

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA
UNIVERSITAT DE VALENCIA

**OPTIMIZACIÓN DE LA ELIMINACIÓN
BIOLÓGICA DE NITROGENO (BNR) EN UN
PROCESO BARDENPHO MODIFICADO
MEDIANTE UN CONTROLADOR DE AIREACIÓN
BASADO EN SONDA DE AMONIO (ABAC)**

MÁSTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL

ALUMNO: Dña. Sonia Pérez Figueroa

TUTORA: Dr. Aurora Seco Torrecillas

TUTOR: Dr. Ángel Robles Martínez

Valencia, Septiembre de 2017



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA



UNIVERSITAT
DE VALÈNCIA



OPTIMIZACIÓN DE LA ELIMINACIÓN BIOLÓGICA DE NITROGENO (BNR) EN UN PROCESO BARDENPHO MODIFICADO MEDIANTE UN CONTROLADOR DE AIREACIÓN BASADO EN SONDA DE AMONIO (ABAC).

El aumento de la población a nivel mundial trae consigo un consumo de recursos disponibles por encima de las posibilidades de cada país. Es por ello que con el paso del tiempo se ha visto necesaria la implicación de cada país con el objetivo de gestionar de la mejor manera posible el consumo de dichos recursos. Uno de los problemas más importantes es la necesidad de tratar el agua residual procedente de los núcleos urbanos e industriales, con el fin de dar una calidad adecuada a la misma con anterioridad a ser vertida al cauce público.

Los sistemas de control en las estaciones de depuración de aguas residuales (EDAR) desempeñan un papel importante ya que el agua residual afluyente presenta una variabilidad en cuanto a composición, caudal y carga contaminante, es por esta razón que en la actualidad ha despertado un gran interés.

En el presente trabajo se estudia el comportamiento de una EDAR basada en el esquema de tratamiento Bardenpho modificado. Además, se utiliza el modelo BSM1 (*Del inglés: Benchmark Simulation Model N°1*) para estudiar el efecto de la dinámica del afluyente sobre el proceso y el modelo BNRM2 (*Del inglés: Biological Nutrient Removal Model N°2*) para simular el esquema de tratamiento. Mediante el software DESASS, se ha implementado la EDAR estudio.

Se ha implementado, calibrado y validado un sistema de control mediante el software LoDif BioControl, con el objetivo de optimizar el proceso de eliminación biológica de nitrógeno, mediante un controlador de aireación basado en sonda de amonio ABAC (*Del Inglés: Ammonia – Based Aeration Control*).

ALUMNO: Dña. Sonia Pérez Figueroa

TUTORA: Dr. Aurora Seco Torrecillas

TUTOR: Dr. Ángel Robles Martínez

Valencia, Septiembre de 2017

OPTIMIZING NITROGEN BIOLOGICAL REMOVAL (BNR) IN BARDENPHO PROCESS THROUGH AMMONIA-BASED AERATION CONTROLLERS (ABAC)

The increase of the population at a global level consumes a consumption of available resources above the possibilities of each country, it is for that reason, that with the passage of time it has been necessary the implication by each country, of management in the best possible way. The most important problems is the need to treat wastewater from urban and industrial centers, in order to give adequate quality to the same before being poured into the public waterway.

Control systems at sewage treatment plants (WWTPs) play an important role since the influent waste water has a variability in composition, flow rate and pollutant load, which is why it has now aroused a great deal of interest.

This study the behavior of an EDAR based on the modified Bardenpho treatment scheme is studied. In addition, the models BSM1 (*Benchmark Simulation Model No. 1*) is used to study the effect of the affluent dynamics on the process and the model BNRM2 (Biological Nutrient Removal Model No. 2) to simulate the treatment scheme. Through the DESASS software, the EDAR study has been implemented.

A control system has been implemented, calibrated and validated by the software LoDif BioControl, with the objective of optimizing the process of biological nitrogen elimination, by means of an aeration controller based on ammonia probe ABAC (Ammonia - Based Aeration Control).

STUDENT: Dña. Sonia Pérez Figueroa

TUTOR: Dr. Aurora Seco Torrecillas

TUTOR: Dr. Ángel Robles Martínez

Valencia, September of 2017

TABLA DE CONTENIDO

I. INTRODUCCIÓN 13

I.1. ANTECEDENTES 14

 I.1.1. LEGISLACIÓN 14

 I.1.2. CONTEXTO GENERAL 16

 I.1.3. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA 16

I.2. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES 17

 I.2.1 COMPOSICIÓN DEL AGUA RESIDUAL URBANA 17

 I.2.2 TRATAMIENTOS BIOLÓGICOS DE DEPURACIÓN 19

 I.2.3 MODELACIÓN MATEMÁTICA DE LOS SISTEMAS DE FANGOS ACTIVADOS 30

 I.2.4 PLATAFORMAS DE SIMULACIÓN 33

I.3. INSTRUMENTACIÓN, CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN DE UNA EDAR 35

 I.3.1 INSTRUMENTACIÓN EN EDAR 36

 I.3.2 CONTROL DE UNA EDAR 36

 I.3.3 AUTOMATIZACIÓN EN EDAR 40

II. OBJETIVOS 45

III. MATERIALES Y MÉTODOS 47

III.1. ESTACIÓN DE DEPURACIÓN DE AGUA RESIDUAL 47

 III.1.1 CASO DE ESTUDIO 47

 III.1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO Y OPERACIÓN DE LA EDAR 49

 III.1.3 CARACTERIZACIÓN DEL AGUA 50

III.2. MODELO BNMR2 (BIOLOGICAL NUTRIENT REMOVAL MODEL No.2) 51

III.3. MODELO BSM1 (BENCHMARK SIMULATION MODEL No.1) 55

III.4. DESASS 57

III.5. LoDif BioControl 60

 III.5.1 SISTEMA DE CONTROL DE LA AIREACIÓN 61

 III.5.2 SISTEMA DE CONTROL DE NUTRIENTES (ABAC) 63

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 66

IV.1. DISEÑO DEL ESQUEMA DE TRATAMIENTO EN ESTADO ESTACIONARIO 66

 IV.1.1 CARACTERIZACIÓN DEL AGUA EFLUENTE 66

 IV.1.2 DISEÑO DEL ESQUEMA DE TRATAMIENTO 68

 IV.1.3 CALIBRACIÓN DEL MODELO BNRM2 70

 IV.1.4. DISEÑO DEL SISTEMA DE AIREACIÓN 71

 IV.1.5. RESULTADOS DE SIMULACIÓN 73

IV.2. SIMULACIÓN DINÁMICA DEL SISTEMA 73

 IV.2.1. COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA EN MODO DINÁMICO 74

IV.3. DISEÑO Y SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL 77

 IV.3.1 IMPLEMENTACIÓN Y CALIBRACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL 77

 IV.3.2 FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE CONTROL 85

 IV.3.3. RESULTADOS DEL FUNCIONAMIENTO 97

V. CONCLUSIONES 105

VI. BIBLIOGRAFIA 107

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Requisitos de vertido para la EDAR urbana.....15

Tabla 2: Requisitos de vertido para EDAR en zona sensible, Directiva 91/2711/CEE.....15

Tabla 3: Rango de concentraciones típicas para vertido – McGraw Hill 1997.....17

Tabla 4: Datos relevantes del diagrama de flujo..... 49

Tabla 5: Datos de caracterización del agua de entrada..... 50

Tabla 6: Caracterización del agua de entrada utilizada en DESASS.....66

Tabla 7: Parámetros estequiométricos introducidos en DESASS.....67

Tabla 8: Características físicas del reactor biológico.....68

Tabla 9: Características físicas del decantador.....69

Tabla 10: Datos necesarios para el cálculo de DESAS.....69

Tabla 11: Datos de los difusores en el sistema de aireación implementado.....72

Tabla 12: Datos de los difusores en el sistema de aireación implementado.....72

Tabla 13: Datos de las soplantes en el sistema de aireación implementado..... 72

Tabla 14: Consignas establecidas frente a rango de consignas para el control de nutrientes..... 94

Tabla 15: Consumo energético por día en comparando varias simulaciones..... 98

Tabla 16: Concentración de nitrógeno total promedio por día de varias simulaciones100

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Variación del caudal de entrada a la EDAR en tanto por uno.....55

Gráfico 2: Variación del caudal de entrada a la EDAR tras realizar el producto entre la dinámica de entrada de caudal en tanto por uno y el valor promedio de caudal afluente a la EDAR estudiada.....55

Gráfico 3: Variación del amonio de entrada a la EDAR.....56

Gráfico 4: Evolución de la Demanda Biológica de Oxígeno Soluble a lo largo del sistema.....74

Gráfico 5: Evolución de la concentración de Nitrógeno Total en el sistema.....75

Gráfico 6: Evolución de la concentración de amonio en el sistema.....75

Gráfico 7: Evolución de la concentración de Nitrato en el sistema.....76

Gráfico 8: Consumo energético comparando el sistema sin control de oxígeno y el sistema de control de oxígeno.....98

