.

A mayor Qw, menor es la concentración de microorganismos en el reactor biológico. También que, debido a que se eliminan más SSV



en el desecho, su concentración en el sedimentador disminuye al aumentar el caudal de desecho.

La cantidad de oxígeno disuelto en el reactor a mayores Q_w es mayor que en un Q_w menor debido a que, a altos caudales de desecho, disminuyen los SSV en el reactor; siendo así, disminuye la velocidad de consumo de oxígeno y por lo tanto se incrementa la concentración del oxígeno disuelto en el reactor.

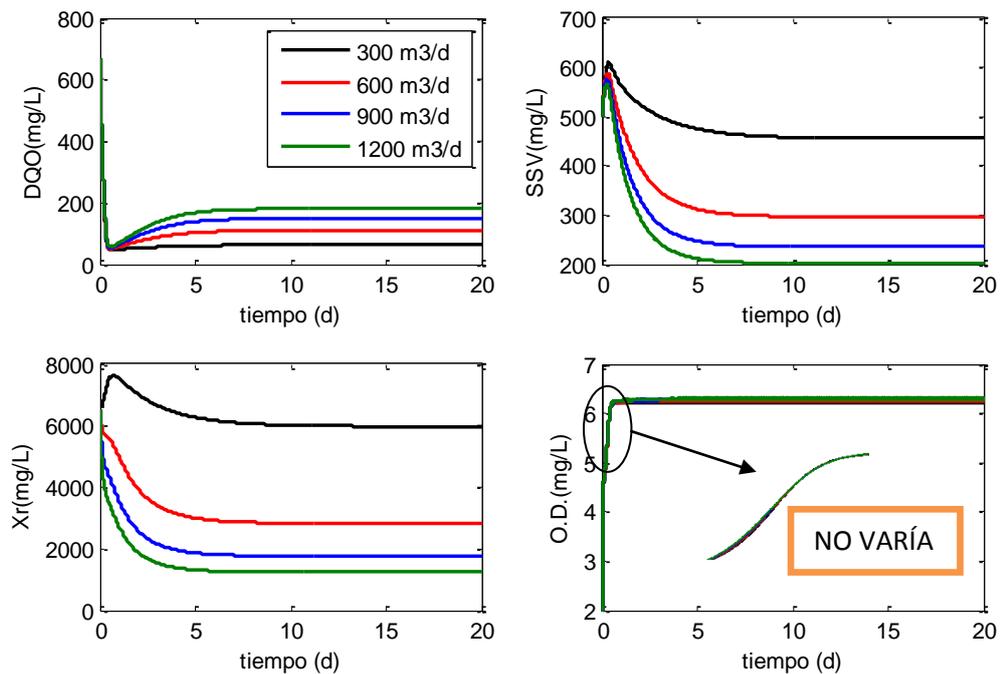


Figura 49. Gráficas de la Simulación 1

2) SIMULACIÓN: VARIACIÓN DEL CAUDAL DE RECICLAJE (Q_r)

En esta simulación se realizó el mismo procedimiento al anterior pero esta vez variando el caudal de reciclaje Q_r desde 500 a 5000 m³/d en saltos de 1500 m³/d.



```
%Declarar variables t e y
t=zeros(1,2);
y=zeros(4,1);

for Qr = 500:1500:5000
    [t,y]=ode45('VariacionQwQr',[0 20],[668 500 6500
2],[],300,Qr);
    subplot(2,2,4),plot(t,y(:,4),'k--'),...
    xlabel('tiempo (d)'),ylabel('O.D.(mg/L)'),...
    hold on
    subplot(2,2,3),plot(t,y(:,3),'k'),...
    xlabel('tiempo (d)'),ylabel('Xr(mg/L)'),...
    hold on
    subplot(2,2,2),plot(t,y(:,2),'k--'),...
    xlabel('tiempo (d)'),ylabel('SSV(mg/L)'),...
    hold on
    subplot(2,2,1),plot(t,y(:,1),'k'),...
    xlabel('tiempo (d)'),ylabel('DQO(mg/L)'),...
    hold on
end
```

Figura 50. Código de la Simulación 2

Al aumentar el caudal de reciclaje (Q_r), disminuye la concentración de DQO. También se observa que, según va bajando, los primeros niveles de DQO del reactor, al aumentar el Q_r , son mayores, con bastante diferencia entre ellos, que los que corresponden a valores más bajos. **A altas concentraciones la variación de Q_r no afecta a la DQO.**

El incremento de Q_r trae como consecuencia un aumento de los SSV. Esto provoca a su vez que la velocidad de degradación de contaminantes (DQO) por los microorganismos (SSV) se incremente y también que la concentración de DQO en el reactor biológico sea menor a mayor caudal de reciclaje.

Por otro lado, al incrementar Q_r se produce una disminución de la concentración de los SSV. **En el caso del OD observamos una zona de inestabilidad al comienzo del proceso que será necesario controlar mediante un control potente.** Después no se produce ninguna variación del OD.

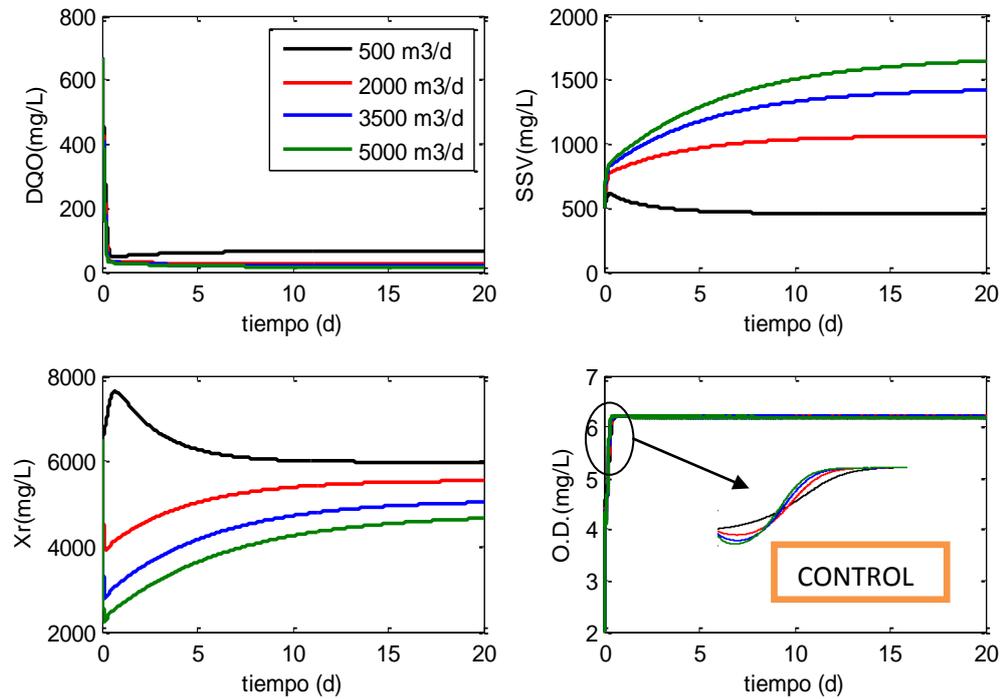


Figura 51. Gráficas de la Simulación 2

3) SIMULACIÓN: VARIACIÓN DEL CAUDAL DE ENTRADA EN EL REACTOR (Q₀)

En esta simulación se variará el caudal que entra en el reactor de 10500 m³/d a 15000 m³/d en saltos de 1500 m³/d.

```
%Declarar variables t e y
t=zeros(1,2);
y=zeros(4,1);

for Qo = 10500:1500:15000
    [t,y]=ode45('VariacionQoQr',[0 20],[668 500 6500
2],[ ],Qo,500);
    subplot(2,2,4),plot(t,y(:,4),'k--'),...
    xlabel('tiempo (d)'),ylabel('O.D. (mg/L)'),...
    hold on
    subplot(2,2,3),plot(t,y(:,3),'k'),...
    xlabel('tiempo (d)'),ylabel('Xr (mg/L)'),...
    hold on
    subplot(2,2,2),plot(t,y(:,2),'k--'),...
    xlabel('tiempo (d)'),ylabel('SSV (mg/L)'),...
    hold on
    subplot(2,2,1),plot(t,y(:,1),'k'),...
    xlabel('tiempo (d)'),ylabel('DQO (mg/L)'),...
    hold on
end
```

Figura 52. Código de la Simulación 3



Se observa como a medida que va aumentando el caudal Q_0 va aumentando la concentración de DQO, pero no significativamente. Los SSV, a medida que aumenta el caudal, disminuyen debido a que al aumentar Q_0 , que es la suma de $Q_f + Q_r$, no sabemos cuál de los dos es más significativo pero si podemos deducir por las gráficas que lo es el Q_r ya que cada vez hay menos SSV en el reactor.

En cuanto al oxígeno disuelto permanece invariable independientemente de cómo varíe el caudal.