Gráfico 9: Consumo energético comparando el sistema sin control de oxígeno y el sistema de control de amonio.....99

Gráfico 10: Consumo energético comparando el sistema del control de oxígeno y el sistema de control de amonio.....100

Gráfico 11: Concentración de nitrógeno total comparando el sistema sin control de oxígeno y el sistema de control de oxígeno..... 101

Gráfico 12: Concentración de nitrógeno total comparando el sistema sin control de oxígeno y el sistema de control de amonio.....102

Gráfico 13: Concentración de nitrógeno total comparando el sistema del control de oxígeno y el sistema de control de amonio.....103

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Fracciones de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) en aguas residuales.....	18
Figura 2: Fracciones de nitrógeno en aguas residuales.....	18
Figura 3: Fracciones de fósforo en aguas residuales.....	18
Figura 4: Esquema básico de fangos activados.....	19
Figura 5: Proceso de nitrificación.....	21
Figura 6: Proceso de desnitrificación.....	23
Figura 7: Reactor en mezcla completa (CMFR).....	24
Figura 8: Reactor en flujo pistón.....	24
Figura 9: Reactor en flujo discontinuo (SBR).....	25
Figura 10: Bioreactor de membrana (MBR).....	25
Figura 11: Diagrama del proceso A/O.....	26
Figura 12: Diagrama de procesos A2/O.....	26
Figura 13: Diagrama de proceso Ludzack modificado-Ettinger.....	27
Figura 14: Diagrama de proceso Bardenpho.....	27
Figura 15: Diagrama de proceso Bardenpho modificado.....	27
Figura 16: Diagrama de proceso del canal de oxidación.....	28
Figura 17: Diagrama de proceso Johannesberg.....	28
Figura 18: Modelación del proceso matemático.....	31
Figura 19: Proceso de control por retroalimentación	37

Figura 20: Componentes del controlador (PID).....37

Figura 21: Respuestas del controlador (PID).....38

Figura 22: Proceso de control por anticipación.....38

Figura 23: Etapas para la toma de decisión.....39

Figura 24: Integración de la Instrumentación, Control y Automatización básica en una EDAR.....41

Figura 25: Comparación entre una asociación tradicional (Izquierda) y una asociación OPC (derecha).....43

Figura 26: Localización de la Estación de Depuración de Aguas Residuales.....47

Figura 27: Descripción de la Estación Depuradora de Aguas Residuales.....48

Figura 28: Reactor biológico de la EDAR estudio.....48

Figura 29: Esquema de la línea de aguas de la EDAR estudio en DESASS..... 49

Figura 30: Etapas a seguir para la calibración y validación de los fangos activados en DESASS.....59

Figura 31: Estructura básica del control del sistema de aireación (Ruano et al., 2013).....62

Figura 32: Estructura básica del control de aireación de oxígeno.....63

Figura 33: Estructura básica del control de aireación de amonio.....63

Figura 34: Apartado de Dotaciones y Temperatura de DESASS, en esta pestaña se ha introducido los datos de caudal, factor punta y pH.....67

Figura 35: Apartado de Cargas de DESASS, en esta pestaña se han introducido las cargas del agua de entrad.....68

Figura 36: Esquema de tratamiento inicial en DESASS equiparable al modelo BSM2.....69

Figura 37: Constantes cinéticas de las bacterias Autótrofas en DESASS.....70

Figura 38: Constantes cinéticas de las bacterias Autótrofas para nitrificación en dos etapas en DESASS.....71

Figura 39: Comparación de los datos reales de salida frente a datos simulados en DESASS.....73

Figura 40: Esquema de la EDAR estudio a implementar el sistema de control configurado a la línea de aguas con el sistema de aireación.....73

Figura 41: Ventana de selección del servidor OPC a utilizar para la conexión de LoDif BioControl con la EDAR real o virtual.....77

Figura 42: Ventana de selección de los grupos de control del sistema en LoDif BioControl.....78

Figura 43: Ventana para la asignación de los ITEMS del servidor OPC en LoDif BioControl78

Figura 44: SCADA del proyecto en LoDif BioControl para la visualización de los valores del sistema79

Figura 45: Pantalla de configuración de las curvas de lógica difusa para el control de oxígeno en la zona Anóxica/Aerobia con LoDif BioControl.....79

Figura 46: Pantalla de configuración de las curvas de lógica difusa para el control de oxígeno en la zona A del reactor aerobio con LoDif BioControl.....80

Figura 47: Pantalla de configuración de las curvas de lógica difusa para el control de oxígeno en la zona B del reactor aerobio con LoDif BioControl.....80

Figura 48: Pantalla de configuración de las curvas de lógica difusa para el control de oxígeno en la zona C del reactor aerobio con LoDif BioControl.....81

Figura 49: Pantalla de configuración de las curvas de lógica difusa para el control de oxígeno en la zona D del reactor aerobio con LoDif BioControl.....81

Figura 50: Pantalla de configuración de curvas de lógica difusa para el controlador de presión de consigna por error de oxígeno en LoDif BioControl.....82

Figura 51: Pantalla de LoDif Biocontrol para la asignación de las funciones de pertenencia para incrementar los Hz de cada soplantes variando el centro y la apertura de las curvas.....82

Figura 52: Pantalla de LoDif BioControl para la asignación de las funciones de pertenencia para el incremento de la consigna de OD para el sistema de control de nutrientes, variando el centro y la apertura de las curvas.....83

Figura 53: Pantalla de LoDif BioControl para la asignación de las funciones de pertenencia para el incremento de la consigna de OD para el sistema de control de nutrientes, variando el centro y la apertura de las curvas.....84

Figura 54: Pantalla de LoDif Biocontrol para la asignación de las funciones de pertenencia para el error del amonio para el sistema de control de nutrientes variando el centro y la apertura de las curvas.....84

Figura 55: Pantalla de LoDif Biocontrol para la asignación de las funciones de pertenencia para la acumulación del error del amonio para el sistema de control de nutrientes variando el centro y la apertura de las curvas.....85

Figura 55: Gráfico de control de oxígeno en la zona Anóxica / Aerobia85

Figura 56: Gráfico de control de oxígeno en el reactor aerobio (Zona A).....86

Figura 57: Gráfico de control de oxígeno en el reactor Aerobio (Zona B).....87

Figura 58: Gráfico de control de oxígeno en el reactor Aerobio (Zona C).....87

Figura 59: Gráfico de control de oxígeno en el reactor Aerobio (Zona D)..... 88

Figura 60: Gráfico que informa sobre el funcionamiento del sistema de control de la presión e lo que respecta a las válvulas que entran en funcionamiento durante la simulación..... 89

Figura 61: Gráfico sobre el funcionamiento del sistema de control de la presión junto con el valor de presión de consigna con control de nutrientes 89

Figura 62: Gráfico de control de oxígeno en la zona Anóxica / Aerobia con control de nutrientes.....90

Figura 63: Gráfico de control de oxígeno en el reactor Aerobio (Zona A) con control de nutrientes.....91

Figura 64: Gráfico de control de oxígeno en el reactor Aerobio (Zona B) con control de nutrientes..... 92

Figura 65: Gráfico de control de oxígeno en el reactor Aerobio (Zona C) con control de nutrientes.....93

Figura 66: Gráfico de control de oxígeno en el reactor Aerobio (Zona D) con control de nutrientes.....94

Figura 67: Gráfico que informa sobre el funcionamiento del sistema de control de la presión en lo que respecta a las válvulas que entran en funcionamiento durante la simulación con control de nutrientes96

Figura 68: Gráfico sobre el funcionamiento del sistema de control de la presión junto con el valor de presión de consigna con control de nutrientes.....96

I. INTRODUCCIÓN

I. INTRODUCCIÓN

La evolución de las poblaciones y la actividad industrial tiene como consecuencia un aumento significativo del consumo de agua, siendo por esta razón el consumo de recursos hídricos y la contaminación del medio acuático cada vez mayor. Las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDAR) son una mejora ya que con ellas se puede regenerar el agua usada procedente del uso doméstico e industrial y verter de forma controlada al cauce público. El agua residual urbana en la mayor parte de los casos, está formada por agua residual procedente de alcantarillado municipal, industria y agua de lluvia. Por esta razón, el vertido de estas aguas sin tratar produce efectos muy negativos, por ejemplo: acumulación de sólidos (arena y materia orgánica), olores, compuestos tóxicos de las industrias, consumo del oxígeno disponible y eutrofización por parte de los nutrientes (fósforo y nitrógeno) en ríos y embalses.

Los principales objetivos que presenta una EDAR son:

- Eliminación de materia orgánica.
- Eliminación de compuestos amoniacales y con contenido de fósforo.
- Transformación de los residuos retenidos en fangos estables y su disposición.
- Eliminación de residuos, aceites, grasas, flotantes, arenas, etc. y su evacuación.
- Eliminación de materias decantables, orgánicas e inorgánicas.