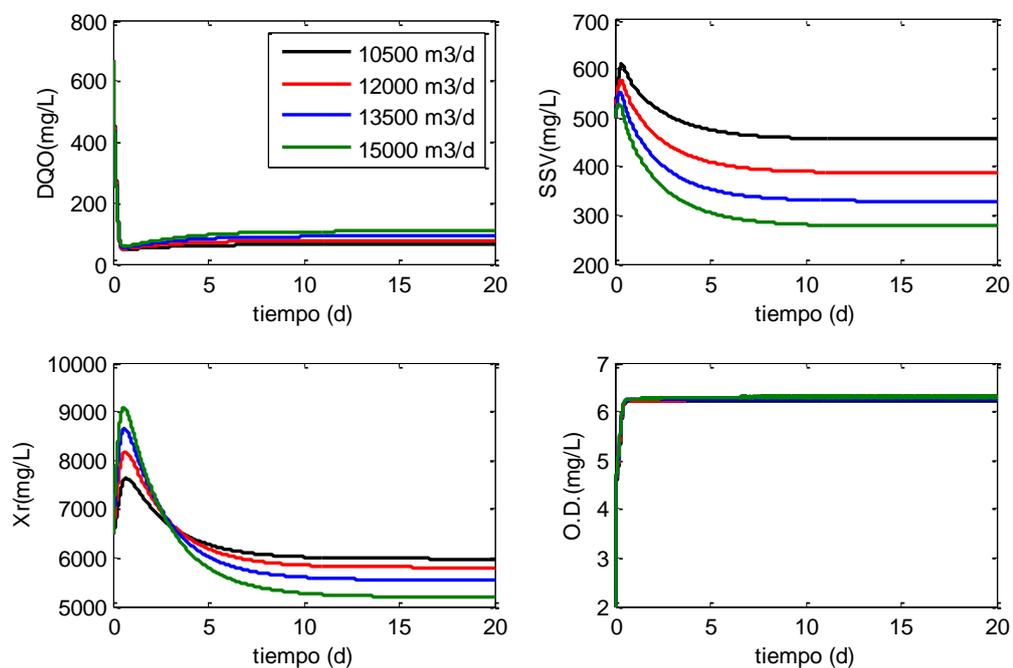


Figura 53. Gráficas de la Simulación 3

4) SIMULACIÓN: VARIACIÓN DE Q_0 Y DE Q_r MÁS UN PICO A LOS 20 DÍAS

Por último, se realiza la simulación en la que se varía tanto el caudal que entra en el reactor (Q_0) y el caudal de reciclaje (Q_r). Además se produce una descarga instantánea de 1000 mg/L de DQO a los 20 días de haber comenzado el proceso.



```
%Declarar variables t e y
t=zeros(1,2);
y=zeros(4,1);

t1=zeros(1,2);
y1=zeros(4,1);

for Qo = 10500:1500:13500
    for Qr = 1000:1000:3000
        [t,y]=ode45('VariacionQoQr',[0 20],[2000 700 6500
2],[],Qo,Qr);

        subplot(2,2,4),plot(t,y(:,4),'k--'),...
xlabel('tiempo (d)'),ylabel('O.D. (mg/L)'),...
hold on
        subplot(2,2,3),plot(t,y(:,3),'k'),...
xlabel('tiempo (d)'),ylabel('Xr(mg/L)'),...
hold on
        subplot(2,2,2),plot(t,y(:,2),'k--'),...
xlabel('tiempo (d)'),ylabel('SSV(mg/L)'),...
hold on
        subplot(2,2,1),plot(t,y(:,1),'k'),...
xlabel('tiempo (d)'),ylabel('DQO(mg/L)'),...
hold on

        a1 = y(end,1);
        a2 = y(end,2);
        a3 = y(end,3);
        a4 = y(end,4);

        [t1,y1]=ode45('VariacionQoQr1',[20 50],[a1 a2 a3
a4],[],Qo,Qr);

        subplot(2,2,4),plot(t1,y1(:,4),'r--'),...
xlabel('tiempo (d)'),ylabel('O.D. (mg/L)'),...
hold on
        subplot(2,2,3),plot(t1,y1(:,3),'r'),...
xlabel('tiempo (d)'),ylabel('Xr(mg/L)'),...
hold on
        subplot(2,2,2),plot(t1,y1(:,2),'r--'),...
xlabel('tiempo (d)'),ylabel('SSV(mg/L)'),...
hold on
        subplot(2,2,1),plot(t1,y1(:,1),'r'),...
xlabel('tiempo (d)'),ylabel('DQO(mg/L)'),...
hold on

    end
end
```

Figura 54. Código de la Simulación 4



Se observa como al introducir una descarga instantánea a los 20 días de concentración de DQO se elevan este a un valor superior al permitido por normativa ($139 \text{ mg/L} > 125 \text{ mg/L}$). Hay que rebajarlo hasta que esté dentro de los límites siempre y cuando no sea algo puntual.

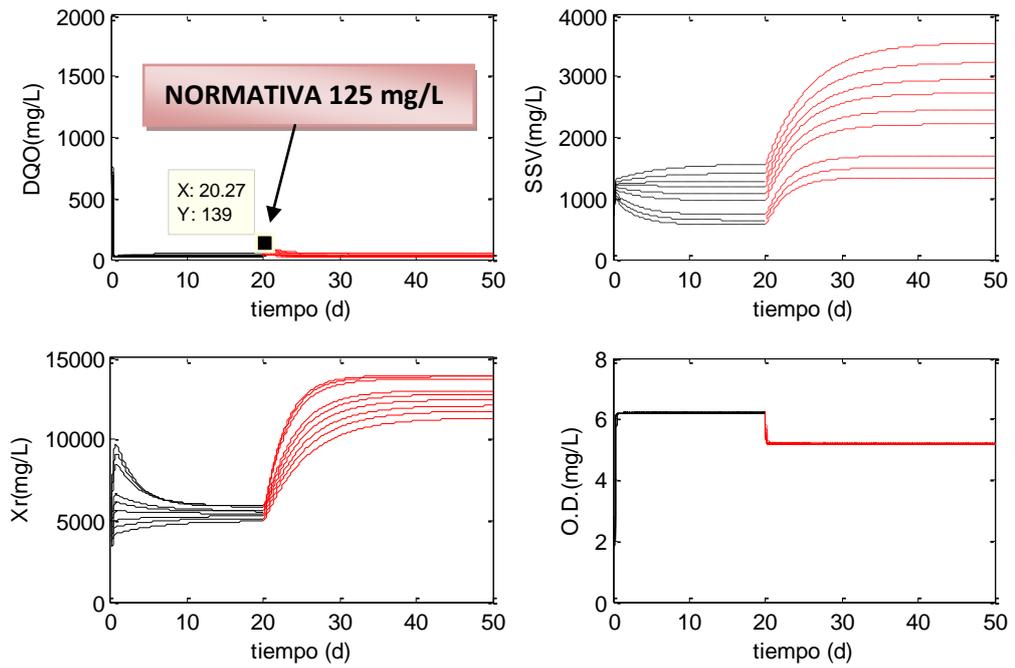


Figura 55. Gráficas de la Simulación 4



5. CONCLUSIONES

Una vez llevado a cabo todas las simulaciones se llega a las siguientes conclusiones:

- Con respecto a las simulaciones con **caudales fijos** se concluye que son procesos con mucha inercia y pequeñas variaciones. Por lo tanto no es necesario un control tan específico.
- Con respecto a las simulaciones con **caudales variables** se concluye que cuando se producen picos de caudal dan lugar a grandes variaciones que hay que controlar con el objetivo de alcanzar el régimen permanente lo antes posible. En este caso sí hacen falta controles potentes.

Se realizarán por tanto, dos controles. El primero un control sobre la DQO ya que por normativa se exige que sea menor o igual a un valor de 125 mg/L, y ya se ha observado que se pueden dar situaciones en las que este límite se supera. Además, los análisis de la DQO se realizan a los 5 días (DQO_5), y como de un día para otro puede variar hay que tenerlo muy bien controlado para que a la hora del análisis se encuentre en unos valores adecuados. Este control se realizará con la variable de control el caudal afluente **Qf**.

El segundo control será sobre el oxígeno disuelto (OD), aunque no hay normativa al respecto sí que es necesario un control para mantenerlo constante para asegurar que los microorganismos existentes en el proceso vivan y realicen su trabajo. En este caso se usará la variable de control el caudal de reciclaje **Qr**.



6. CONTROLES

En ambos controles, el primer paso consistirá en obtener la planta $P(s)$ del proceso. Una vez se tiene la planta se diseñará el control bajo ciertas restricciones y/o requisitos que deberán cumplir en cada caso. Por último se comprobará si los resultados obtenidos corresponden a los esperados o no.

6.1 Control DQO

Para el control de DQO y obtener la planta partimos de la ecuación que relaciona el caudal Q_f y la concentración de DQO:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{Q_f}{V} S_f - \frac{Q_o}{V} S - \mu \frac{X}{Y}$$

Sabiendo que la constante de afinidad del sustrato $K_s=137.3$ mg/L y la velocidad específica de crecimiento es:

$$\mu = \frac{\mu_{max} * S}{K_s + S}$$

La ecuación queda de la siguiente forma:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{Q_f}{V} S_f - \frac{Q_o}{V} S - \left(\frac{\mu_{max} * S}{K_s + S} \right) \frac{X}{Y}$$

Aplicando Laplace a la ecuación anterior, sustituyendo los valores conocidos y agrupando la ecuación en la forma que se desea se obtiene la siguiente planta para el control de la DQO:

$$\frac{S}{Q_f} = \frac{0.095s}{s^2 + 1.5s + \frac{1.97 * X}{137.3 + S} * \frac{1}{0.33}}$$

Para los valores de X y S de la ecuación se les quita variabilidad utilizando los valores de ambas variables en el régimen permanente ($X_{perm} = 1390$ mg/L, $S_{perm} = 45.3$ mg/L), y finalmente se obtiene la planta deseada.



$$P_{DQO}(s) = \frac{S}{Q_f} = \frac{0.095s}{s^2 + 1.5s + 46}$$

Con la planta se realiza un estudio de la respuesta en frecuencia. En concreto, se usará el gráfico de Nichols para observar si cumple con las especificaciones usuales de los controles con un margen de fase superior a 45 grados y una amplitud de fase mayor de 6 dB ($\phi_m > 45^\circ$; $A_m > 6\text{dB}$).

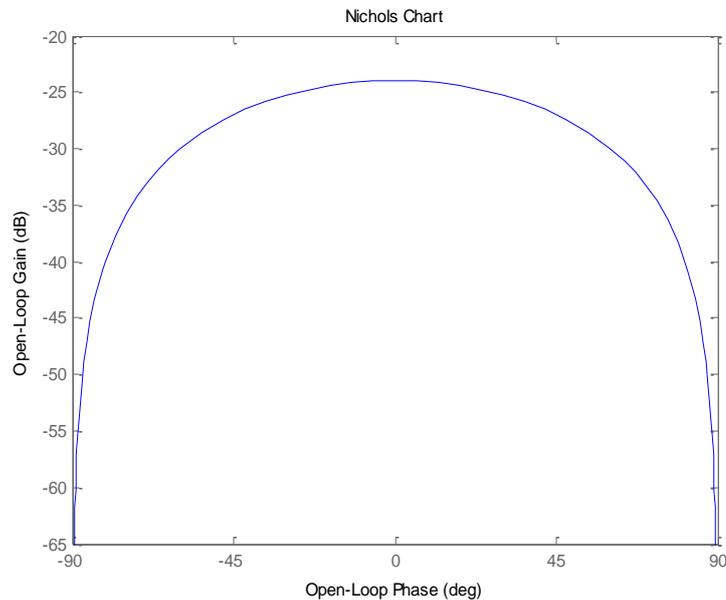


Figura 56. Diagrama Nichols del Control DQO

El margen de fase es el retraso de fase que habría que añadir al lazo abierto para obtener un sistema oscilante. Es el ángulo que hay entre -180° y el punto en el que la gráfica corte a 0dB (en la pulsación de cruce ω_0). En la anterior representación del diagrama de Nichols se observa cómo no corta en 0dB, por ello, el primer paso es subir la gráfica hasta que corte. Para ello se utiliza un control proporcional del valor adecuado para que corte en 0dB.

Un control proporcional es puramente estático, no permite el adelanto ni el retraso de fase, por ello permite solamente especificar el amortiguamiento y en nuestro caso con un control de valor **K=100** es suficiente para elevar la gráfica lo correspondientes decibelios para que corte en cero.

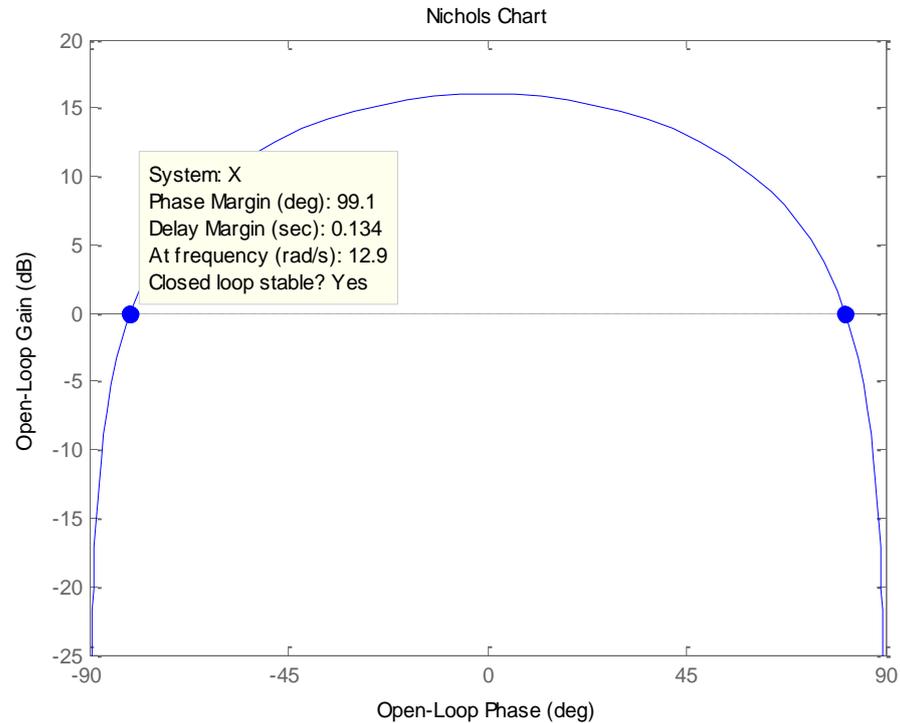
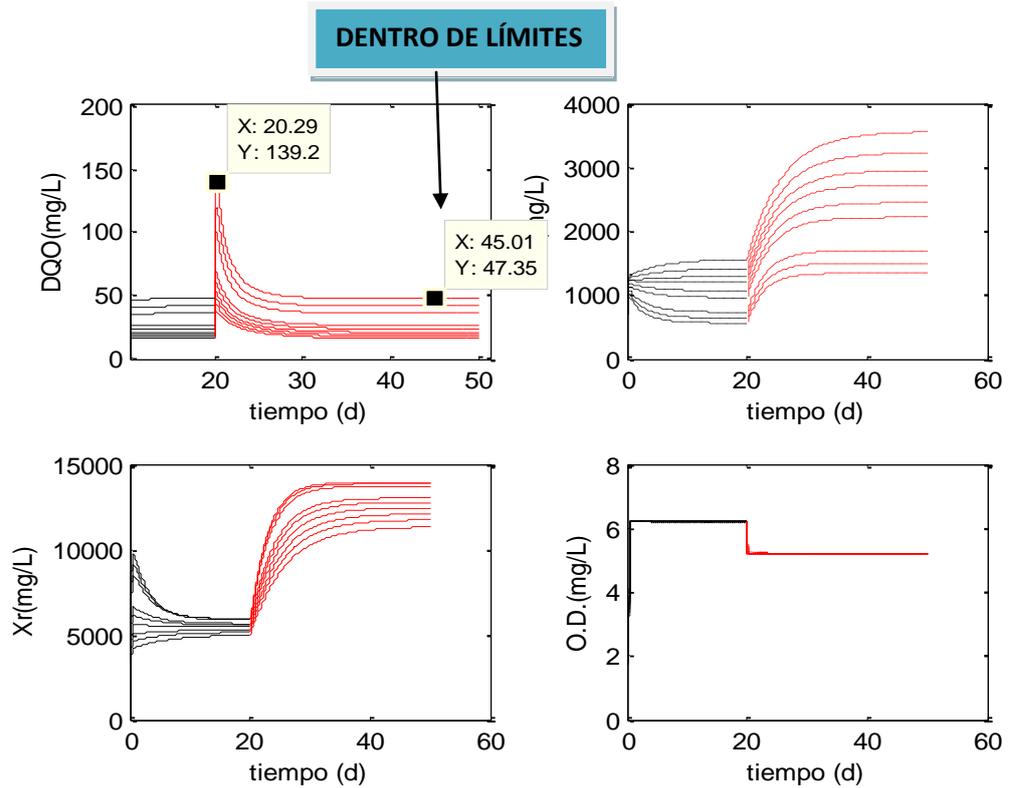


Figura 57. Diagrama Nichols con K=100

El margen de fase es siempre mayor que 45° tal y como se puede ver en el diagrama anterior.

Por otra parte el margen de ganancia es el factor (ganancia o amplitud) por el que habría que multiplicar el lazo abierto para obtener un sistema oscilante. Son los decibelios que hay entre el corte de la gráfica con -180° y 0dB , en nuestro caso al no cortar nunca con -180° cumpliremos también esta especificación.

Desde la perspectiva de la respuesta en frecuencia se cumplen las especificaciones requeridas, por ello se estudiará a continuación la respuesta temporal del sistema ya que el objetivo principal es que el sistema llegue al régimen permanente lo antes posible estando por debajo del límite europeo de 125 mg/l . El límite, tal y como se vio en la parte de las simulaciones, es superado pero de manera puntual llegando al régimen dentro de los valores permitidos ($\text{DQO}_{\text{reg.perm}}=47.35\text{ mg/L}$). Por tanto, lo único que habrá que conseguir es que el sistema sea lo más rápido posible y con este fin se estudia la respuesta temporal.



El primer paso consiste en representar la respuesta a un escalón de nuestro sistema con el control proporcional utilizado anteriormente.

$$G(s) = C(s) * P(s) = \frac{9.5s}{s^2+1.5s+46} \quad \text{Sistema en lazo abierto}$$

$$F(s) = \frac{G(s)}{1+G(s)} \quad \text{Sistema en lazo cerrado}$$

La respuesta a un escalón del sistema de lazo cerrado es:

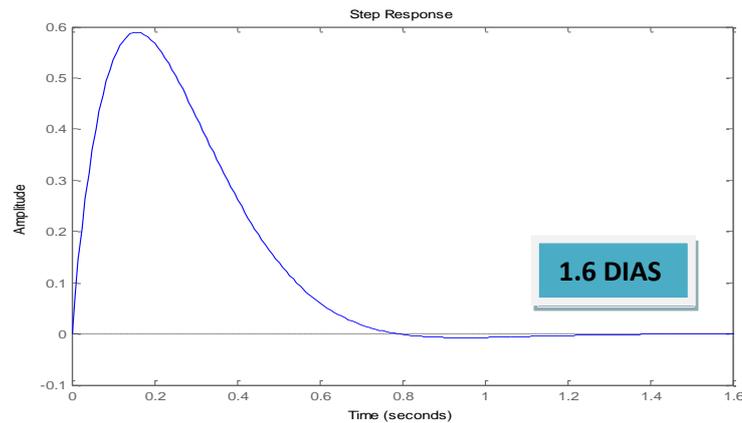


Figura 58. Respuesta temporal con control P

NOTA: Aunque el eje de abscisas se encuentre en segundos, en nuestro caso son días.

Se necesita un sistema más rápido y sin error, viendo la respuesta temporal se deduce que el error no es relevante ya que es mínimo con un control proporcional que es el que proporciona mayor error. En cuanto a la rapidez los más rápidos son o el control proporcional diferencial (PD) o el control proporcional integral diferencial (PID), la diferencia entre ambos es que el PID elimina el error con la parte integral mientras que el PD tiene error. Como en nuestro caso el error es irrelevante se probarán ambos hasta obtener el control más rápido.

1) CONTROL PD

En el control PD el bloque de control es:

$$C(s) = (Ds + 1)$$

Se analizará la respuesta temporal del sistema ante escalón para diferentes valores del parámetro D con el fin de encontrar aquel valor que proporcione el sistema que llegue más rápido al régimen permanente.

Se estudiarán los casos desde valores muy altos de D como muy bajos pasando por valores altos, medios y bajos.