La contaminación presente en el agua residual es una combinación de compuestos orgánicos e inorgánicos. Las aguas residuales tratadas aun contienen nitrógeno y fósforo, es por eso que el vertido de estos nutrientes al cauce público pueden provocar la eutrofización de ríos, lagos y embalses. Además, una elevada concentración de nitrógeno puede disminuir la concentración de oxígeno disuelto en las aguas receptoras, toxicidad para la vida acuática, efectos negativos sobre la efectividad de la desinfección con cloro, peligro para la salud pública y efectos sobre el potencial de un agua residual para ser reutilizada.

Por otra parte, la gestión del control de nutrientes es importante para evaluar las características del agua bruta, así como el tipo de instalación de tratamiento del agua residual y el nivel de control de nutrientes. Además, se deberá de tener en cuenta si las necesidades de eliminación de nutrientes en el sistema son puntuales o abarcan un ciclo anual, haciéndose necesario el control y automatización de procesos para controlar la eliminación de nutrientes por vía biológica permitiendo una optimización del proceso y una reducción en costes.

I.1. ANTECEDENTES

La actividad humana requiere de forma inevitable el uso de agua, lo que provoca que su calidad se degrade. Las aguas degradadas son conocidas como aguas residuales y es necesario darles un tratamiento tras su uso para disminuir su carga contaminante. Con esto se consigue restaurar la calidad inicial antes de devolverla a los ciclos naturales, minimizando el impacto ambiental de las actividades humanas.

La depuración de aguas residuales cada vez está tomando mayor importancia, debido a que desde años atrás la construcción de plantas de aguas residuales a incrementado notablemente. A todo esto se suma la necesidad de la reutilización de agua residual tratada para otros usos como: el riego de jardines, refrigeración industrial, procesos de lavados industriales, etc.

Las aguas procedentes de la red de saneamiento son tratadas en las estaciones depuradoras de aguas residuales donde, una vez eliminadas las sustancias nocivas se reintegran a los cauces fluviales en condiciones de calidad óptimas o se permite la posibilidad de su reutilización.

En el proceso de tratamiento del agua en una EDAR se diferencian varias etapas: pozo de gruesos, desbaste, desarenado/desengrasado, decantación primaria, tratamiento biológico, decantación secundaria, tratamiento de fangos.

Cuando hablamos de agua que está contaminada en general, se hace referencia a poder dividir la contaminación hídrica en parte disuelta y parte en suspensión, flotación o arrastrada por el agua. Además, se puede hacer distinción entre contaminación de la parte inorgánica y la orgánica, es decir, aquella que es eliminada de forma natural y la que no lo es.

Existen varios indicadores de contaminación, como es el caso de: pH, concentración, olor, sabor, DQO, DBO, SST, bacterias, microorganismos, etc.

I.1.1. LEGISLACIÓN

La legislación para la protección y el control de la legislación de los ecosistemas acuáticos naturales se guía a través de directivas europeas, obtenidas principalmente de acuerdos internacionales de actuación en materia ambiental. Lo ideal sería actuar para minimizar los daños en origen, pero en ciertas ocasiones es necesario llevar acciones para corregir el problema. Surge una serie de normativas para establecer unas condiciones de vertido tras ser depuradas las aguas residuales que llegan a la EDAR cargadas de nutrientes.

Legislación europea:

La Directiva 2000/60/EC establece el marco de actuación comunitario en el ámbito de la política de aguas entre los estados miembros de la Comunidad Europea. Esta directiva tiene como objetivo principal proteger el buen estado ecológico de las masas de agua continentales, aguas de transición, aguas costeras y aguas subterráneas.

La Directiva 91/271/CEE de aguas residuales urbanas, modificada por la Directiva 98/15/CE en el cuadro II del Anexo I, establece la obligatoriedad de disponer de sistemas de colectores y realizar el tratamiento de las aguas residuales urbanas y las procedentes de determinadas industrias. Dichas obligaciones dependen de la cantidad de carga orgánica del vertido y de las características del ecosistema acuático receptor del vertido. El tipo de ecosistema acuático receptor hace referencia a la sensibilidad de éste a la “eutrofización”, catalogándolo como “zona sensible” o “zona menos sensible”. Las zonas sensibles requieren una mayor reducción de la carga contaminante del agua residual y por tanto los vertidos realizados en ellas deben cumplir requisitos más exigentes.

La Directiva 91/676/CEE relativa a la protección de las aguas contra la contaminación producida por nitratos procedentes de fuentes agrícolas, la forma de actuación es mediante una serie de medidas para la supervisión de las aguas superficiales y subterráneas; la designación de zonas vulnerables; la elaboración de códigos de buenas prácticas agrarias, la adopción de programas de acción y la evaluación de las acciones llevadas a cabo.

La legislación mostrada, hacen que la depuración de aguas residuales urbanas se convierta en una practica obligada en Europa y por supuesto en Polonia. El cumplimiento de este objetivo ha supuesto la construcción y puesta en marcha de multitud de instalaciones, que garanticen la recogida y tratamiento de aguas, haciéndose necesario el estudio de los procesos de eliminación de nutrientes por vía biológica.

Tabla 1: Requisitos de vertido para la EDAR urbana.

PARÁMETROS	CONCENTRACIÓN	MÍNIMO PORCENTAJE DE REDUCCIÓN
Demanda Biológica de Oxígeno (DBO ₅ a 20°C) sin nitrificación	25 mg/L O ₂	70 - 90
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	125 mg/L O ₂	75
Sólidos Suspendidos Torales (SST)	35 mg/L O ₂ (mas de 10000 PE)	90 (mas de 10000 PE)
	60 mg/L O ₂ (2000 - 10000 PE)	70 (2000 - 10000 PE)

Tabla 2: Requisitos de vertido para EDAR en zona sensible, Directiva 91/2711/CEE.

PARÁMETROS	CONCENTRACIÓN		MÍNIMO PORCENTAJE DE REDUCCIÓN
	10.000 - 100.000 h-e	> 100.000 h-e	
Fósforo Total	2 mg/L P	1 mg/L P	80%
Nitrógeno Total	15 mg/L N	10 mg/L N	70 - 80 %

I.1.2. CONTEXTO GENERAL

La eliminación de nutrientes presentes en el agua, ha sido desde hace años muy importantes debido a la concienciación social sobre el medio ambiente. Es por esta razón, la unión europea (UE) elaboró una serie de directivas nombradas en el apartado anterior, con el fin de paliar los daños ambientales que se han ocasionado hasta el momento.

En Polonia, la Directiva 91/271/ECC se implantó en 2004 con una modificación en 2006, desde entonces se llevan a cabo las recomendaciones presentes en la Directiva referentes a aguas residuales.

La continua búsqueda de procesos y tecnologías por parte de los investigadores científicos para reducir el consumo de energía y costes económicos, se ha convertido en un tema de actualidad. Por esta razón, los modelos matemáticos forman parte del diseño y operación de sistemas de tratamiento de aguas, especialmente con sistemas de lodos activados (Gujer, 2006). Los modelos matemáticos y simulaciones son una herramienta importante para obtener diferentes soluciones en diversos escenarios, en un periodo de tiempo corto y con un presupuesto económico bajo. Todo esto, se lleva a cabo para obtener un proceso de operación más eficiente. Hoy en día, se han desarrollado una gran cantidad de modelos matemáticos, que describen una planta de tratamiento de aguas residuales (EDAR) de diferentes maneras con buenos resultados.

I.1.3. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Aunque en la actualidad las plantas de depuración de aguas están muy equipadas para desempeñar su trabajo de forma adecuada, existe una serie de problemas relacionados con los costes energéticos y económicos. Por esta razón, las empresas de aguas y saneamiento, encargadas de dirigir y controlar las EDAR, tienen una serie de objetivos comunes. Los objetivos a conseguir para eliminar los problemas existentes son los siguientes:

- Optimizar el proceso
- Ahorro energético
- Ahorro económico
- Disminuir emisiones atmosféricas
- Disminuir contaminación acuática

Este tipo de problemas en el pasado no se podían paliar debido a la falta de recursos informáticos disponibles, es decir, la falta de herramientas adecuadas para simular los procesos. Sin embargo, la simulación por ordenador es la forma más fácil y útil para mejorar la eficiencia sin interferir en el rendimiento real del proceso.

I.2. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

I.2.1 COMPOSICIÓN DEL AGUA RESIDUAL URBANA

La caracterización de las aguas residuales es necesaria para diseñar y/o mejorar la EDAR y cerciorarse que el agua vertida es de calidad. (Sherrard, 1984) dijo que “*la composición de las aguas residuales desempeña una pequeña parte en los análisis matemáticos realizados, pero puede tener un mayor impacto en los resultados previstos*” y (Barker y Dold, 1997) “*para que el modelo proporcione predicciones razonables del comportamiento del sistema, un conocimiento adecuado de las predicciones de las características de las aguas residuales del comportamiento del sistema, un conocimiento adecuado de las características de las aguas residuales es extremadamente importante*”. El problema más grande, especialmente en el paso del diseño, es que no es posible encontrar dos aguas residuales de caracterizaciones iguales. Sin embargo, es posible definir rangos de concentraciones para cada uno de los parámetros dependiendo del tamaño de la población, la red de secado, el grado de industrialización del área y la tasa de precipitación. A continuación se muestra una tabla con los rangos de concentración típicos:

Tabla 3: Rango de concentraciones típicas para vertido – McGraw Hill 1997.

Componentes	RANGO DE CONCENTRACIÓN		
	Alto	Medio	Bajo
Sólidos Totales (mg/L)	1200	720	350
Disueltos	850	500	250
Suspendidos	350	220	100
Variables sólidos (mg/L)	20	10	5
BOD ₅ (mg/L)	400	220	110
COT (mg/L)	290	160	80
COD (mg/L)	1000	500	250
Nitrogeno Total (mg N/L)	85	40	20
Organico	35	15	8
Ammonio	50	25	12
Nitrito	0	0	0
Nitrato	0	0	0
Fósforo Total (mg P/L)	15	8	4
Organico	5	3	1
Inorganico	10	5	3
Alcalinidad (mg CaCO ₃ /L)	200	100	50
Aceites y Grasas (mg/L)	150	100	50

Existen tres grandes grupos de parámetros, el primero se centra en la demanda de carbono en oxígeno (DQO) (Figura 1), el segundo se centra en el nitrógeno (Figura 2) y el último se centra en el fósforo (Figura 3). Los parámetros citados anteriormente pueden caracterizarse mediante análisis físico y químico. El primer grupo es el más importante, ya que a través de él

se obtiene la eficacia de la decantación primaria, a través de la eliminación de sólidos suspendidos.

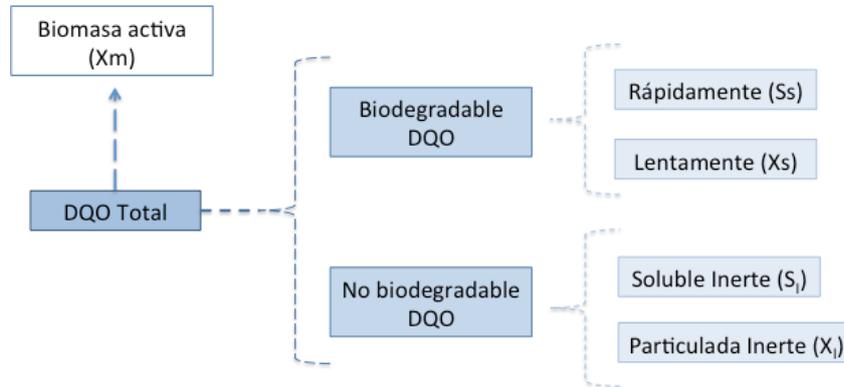


Figura 1: Fracciones de la Demanda Química de Oxígeno (CQO) en aguas residuales.

Con respecto al nitrógeno, más del 90% se encuentra como amonio o compuestos orgánicos en aguas residuales municipales debido a la excreción humana.

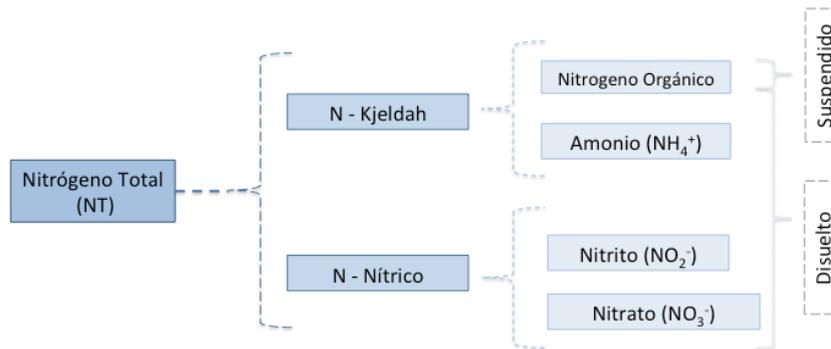


Figura 2: Fracciones de nitrógeno en aguas residuales.

El ortofosfato, los fosfatos inorgánicos y el fósforo orgánico se pueden encontrar en las aguas residuales municipales y normalmente el fósforo orgánico se convierte en ortofosfato a través de la actividad microbiana.

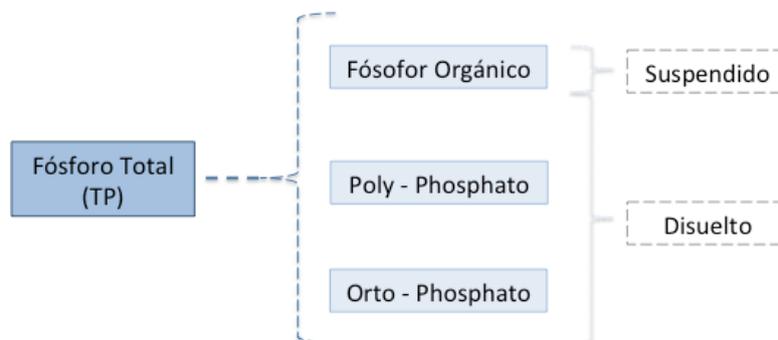


Figura 3: Fracciones de fósforo en aguas residuales.

I.2.2 TRATAMIENTOS BIOLÓGICOS DE DEPURACIÓN

Los sistemas de tratamiento biológico de fangos activados son los procesos más habituales en depuración. La diferencia fundamental entre los distintos tipos de sistemas de fangos activados es la variable a la que hace referencia, es decir, un sistema convencional tiene lugar en el espacio y un sistema de flujo discontinuo tiene lugar en el tiempo. Sin embargo, un sistema convencional realiza la depuración del agua en una serie de tanques diferentes y un sistema de flujo discontinuo realiza la depuración en un solo tanque. A continuación se muestra la figura de un esquema de fangos activados:

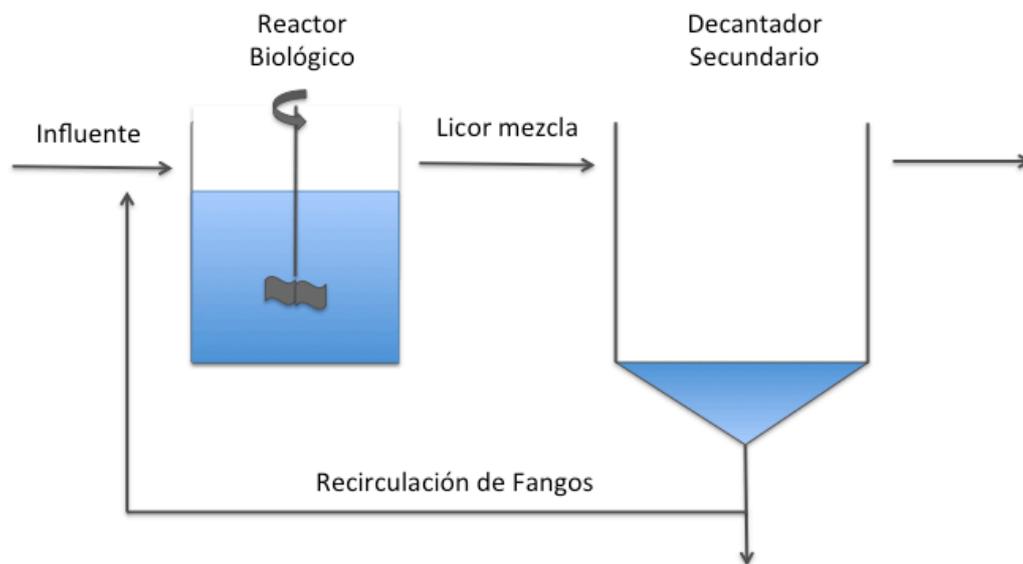


Figura 4: Esquema básico de fangos activados.

La experiencia ha demostrado que los procesos biológicos constituyen un medio fiable y efectivo de eliminación de materia orgánica y nutriente. Actualmente existen infinidad de esquemas preparados para eliminar conjuntamente materia orgánica y nutriente, mediante la combinación de etapas anaerobias, aerobias y anóxicas.

I.2.2.1 FANGOS ACTIVADOS

La necesidad de eliminar materia orgánica y nutriente ha desarrollado el uso de los fangos activos. Los microorganismos presentes en los fangos realizan la depuración biológica, consiste en convertir la materia orgánica y los nutrientes en compuestos más simples como dióxido de carbono y agua, así como en nueva biomasa.

La acción principal que se debe llevar a cabo en los fangos activos es la eliminación de materia orgánica y nutrientes por parte de los microorganismos, y para ello es necesaria la formación de un floculo que aumente su tamaño hasta obtener una estructura que sea sedimentable, con el fin de tener un fango concentrado y un sobrenadante limpio.