- D muy alta \rightarrow D=1000

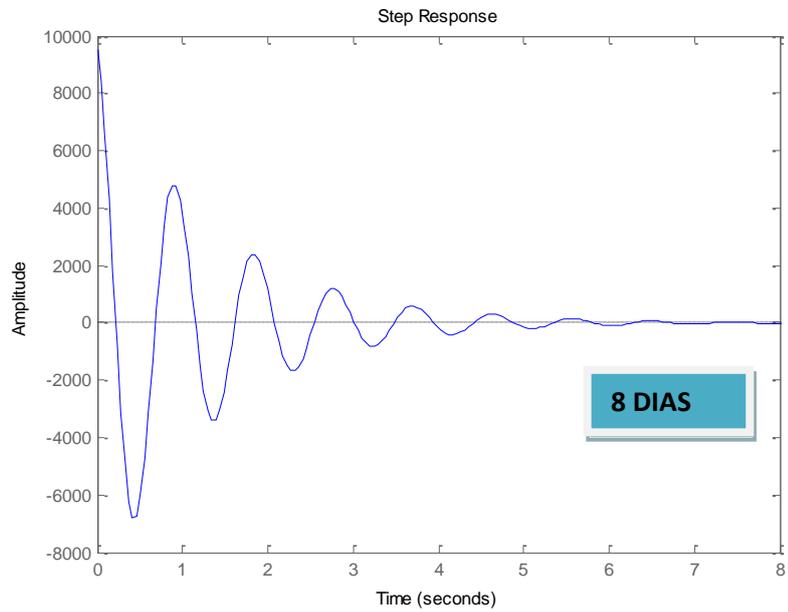


Figura 59. Respuesta temporal con control PD y D=1000

- D alta → D=100

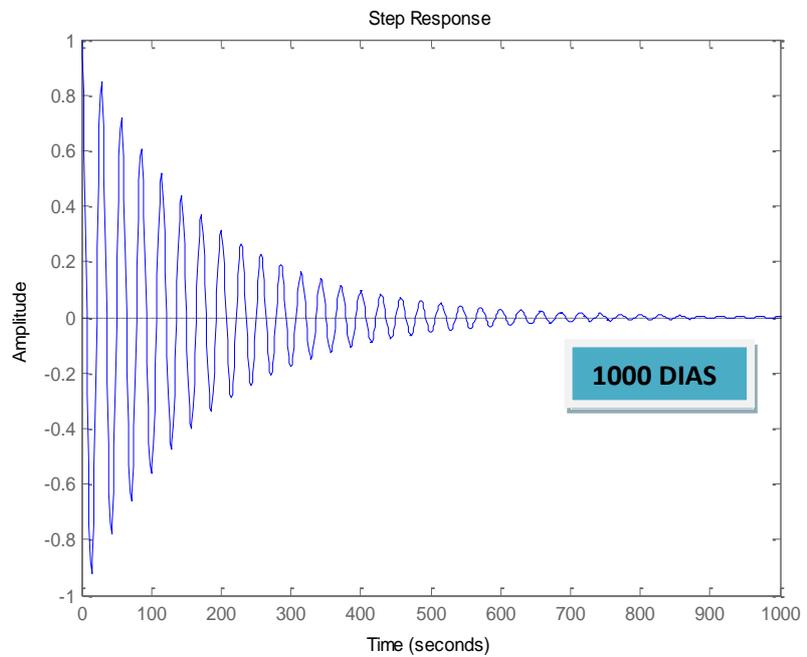


Figura 60. Respuesta temporal con control PD y D=100

- D media → D=50

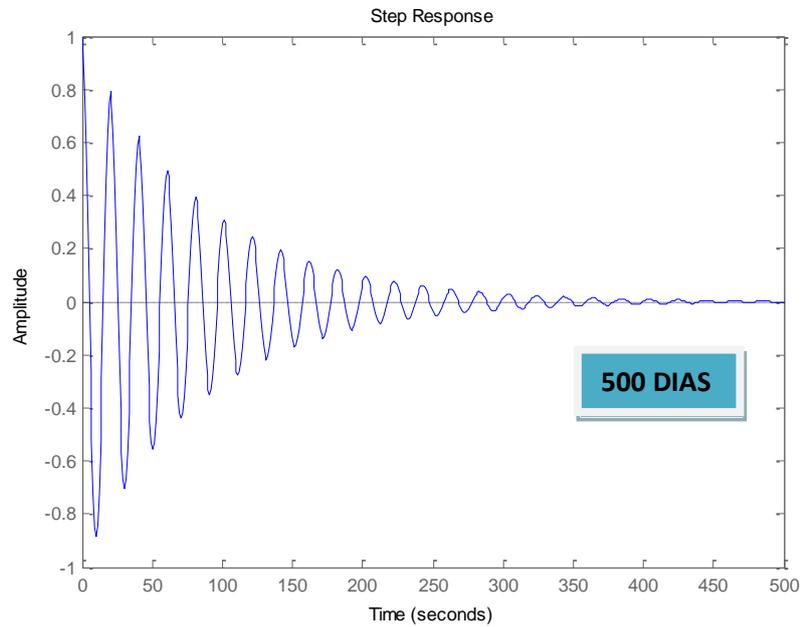


Figura 61. Respuesta temporal con control PD y D=50

- D baja → D=1

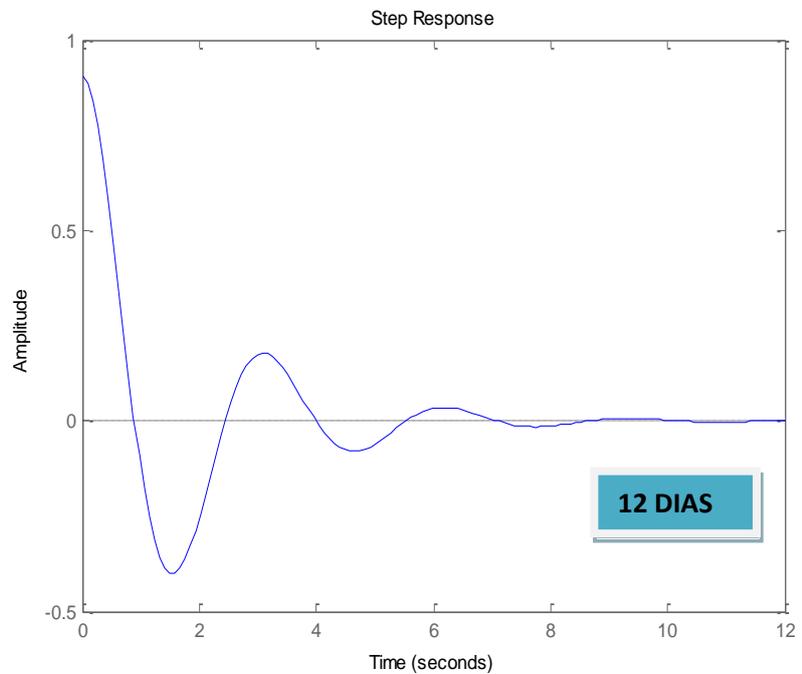


Figura 62. Respuesta temporal con control PD y D=1

- D muy baja → D=0.1

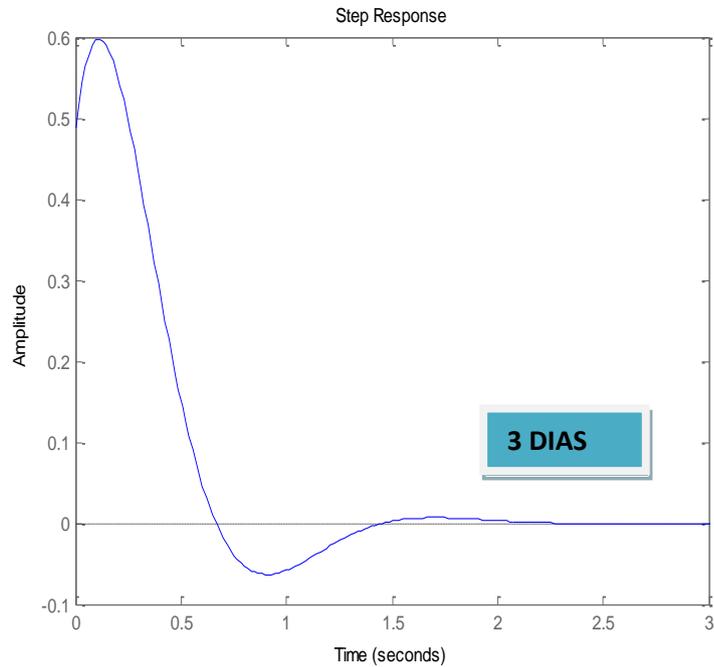


Figura 63. Respuesta temporal con control PD y D=0.1

A medida que el valor de D va siendo menor el sistema es más rápido. Haciendo D=0 es el momento en el que el sistema es más rápido pero coincide entonces con el control proporcional anteriormente estudiado.

Por tanto se puede concluir que con un control PD es imposible conseguir que el sistema sea más rápido que el control proporcional P. A continuación se valorará la opción del PID.

2) CONTROL PID

En este caso el bloque de control es:

$$C(s) = \frac{(Ds + 1) * (Is + 1)}{Is}$$



De la misma forma se estudiarán diferentes casos, desde ambos parámetros con valores altos hasta valores bajos pasando por uno alto y otro bajo y viceversa.