Los requisitos de depuración han ido evolucionando y cada vez son más elevados, es por esta razón que los sistemas básicos de fangos activos han ido adaptándose. Actualmente los mas usados son los de mezcla completa y flujo pistón.

I.2.2.2 ELIMINACIÓN BIOLÓGICA DE NITROGENO (BNR)

Los principales procesos que se dan en una EDAR están relacionados directamente con la eliminación de materia orgánica del agua, la eliminación de nitrógeno y la eliminación de fósforo. Estos tres tipos de eliminación son fundamentales para proteger el medio ambiente y cumplir con los límites legales.

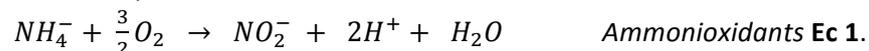
En el caso de la eliminación de nitrógeno, se lleva a cabo mediante procesos de nitrificación y desnitrificación, se basan en cambiar la especie química para obtener nitrógeno gas. Además, ambos procesos realizan cambios en el pH, pero estos cambios son compensados ya que ambos procesos ocurren de forma consecutiva. Se debe tener en cuenta, que la desnitrificación debe tener lugar en los reactores, ya que de lo contrario el fango no podrá decantarse debido a la presencia del gas nitrógeno.

En cuanto a la eliminación de fósforo, se puede llevar a cabo de dos formas diferentes, eliminación química y eliminación biológica. Ambos procesos se basan en la incorporación de fósforo en los sólidos suspendidos, cuya eliminación es más fácil por sedimentación. A continuación se explican cada uno de los procesos convencionales:

➤ NITRIFICACIÓN

La nitrificación consiste en la transformación del nitrógeno amoniacal en nitrato por acción de un conjunto de bacterias autótrofas. Las bacterias encargadas de realizar este proceso utilizan el carbono inorgánico (CO_2 o HCO_3^-) como fuente de carbono, y obtienen la energía necesaria para su crecimiento a partir de la oxidación del nitrógeno amoniacal. La nitrificación del nitrógeno amoniacal se realiza en dos etapas a partir de dos clases de microorganismos (Amoniooxidantes y Nitritoxidantes). Las correspondientes reacciones bioquímicas representativas de cada etapa son:

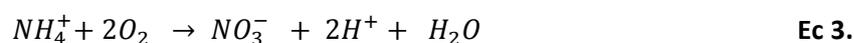
- Primera etapa:



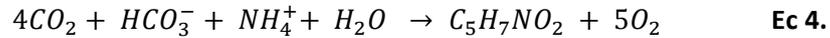
- Segunda etapa:



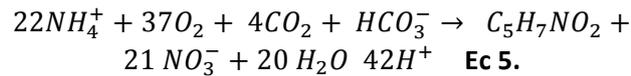
En las reacciones bioquímicas de ambas etapas se produce energía que es utilizada por los microorganismos para el crecimiento y mantenimiento celular. La primera etapa corresponde con la etapa limitante del proceso de nitrificación, debido a que la velocidad de crecimiento de las Nitritoxidantes es considerablemente mayor que la de las Amoniooxidantes, por lo que la reacción energética global queda representada por la Ec. 3:



También se ha de considerar la reacción de síntesis de los microorganismos implicados, que como se ha comentado anteriormente, asimilan una fracción de amonio del agua residual para el tejido celular. Esta reacción de síntesis, asumiendo como fórmula química de la biomasa $C_5H_7NO_2$, corresponde con la Ec4:



Por lo tanto, la reacción global representativa del proceso de nitrificación obtenida a partir de las reacciones de oxidación y síntesis corresponde con la Ec 5:



Los factores ambientales más importantes que afectan al crecimiento y actividad de las bacterias autótrofas nitrificantes son las siguientes:

- **Concentración de nitrógeno amoniacal** → la cinética característica del crecimiento de las bacterias nitrificantes es de tipo Monod. Para concentraciones de nitrógeno amoniacal bajas, el amonio actúa como sustrato limitante del proceso de nitrificación y para valores elevados no existe influencia. No obstante concentraciones muy elevadas de nitrógeno amoniacal o de ácido nitroso, presentan un efecto inhibitorio en las bacterias Nitritoxidantes (Anthonisen et al., 1976).
- **Oxígeno disuelto** → para que el proceso de nitrificación tenga lugar de forma adecuada, se ha de mantener en el reactor una concentración de oxígeno mínima de 1mg/L. Valores por debajo de esta concentración, disminuyen o incluso inhiben el proceso de nitrificación.
- **Temperatura** → las bacterias autótrofas presentan una fuerte dependencia de su crecimiento con la temperatura. Por tanto, el proceso de nitrificación puede manifestarse en el intervalo de temperatura entre 4º C y 45º C.
- **pH** → las bacterias nitrificantes también son muy sensibles a los cambios de pH, especialmente las Amoniooxidantes. El intervalo óptimo de crecimiento de estas bacterias se encuentra entre 7,5 y 8,6 (Metcalf y Eddy, 1995)
- **Tiempo de retención celular** → las bacterias nitrificantes se caracterizan por una velocidad de crecimiento baja, respecto a otro tipo de bacterias tales como la heterótrofas, responsables de la degradación de la materia orgánica. Por tanto, el proceso de nitrificación requiere de tiempos de retención celular elevados para maximizar su rendimiento.

La nitrificación permite oxidar el nitrógeno amoniacal a nitrato, pero para transformar ese nitrato a nitrógeno gas, y por tanto poder reducir el contenido de nitrógeno del agua residual, se requiere de una segunda etapa, denominada desnitrificación.

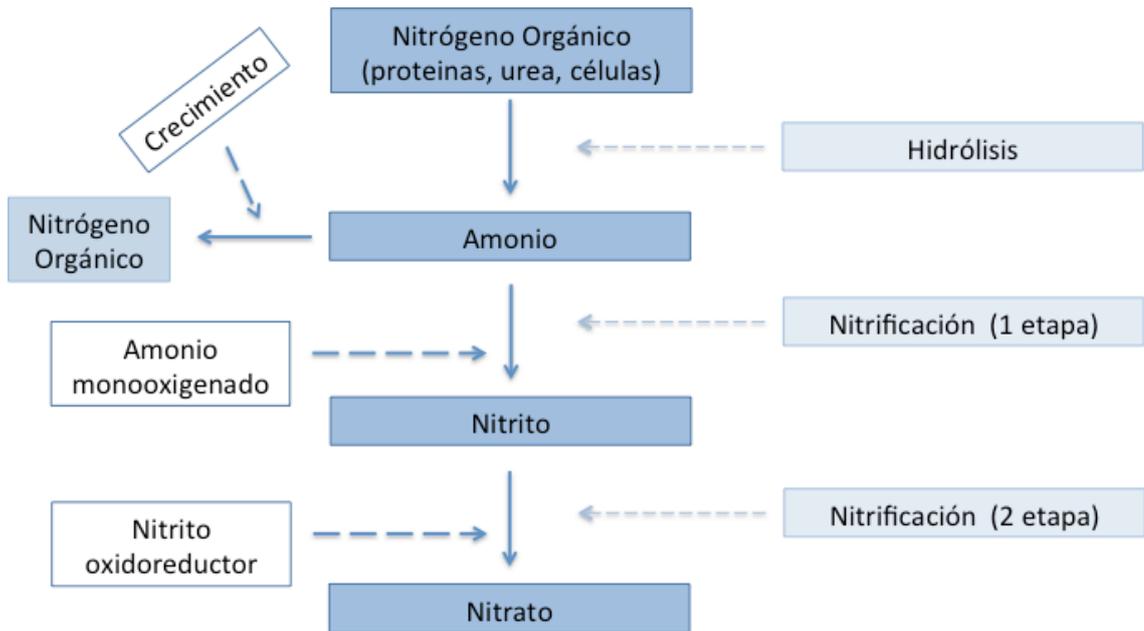


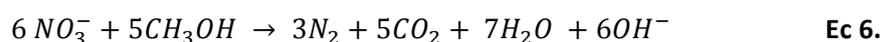
Figura 1: Proceso de nitrificación.

➤ **DESNITRIFICACIÓN**

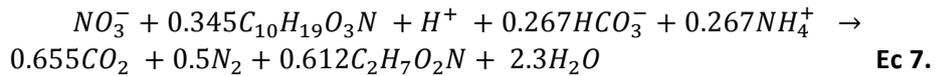
La segunda etapa del proceso biológico de eliminación de nitrógeno es la desnitrificación. El proceso de desnitrificación es el proceso biológico mediante el cual las bacterias heterótrofas facultativas en ausencia de oxígeno, utilizan el nitrato como aceptor de electrones para degradar la materia orgánica. De este modo, las bacterias, en presencia de una fuente de carbono, reducen el nitrato a nitrógeno gas dando fin al proceso de eliminación biológica de nitrógeno.

Para que este proceso tenga lugar de forma eficiente es fundamental mantener condiciones anóxicas (término que se emplea para indicar la ausencia de oxígeno disuelto en el medio y la presencia de nitrato como aceptor de electrones) en el reactor, ya que las bacterias heterótrofas facultativas prefieren utilizar el oxígeno como aceptor de electrones antes que el nitrato. El crecimiento bacteriano en presencia de nitrato resulta menos eficiente que el crecimiento en presencia de oxígeno, ya que no se genera la misma cantidad de energía en forma de ATP por unidad de DQO degradada (Brock et al., 1994).

La reacción general de desnitrificación utilizando metanol como fuente de carbono, se representa a partir de la siguiente ecuación:



Si en la reacción anterior se considera la síntesis de la biomasa (C₅H₇NO₂), la degradación de la materia orgánica del agua residual como fuente de carbono (considera como C₁₀H₉O₃N) y el nitrógeno amoniacal como nutriente, la reacción global de eliminación de nitrato se puede escribir como (WEF y ASCE et al., 1998):



Como se puede observar en esta reacción el proceso de desnitrificación, por un lado reduce las necesidades de oxígeno para el proceso de nitrificación, ya que cada gramo de N-NO₃⁻ tiene la capacidad como aceptor de electrones de 2,86 gramos de oxígeno, y por otro lado compensa la disminución de alcalinidad del proceso de nitrificación ya que en el proceso de desnitrificación aumenta el pH. Este aumento de pH se produce como consecuencia del consumo de protones.

Por tanto, la evolución del proceso de desnitrificación puede ser controlada a partir del seguimiento de la concentración de nitrato y/o el aumento del pH en el agua residual.

Los principales factores ambientales que afectan al proceso de desnitrificación son:

- **Tipo y concentración del sustrato orgánico** → el contenido de materia orgánica es un factor importante para la desnitrificación, dicha materia orgánica no presenta influencia en la concentración de nitrato a no ser que su concentración sea muy baja. Con relaciones de DQO/NKT (nitrógeno Kjeldhal) superiores a 9 se consigue una eficacia de desnitrificación excelente.
- **Oxígeno disuelto** → las bacteria heterótrofas facultativas en presencia de oxígeno, hacen que éste sea utilizado como aceptor de electrones en lugar del nitrato, desfavoreciendo el proceso de desnitrificación.
- **pH** → el intervalo óptimo para el proceso de desnitrificación es de 7 a 8, ya que dicho parámetro no es un factor limitante en el proceso de desnitrificación.
- **Temperatura** → es un parámetro en el que el proceso de desnitrificación no es sensible, sin embargo en el proceso de nitrificación la temperatura es un factor condicionante. La velocidad de desnitrificación aumenta con la temperatura (Henze et al., 1995).

A continuación se muestra un esquema representativo de este proceso:

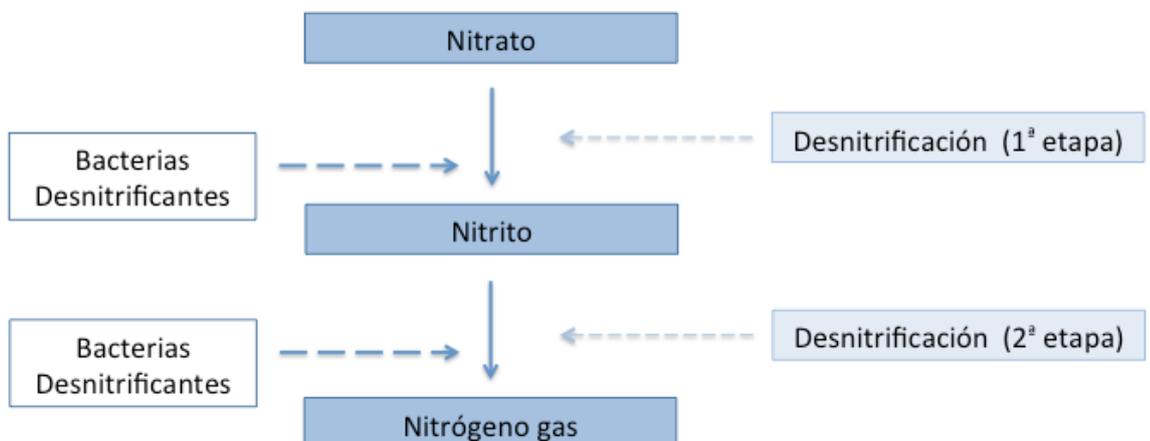


Figura 2: Proceso de desnitrificación.

I.2.2.3 TIPOLOGÍA DE LOS REACTORES

El tratamiento biológico del agua residual se lleva a cabo en reactores de fangos activados donde se desarrolla un ambiente biológico con microorganismos. Históricamente, el reactor más comúnmente utilizado en EDAR es el reactor de mezcla completa. Sin embargo, es posible encontrar también reactores de flujo de pistón y, más recientemente, reactores secuenciales (SBR) y biorreactores de membrana (MBR).

- Reactor de mezcla completa

Su principal característica es que realizan una mezcla completa y homogénea de todo su contenido. En su interior contienen un agitador, que es el encargado de realizar la mezcla y conseguir una calidad del efluente elevada. Es un tipo de reactor que trabaja en continuo, es decir, que entra y sale la misma cantidad de flujo. Se muestra un esquema a continuación:

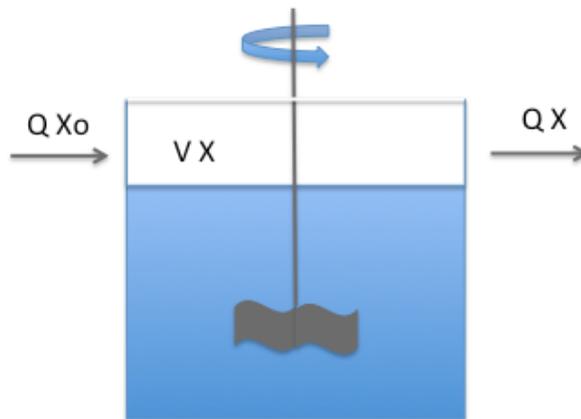


Figura 7: Reactor en mezcla completa (CMFR).

- Reactor en flujo pistón

Su principal característica es que la concentración de algunos componentes y parámetros varía en función a su longitud. El agua no se mezcla horizontalmente, si no que lo hace de forma vertical. Por esta razón, es posible utilizar una secuencia de reactores con diferentes concentraciones para que el proceso sea más sencillo. Se muestra un esquema a continuación:

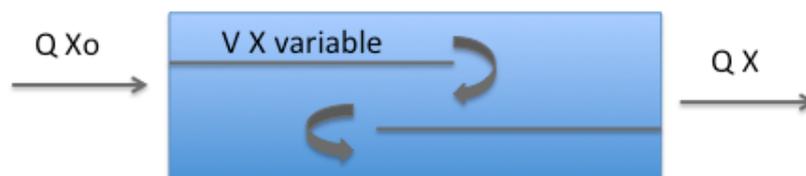


Figura 8: Reactor en flujo pistón.

○ Reactor en flujo discontinuo (SBR)

Su principal característica es que opera secuencialmente. Primeramente se llena el tanque de agua residual, los fangos deben permanecer dentro hasta conseguir una cantidad de bacterias necesarias para llevar a cabo el proceso. Posteriormente se puede introducir tantas etapas como sea necesarias, es decir, aerobias, anóxicas o anaerobias, con el fin de tener un efluente adecuado. A continuación, tendrá lugar la sedimentación y por esta razón el tanque funcionará como clarificador. Finalmente, se eliminará el agua limpia y los fangos para poder realizar otro ciclo. A continuación se muestra un esquema:

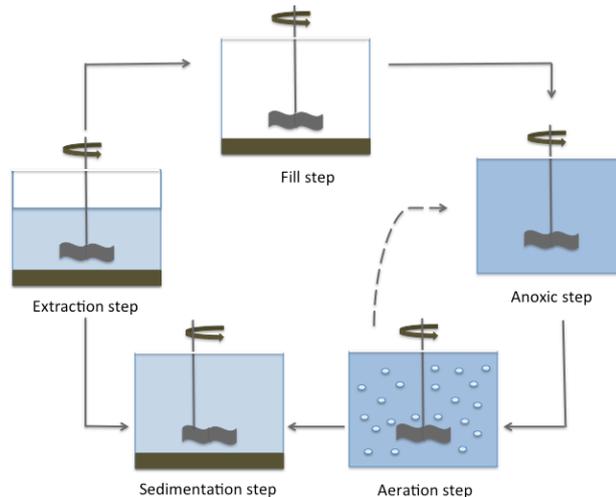


Figura 9: Reactor en flujo discontinuo (SBR).