- 'D' e 'I' altos $\rightarrow D=100 ; I=100$

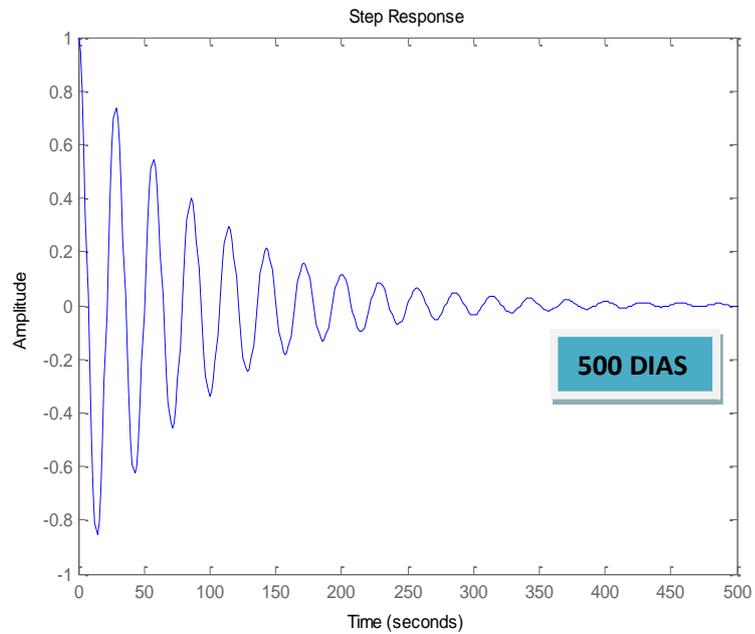


Figura 64. Respuesta temporal con control PID y $D=100$ e $I=100$

- 'D' alto e 'I' bajo $\rightarrow D=100 ; I=1$

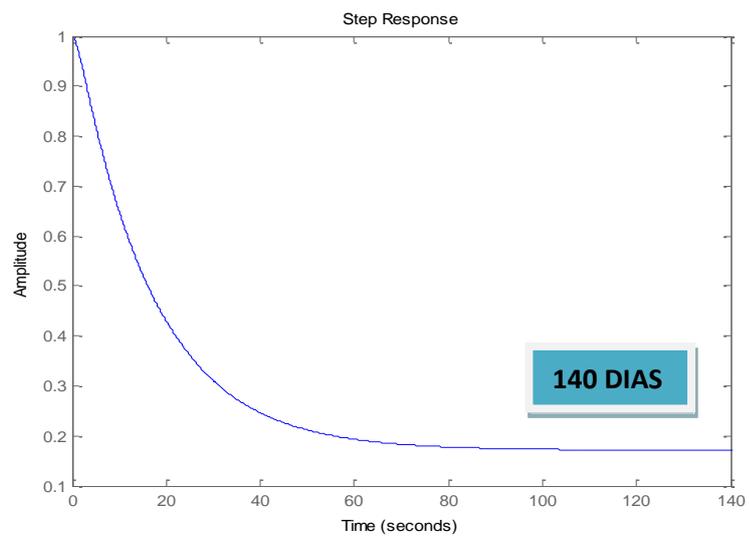


Figura 65. Respuesta temporal con control PID y $D=100$ e $I=1$



- 'D' bajo e 'I' alto $\rightarrow D=1 ; I=100$

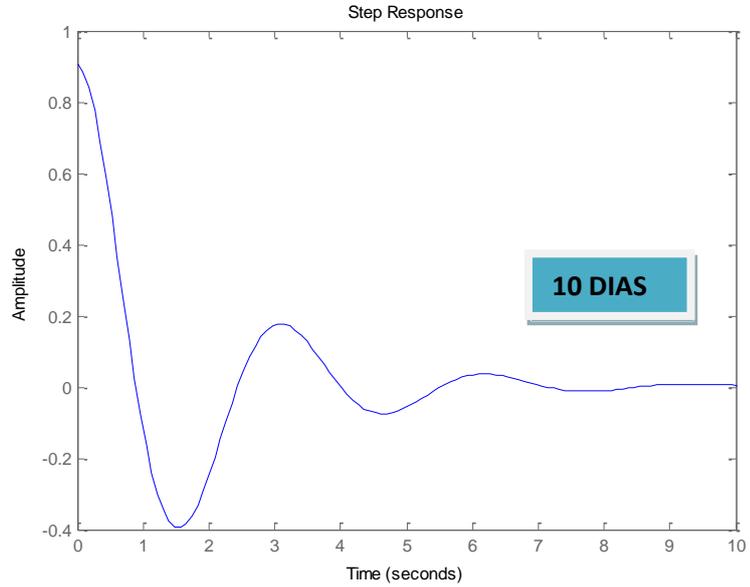


Figura 66. Respuesta temporal con control PID y $D=1$ e $I=100$

- 'D' e 'I' bajos $\rightarrow D=1 ; I=1$

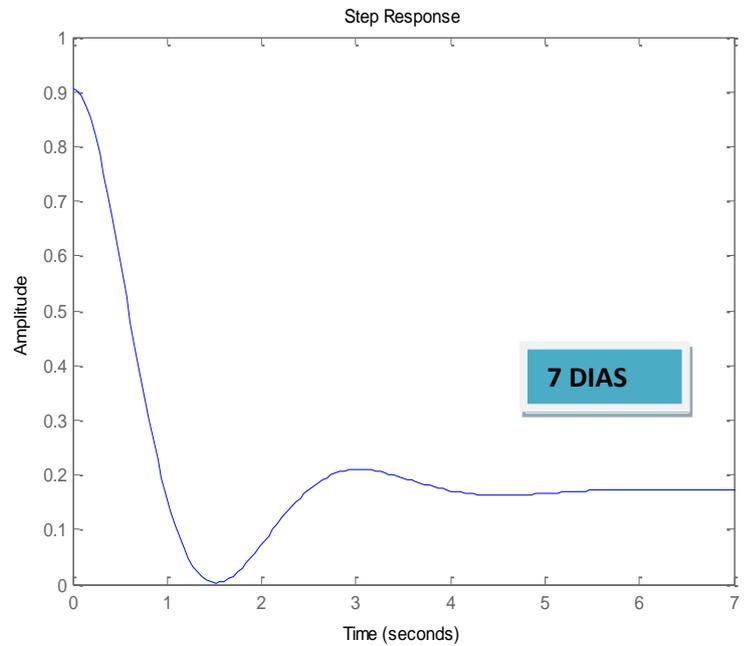


Figura 67. Respuesta temporal con control PID y $D=1$ e $I=1$



Se observa como el caso óptimo es el que ambos valores son bajos, por ello siguiendo esta tendencia se siguen simulando más casos hasta encontrar uno mejor al control proporcional.

- **D=0.25 ; I=0.1**

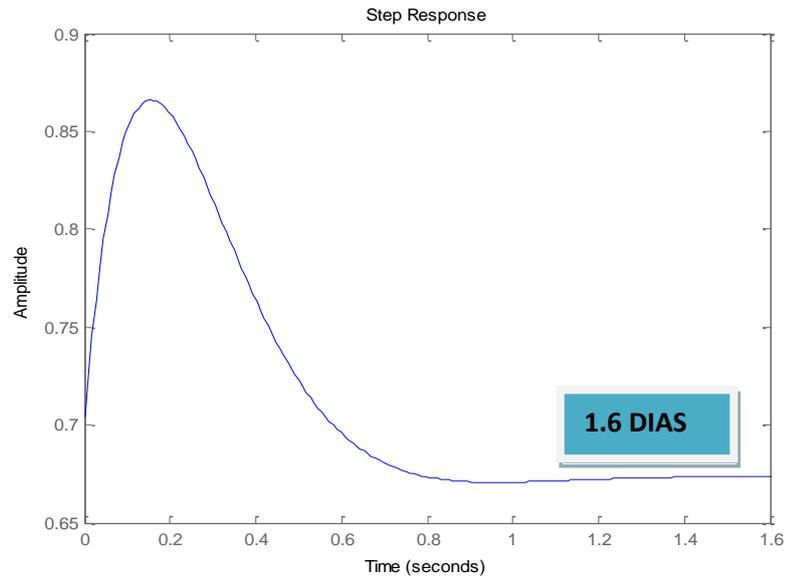


Figura 68. Respuesta temporal con control PID y D=0.25 e I=0.1

- **D=0.1 ; I=0.01**

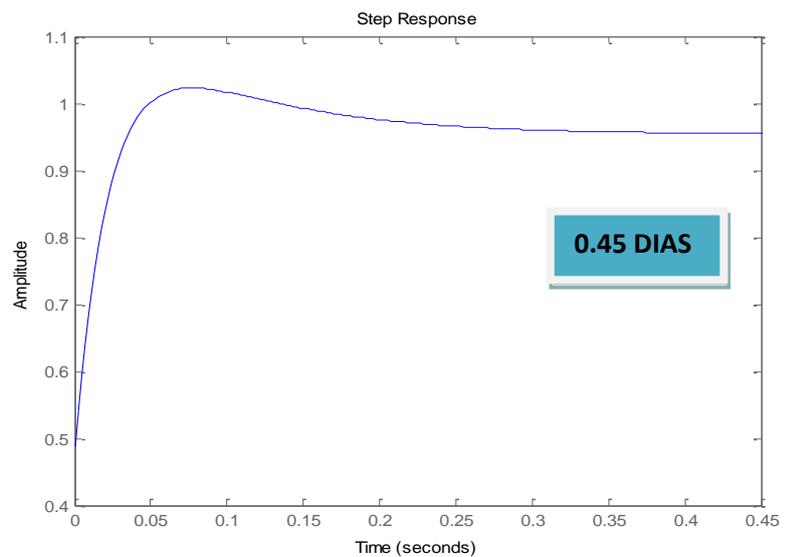


Figura 69. Respuesta temporal con control PID y D=0.1 e I=0.01



Se acaba de obtener un control que proporciona una mayor velocidad de llegada al régimen permanente, concretamente en 0.45 días superando en tres veces la rapidez del control proporcional. El control queda de la siguiente forma:

$$C(s) = (0.1s + 1) * \frac{(0.01s + 1)}{0.01s}$$

Con la ayuda de los valores pico, de régimen permanente e inicial se puede hallar el sobrepaso en este caso y observar si cuadra dentro de las recomendaciones de los controles (**Mp=5-15%**).

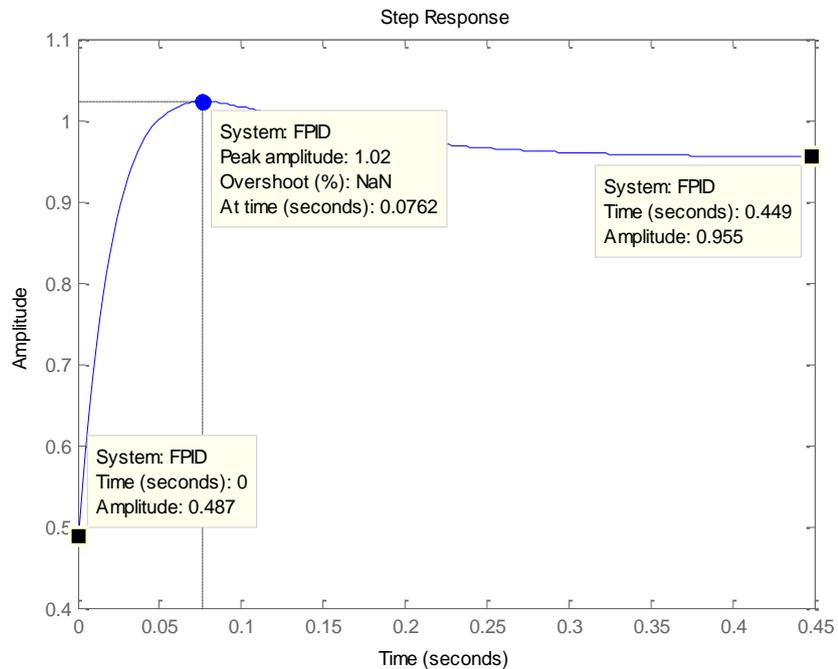


Figura 70. Sobrepaso del sistema con control PID

El valor inicial según la figura anterior es de 0.487, el pico 1.02 y el régimen permanente de 0.955. El sobrepaso será de:

$$Mp = \frac{y_{max} - y_{final}}{y_{final} - y_{inicial}} = \frac{1.02 - 0.955}{0.955 - 0.487} * 100 = 13.89\%$$



Se tiene un sobrepaso del 13.89% que se encuentra dentro de las recomendaciones, por lo que este control cumple con las expectativas.