○ Bioreactor de membrana (MBR)

Su principal característica es que incorpora una membrana permeable para el control del TRC del proceso. El decantador no es necesario con este tipo de reactor porque la membrana rechaza los materiales sólidos y recoge el agua. Esta tecnología permite aumentar la concentración de sólidos suspendidos en el sistema, hasta valores de 10.000 y 15.000 mg/L, lo que mejora el tratamiento ya que permite el desarrollo de microorganismos con crecimiento más lento. El tiempo de retención de fangos tiene un rango de 15 a 365 días (Fitzgerald et al., K.S.2008). Este proceso proporciona un efluente de alta calidad debido al uso de membranas, reduce la concentración de patógenos y desinfecta el efluente. Dependiendo del tamaño de poro, la calidad será mayor o menor, a menor tamaño de poro la calidad será mayor.

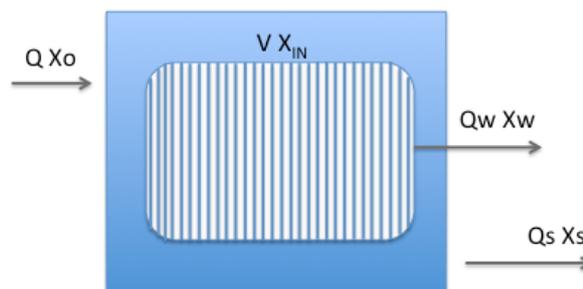


Figura 10: Bioreactor de membrana (MBR).

I.2.2.4 EVOLUCIÓN Y CONFIGURACIÓN DE LOS PROCESOS DE FANGOS ACTIVOS DE UNA EDAR

Los esquemas de tratamiento para la eliminación biológica de nutrientes alternan las fases aerobias y anóxicas bajo diferentes condiciones de operación. Algunos de los esquemas de tratamiento de sistemas de cultivo en suspensión más importantes se explican a continuación:

- Esquema A/O

Es el proceso más sencillo para la eliminación de fósforo. El proceso consiste en un tanque anaerobio, seguido de otro aerobio y ambos se mezclan en el fondo. Las bacterias PAO, son las encargadas de utilizar los ácidos grasos volátiles para evitar la muerte del PHA. Posteriormente, las bacterias heterótrofas son las encargadas de descomponer la materia orgánica y eliminar el fósforo. Existe una recirculación, el fango del clarificador se introduce en el tanque anaerobio para mantener estable la concentración de sólidos suspendidos. A continuación se muestra un esquema:

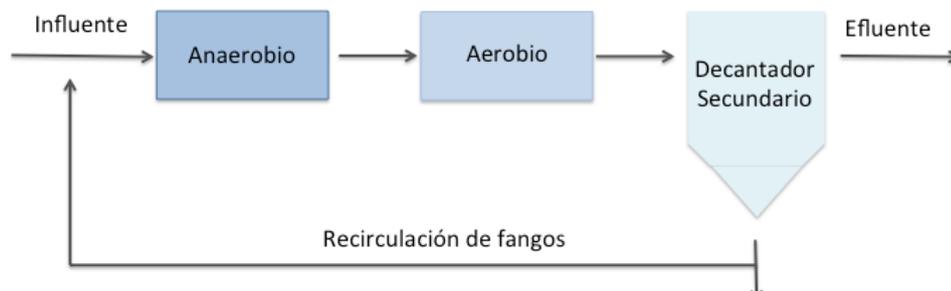


Figura 11: Diagrama del proceso A/O.

- Esquema A2/O

Es la combinación de dos procesos, muy útil en la eliminación de nitrógeno y fósforo. Consiste en un tanque anaerobio, seguido de un tanque anóxico y de otro aerobio. Cuenta con dos recirculaciones, la primera del clarificador secundario al tanque anóxico y la segunda del tanque aerobio al tanque anóxico. Se muestra un esquema a continuación:

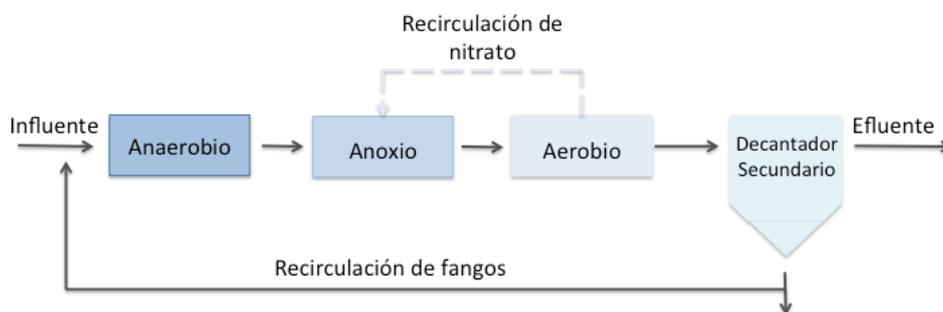


Figura 12: Diagrama de proceso A2/O.

- Esquemas Ludzack – Ettinger (LE) y Ludzack – Ettinger modificado (MLE)

La diferencia entre ambos es la corriente de recirculación interna de nitratos, es independiente de la recirculación de fangos. En el esquema LE la recirculación de fangos realiza también la recirculación de nitratos. A continuación se muestra un esquema:

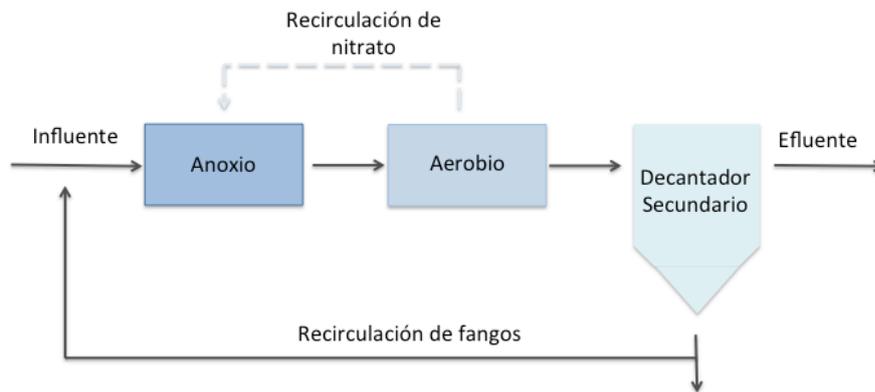


Figura 13: Diagrama de proceso Ludzack modificado - Ettinger.

○ Esquema Bardenpho

Es una variación del esquema anterior, simplemente se le añaden dos etapas más al proceso. Estas dos etapas comprenden, un reactor anóxico y un reactor aerobio. En la etapa de post-desnitrificación la materia orgánica procede de la degradación de la biomasa endógena. Con el fin de conseguir un aumento del rendimiento de nitrógeno oxidado. La etapa de post-aireación elimina por arrastre el N_2 gas formado durante la desnitrificación, mejorando de esta forma la sedimentabilidad del fango. Se muestra un esquema a continuación:

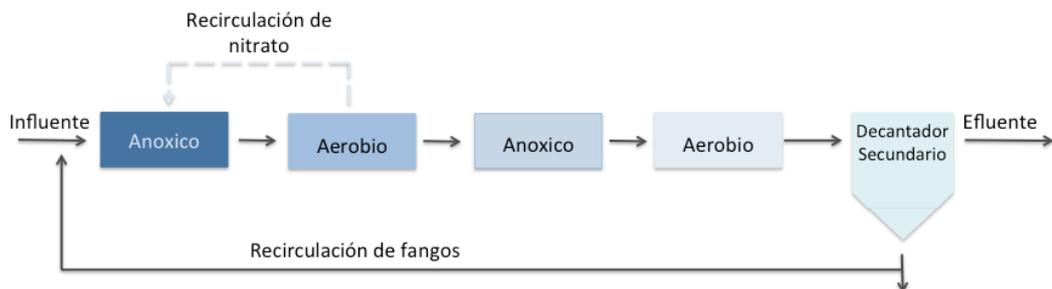


Figura 14: Diagrama de proceso Bardenpho.

○ Esquema Bardenpho modificado

Este proceso surge de la necesidad de eliminar nitrógeno y fósforo a la vez, es por esta razón que se le añade un tanque anaerobio al inicio del proceso. A continuación se muestra un esquema:

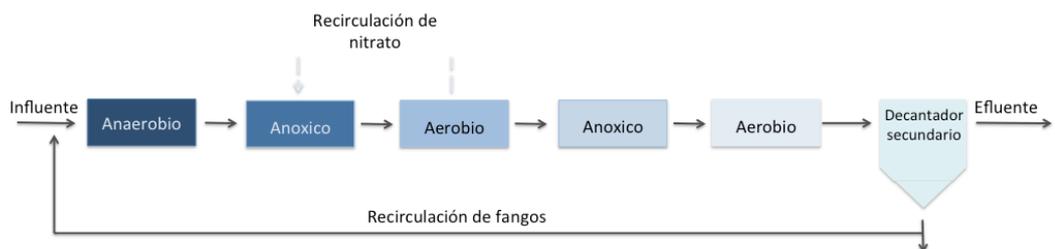


Figura 15: Diagrama de proceso Bardenpho modificado.