6.2 Control O.D.

Para el control del Oxígeno Disuelto se utiliza la ecuación de Eckenfelder and McCarty que es una simplificación de la que se tenía con la finalidad de conseguir la linealidad necesaria para conseguir obtener la planta.

$$\frac{dO_2}{dt} = a \cdot D_0 \cdot \frac{Q_r}{Q_f} + b \cdot X \cdot \frac{dQ_r}{dt}$$

Siendo los parámetros a y b empíricos y de valores 0.6 y 0.04 respectivamente. Aplicando Laplace a la ecuación anterior, sustituyendo los valores conocidos y agrupando la ecuación en la forma que se desea se obtiene la siguiente planta para el control de la OD:

$$P_{OD}(s) = \frac{C_{O_2}}{Q_r} = \frac{0.04 + 55.6s}{s}$$

Se realiza el gráfico de Nichols de esta planta para observar si cumple con las especificaciones usuales de los controles, tal y como se hizo en el caso del control de la DQO.

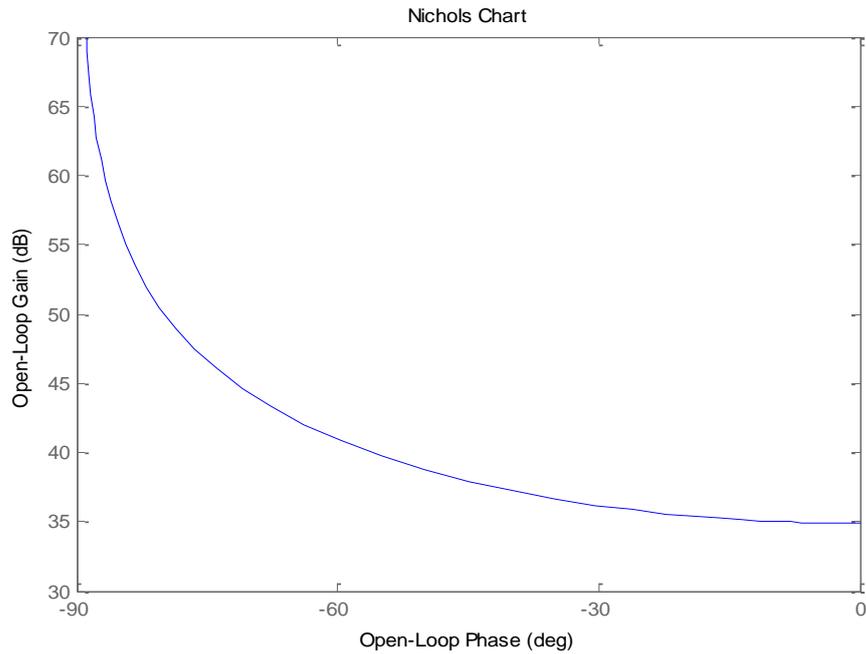


Figura 71. Diagrama Nichols para el control OD

Se puede ver cómo esta vez es necesario un control proporcional con un valor de $K < 1$ para conseguir bajar la gráfica y que corte por 0 dB.

Utilizando un control de valor $K = 0.0125$ se consigue el siguiente gráfico.

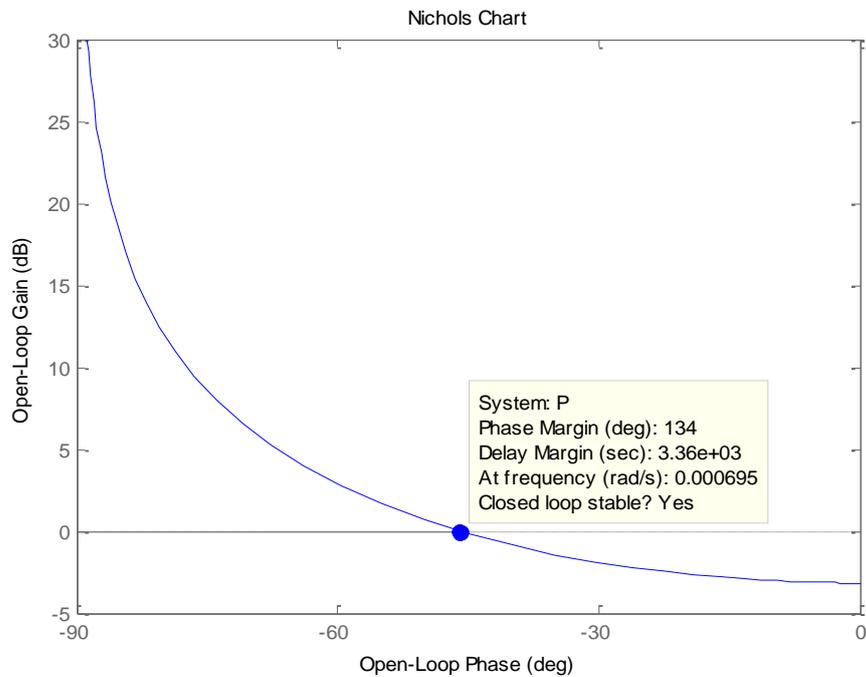


Figura 72. Diagrama de Nichols con $K = 0.0125$



El margen de fase, igual que con el control DQO, será siempre mayor que 45° , y el margen de ganancia al no cortar con -180° también cumplirá las especificaciones.

El objetivo de este control es mantener constante el oxígeno disuelto con el fin de que los microorganismos sobrevivan en el reactor biológico y por ello el control deberá proporcionar un tiempo de régimen permanente pequeño. Es decir, volver a encontrar un control rápido.

Estudiando la respuesta temporal, la respuesta ante un escalón del sistema de lazo cerrado es el siguiente:

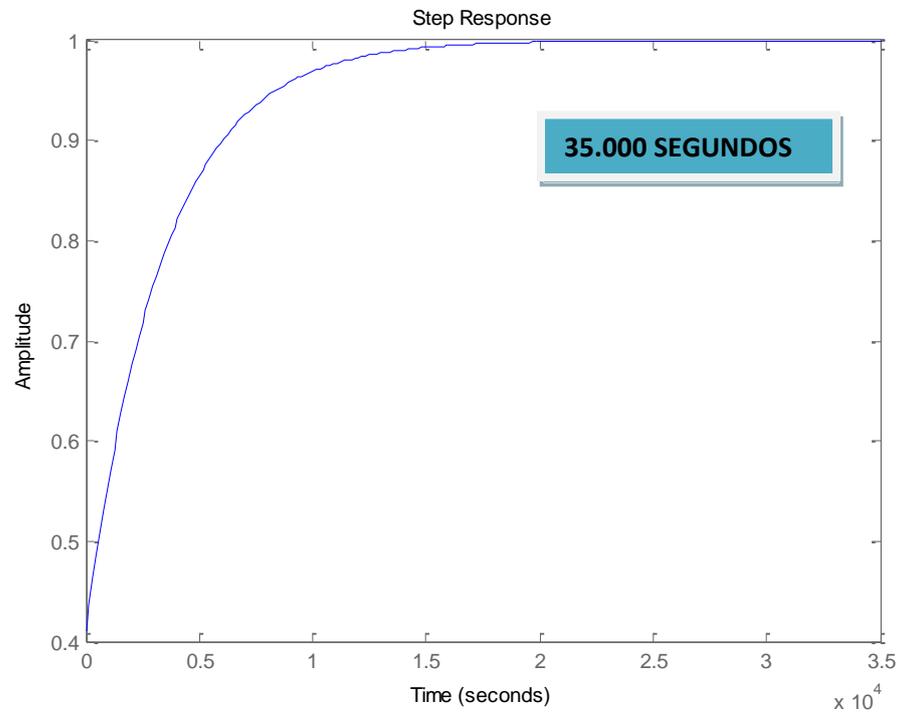


Figura 73. Respuesta temporal del sistema con control P

Se tiene un tiempo de respuesta enorme y por ello se necesita un control más rápido, las opciones serán las mismas que en el caso de la DQO, usar o un control proporcional diferencial (PD) o un control proporcional diferencial integral (PID).



1) CONTROL PD

Probando con diferentes valores del parámetro D se observará cuál de ellos es el apropiado para el control.

- D muy alta $\rightarrow D=1000$

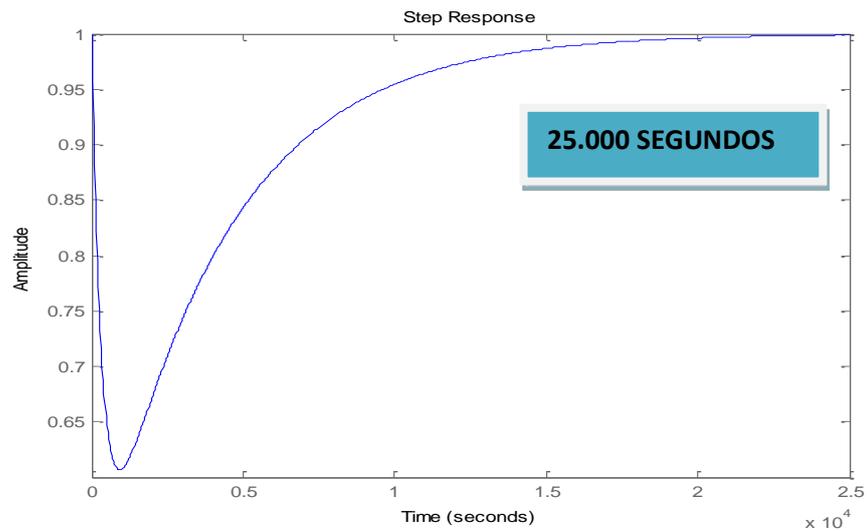


Figura 74. Respuesta temporal con control PD y D=1000

- D alta $\rightarrow D=100$

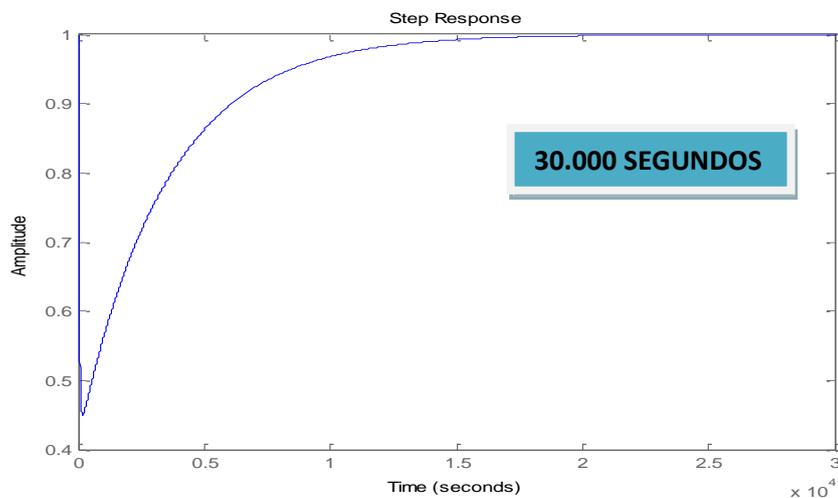


Figura 75. Respuesta temporal con control PD y D=100



- D media \rightarrow D=50

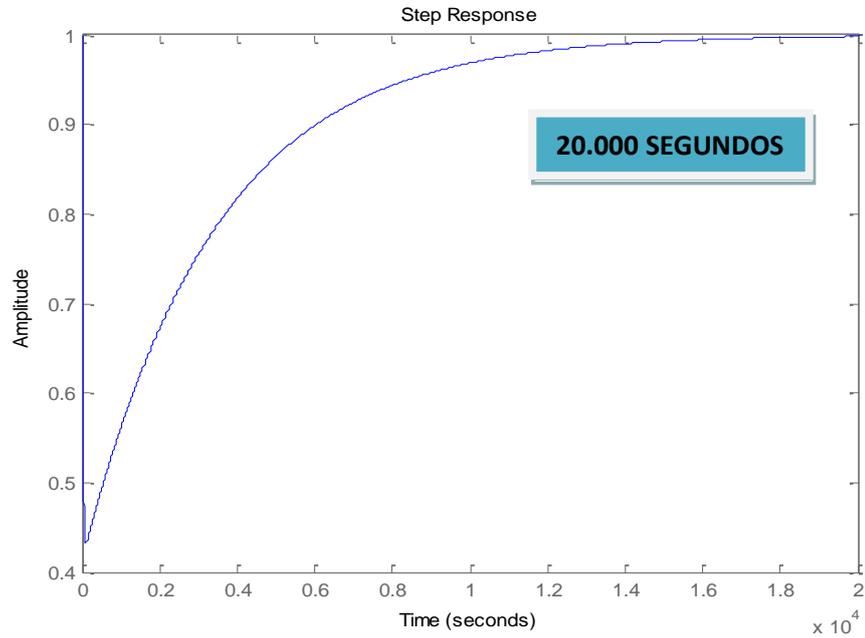


Figura 76. Respuesta temporal con control PD y D=50

- D baja \rightarrow D=1

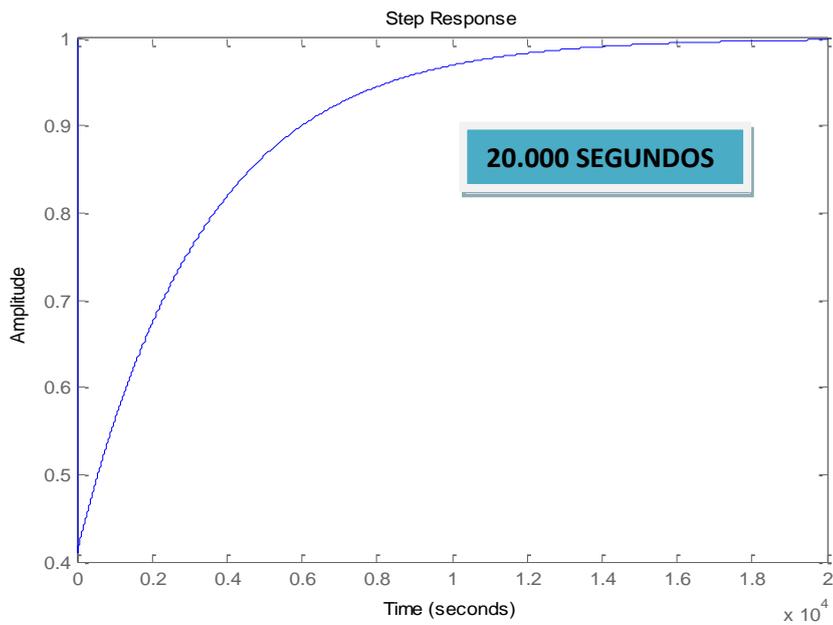


Figura 77. Respuesta temporal con control PD y D=1



- D muy baja $\rightarrow D=0.1$

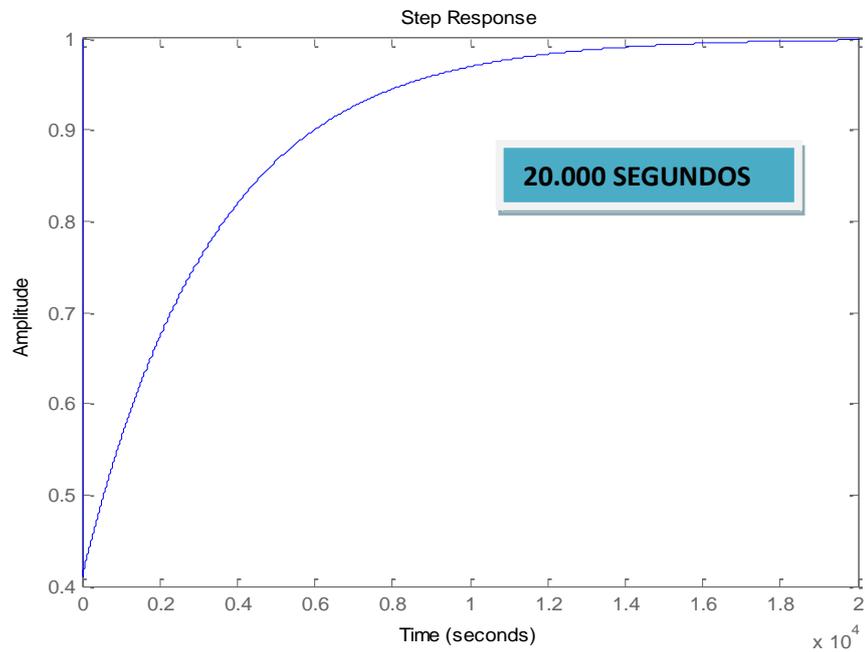


Figura 78. Respuesta temporal con control PD y $D=0.1$

Se consigue disminuir el tiempo pero no lo suficiente por lo que el control PD no es el adecuado para el oxígeno disuelto.

2) CONTROL PID

El procedimiento es el mismo, dependiendo de los valores de los parámetros del control se obtendrá una respuesta u otra hasta encontrar la que nos aporte mayor rapidez.



- 'D' e 'I' altos $\rightarrow D=100 ; I=100$

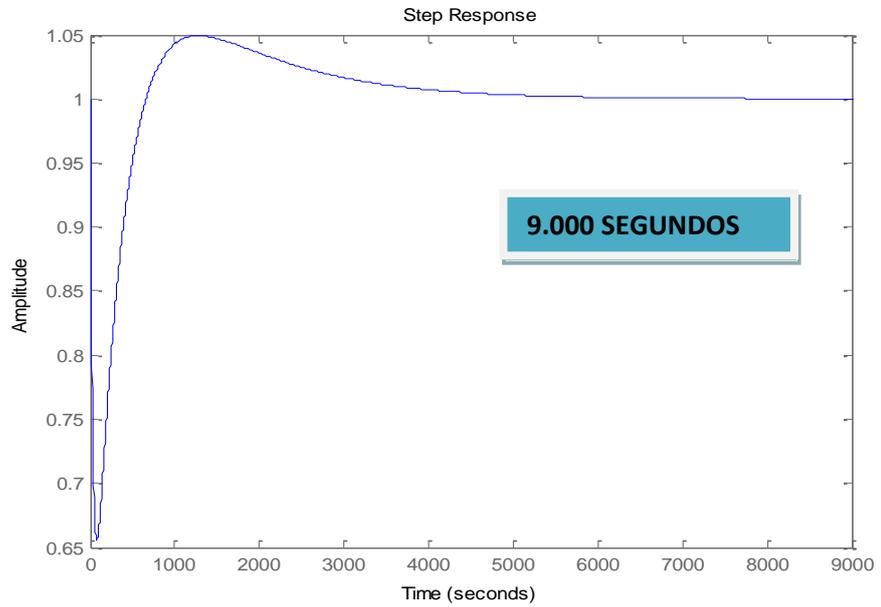


Figura 79. Respuesta temporal con control PID con $D=100$ e $I=100$

- 'D' alto e 'I' bajo $\rightarrow D=100 ; I=1$

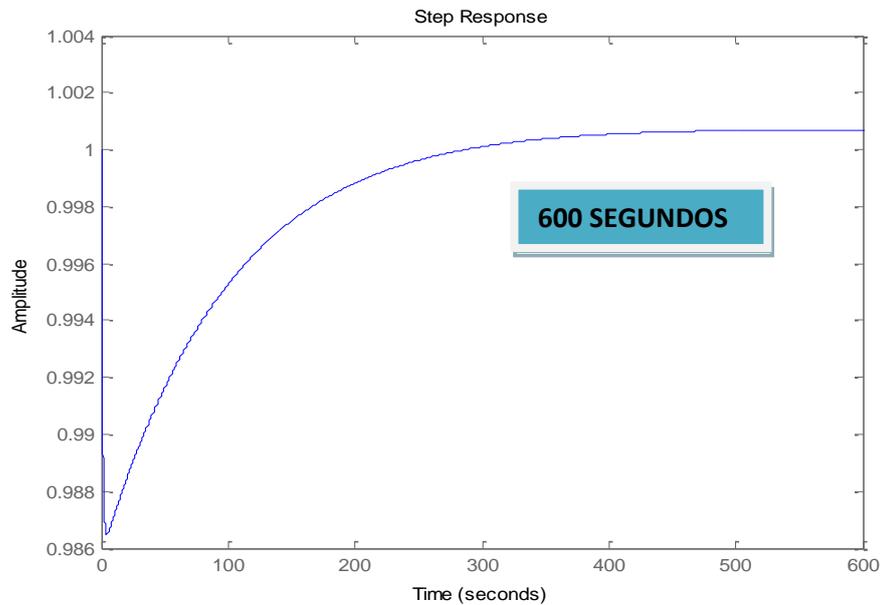


Figura 80. Respuesta temporal con control PID con $D=100$ e $I=1$



- “D’ bajo e ‘I’ alto $\rightarrow D=1 ; I=100$

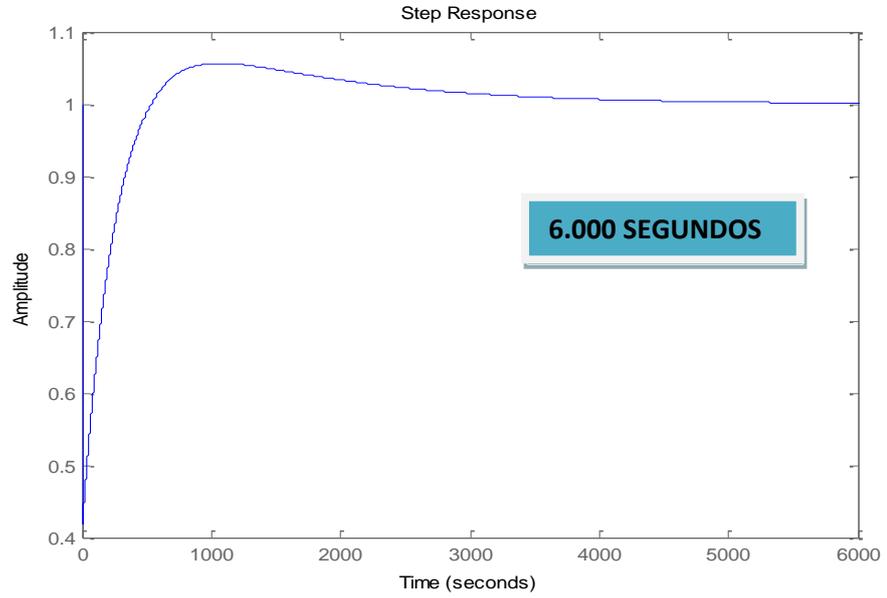


Figura 81. Respuesta temporal con control PID con $D=1$ e $I=100$

- ‘D’ e ‘I’ bajos $\rightarrow D=1 ; I=1$

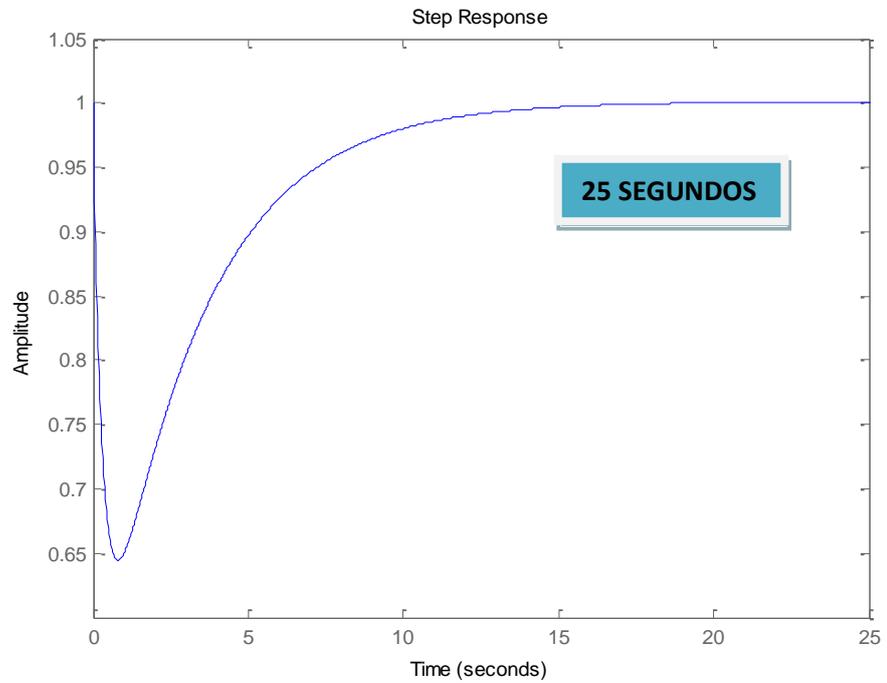


Figura 82. Respuesta temporal con control PID con $D=1$ e $I=1$



Se observa como el mejor caso es en el que ambos valores son bajos, reduciendo mucho el tiempo hasta un valor de 25 segundos que es un valor más razonable que los obtenidos primero en torno a 30.000 segundos.

Siguiendo con esta tendencia se sigue simulando hasta encontrar el sistema más rápido.

- **D=0.5 ; I=0.02**

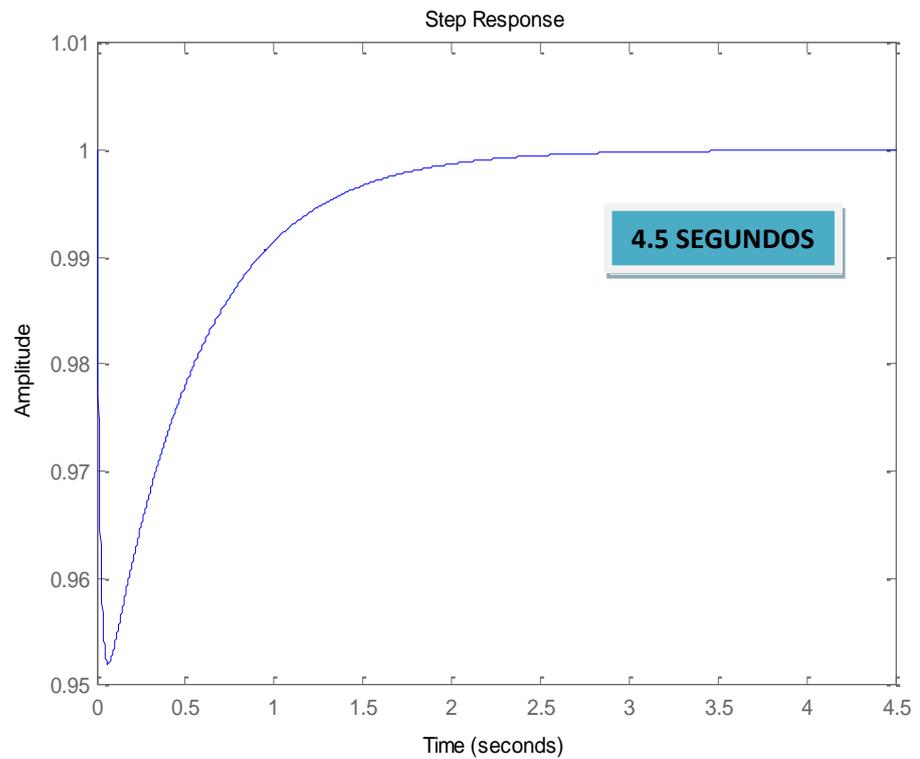


Figura 83. Respuesta temporal con control PID con D=0.5 e I=0.02



- **D=0.25 ; I=0.01**

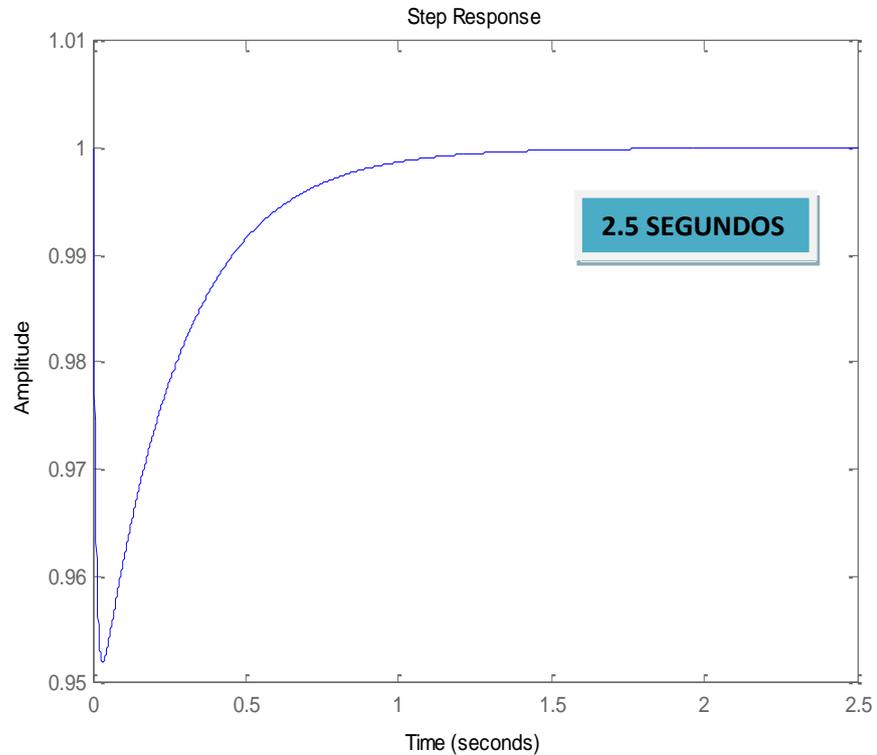


Figura 84. Respuesta temporal con control PID con D=0.25 e I=0.01

Se ha conseguido reducir el tiempo de régimen permanente a 2,5 segundos, lo que implica una reducción importantísima respecto al que teníamos con el control proporcional y con el control PD. El control definitivo es el siguiente:

$$C(s) = 0.0125 * \frac{(1 + 0.25s) * (1 + 0.01s)}{0.01s}$$

Para concluir se observa como no hay sobrepaso por lo que cumple con las especificaciones de la respuesta temporal de los controles.



7. REFERENCIAS

- [MART05] Sergio Alejandro Martínez Delgadillo, *Tratamiento de aguas residuales con MATLAB*. (2005).
- [GIL13] Manuel Gil Rodríguez, *Depuración de aguas residuales (Modelización de procesos de lodos activos)*. (2013).
- [LUIS06] Francisco Luis Pagola, *Regulación Automática*. (2006).
- [CONT06] Alfonso Contreras López, *Ciencia y Tecnología del Medioambiente*. (2006).
- [MARÍ03] Rafael Marín Galvín, *Fisicoquímica y microbiología de los medios acuáticos (Tratamiento y control de calidad de aguas)*. (2003).
- [ISLA05] Ricardo Isla de Juana, *Proyectos de plantas de tratamiento de aguas*. (2005).
- <http://www.greenfacts.org/es/recursos-hidricos/l-2/2-disponibilidad.htm>
- http://www.academia.edu/4812694/Historia_y_vicisitudes_del_agua_en_el_planeta_tierra
- <http://www.cuidoelagua.org/empapate/origendelagua/tiposagua.html>
- http://www.agua.org.mx/h2o/index.php?option=com_content&view=category&id=16&Itemid=300016
- <http://biologia.laguia2000.com/bioquimica/el-agua-propiedades-quimicas>
- <http://www.agua.org.mx/index.php/el-agua/ques/propiedadesquimicas>
- <http://iiquimica.blogspot.com.es/2010/02/contaminacion-del-agua.html>
- <http://www4.tecnun.es/asignaturas/Ecologia/Hipertexto/11CAgu/120P rocC.htm#POBLACION>