○ Canal de oxidación

El agua residual circula alrededor de un canal ovalado o circular donde se lleva a cabo la nitrificación y desnitrificación del agua mediante la alternancia de zonas aerobias y anóxicas. La zona aerobia comienza en la zona de aireación y se extiende hasta que el oxígeno disuelto disminuye a cero. La entrada de agua residual y la recirculación de nitratos se establecen al inicio de la zona anóxica para utilizar el carbono de agua residual en la desnitrificación. Se muestra un esquema a continuación:

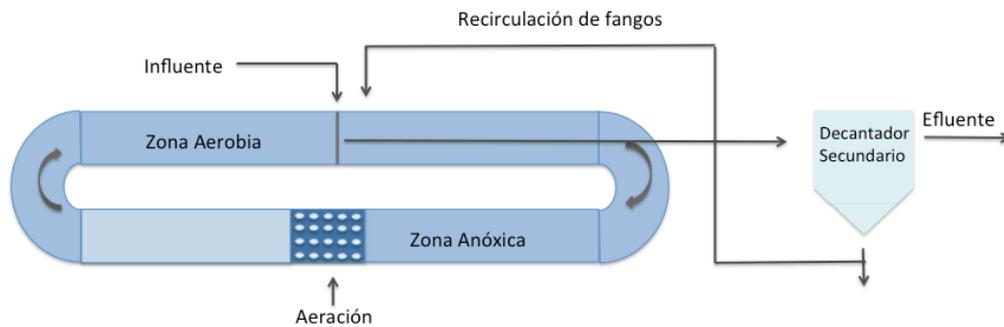


Figura 16: Diagrama de proceso del canal de oxidación.

○ Johannesberg procesos (JHB)

Cuenta con un tanque anóxico para reducir el oxígeno y el nitrato en la recirculación de fangos activados, está situado antes del tanque anaerobio. En este tanque, la elevada concentración de sólidos en suspensión permite obtener una desnitrificación por respiración endógena. La principal ventaja de esta configuración es la posibilidad de evitar la recirculación de un tanque anóxico al anaerobio. Se muestra a continuación un esquema:

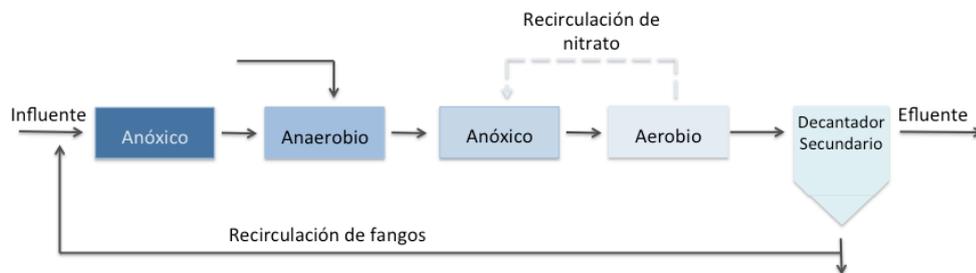


Figura 17: Diagrama de proceso Johannesberg.

I.2.2.5 ASPECTOS ENERGÉTICOS DE UNA EDAR

En las estaciones de aguas residuales aproximadamente el 65% de la energía utilizada en el ciclo integral, corresponde al consumo energético, dicho consumo proviene de la instrumentación, control y automatización (ICA). Además, la energía utilizada es un factor a tener en cuenta, ya que puede corresponder entre un 15% y un 30% del coste de explotación. Por estas razones, la optimización energética en la EDAR es un punto clave en el control de costes, por ello es habitualmente buscar una optimización idónea de la explotación de la planta, mediante el uso de instrumentación de bajo coste y eficaz, así como una buena estrategia de control y automatización.

El consumo habitual en la EDAR es de 0,67 KWh/m³, consumiendo el tratamiento biológico más de la mitad de esa energía (IDEA et al., 2010). Este consumo se puede mantener bajo control teniendo en cuenta los factores más influyentes, que se enumeran a continuación:

- Tipo de proceso
- Tratamientos utilizados
- Tamaño de la planta
- Tipo de aireación y agitación
- Tipo de equipo electromecánico
- Caracterización del agua
- Criterios operativos
- Criterios de control y metodologías

La concentración de oxígeno disuelto se considera como uno de los parámetros de control más importantes en la EDAR. Actualmente, el interés en controlar el oxígeno disuelto es reducir los costos de energía y también optimizar los procesos de eliminación de nutrientes, como el nitrógeno y el fósforo. Debe tenerse en cuenta que el coste energético de la aireación es más del 50% del coste energético total de una planta de tratamiento.

I.2.2.5.1 MANTENIMIENTO Y CONSERVACIÓN

Son dos acciones muy importantes para asegurar el correcto funcionamiento de la planta de tratamiento. Por un lado, el mantenimiento asegura el correcto funcionamiento de los equipos y minimizar la probabilidad de rotura, por otro lado, la conservación se lleva a cabo para evitar daños de los equipos.

El proceso biológico es el mayor consumidor de energía debido a los procesos de aireación. El mayor consumo de energía, tiene lugar cuando el difusor de aire está sucio debido a las pérdidas de carga sufridas. Sin embargo, el ahorro energético puede darse con el uso de difusores de limpieza o el uso de lámparas ultravioleta (UV).

Las lámparas ultravioleta son muy comunes en los tratamientos terciarios, la necesidad de mantenerlas limpias, es para que emitan la luz correspondiente al tratamiento. Además el mantenimiento adecuado de bombas de impulsión, válvulas, etc. Puede minimizar el consumo de energía trabajando en sus puntos óptimos.

I.2.2.5.2 BOMBEO

Desde el punto de vista del bombeo, la optimización energética es muy importante, sobre todo debe realizarse en la fase de diseño de la planta. Durante esta fase, debe buscarse el movimiento de gravedad del agua a través de toda la planta. Sin embargo, esto puede no ser posible debido a la topografía del área o del proceso. En el caso de fangos activados recirculados siempre es necesaria una bomba.

Tras la construcción de la planta, es imprescindible tener equipos de bajo consumo de energía y su optimización. Es por esta razón que la optimización para minimizar el bombeo puede llevarse a cabo pero el proceso tiene que ser mantenido bajo control.

I.2.2.5.3 SISTEMA DE AIREACIÓN

Los procesos de aireación en el tratamiento biológico pueden representar entre el 50% y el 70% del consumo de energía en toda la planta dependiendo del tipo de proceso y del tamaño. Por esta razón, la optimización energética de estos procesos es la más interesante. Hay varias técnicas para la energía discutidas arriba. Otros como la optimización, en este caso en el flujo de aire con el fin de minimizar el consumo de energía del soplador, son aplicables a casi todos los procesos (Grupo de Ingeniería Química de la Universidad de Alcalá et al., 2009).

Por un lado, la separación de las acciones de aireación y agitación en el reactor biológico es un nuevo cambio. A veces se aplica una mayor aireación con el fin de mantener una agitación adecuada. Por esta razón, los requisitos de aireación se reducen aplicando esta medida y por lo tanto el consumo de energía del soplador.

Por otra parte, el cambio de aireación superficial o aireación profunda con burbujas a la aireación profunda con los difusores finos de la burbuja ahorra energía. Una aireación profunda tiene un tiempo de contacto más largo entre la burbuja y el agua, lo que mejora la eficiencia de la transferencia. Además, si la burbuja es más pequeña, la superficie de contacto con el aire aumenta con el aumento de la eficiencia de transferencia. En ambos casos, el proceso de rendimiento mejora y, por lo tanto, el consumo de energía disminuye.

I.2.3 MODELACIÓN MATEMÁTICA DE LOS SISTEMAS DE FANGOS ACTIVADOS

En las últimas décadas se ha desarrollado modelos matemáticos representativos de los procesos biológicos de fangos activados que sirven como herramienta en cuanto al entrenamiento personal, diseño y optimización de los procesos manifestados en una EDAR (Henze et al., 2000; Petersen et al., 2002). Debido al avance, ha dado lugar a una herramienta para el desarrollo de sistemas de control más robustos en una EDAR.

Un modelo matemático es una forma de simular un sistema o una realidad compleja con la ayuda de expresiones matemáticas, constituidas por variables y parámetros dependientes del tiempo. El uso de modelos matemáticos y la simulación a través de computadora permite un análisis de muchas soluciones tecnológicas diferentes, así como la prueba de varios escenarios en un corto tiempo y con un presupuesto económico bajo.

Es importante definir adecuadamente los objetivos del estudio y delimitar el área de estudio junto con la descripción y los componentes del proceso. Esto se lleva a cabo, para proporcionar solo los elementos necesarios y definir los flujos de entrada y salida. Posteriormente, se lleva a cabo la recolección de datos, es el paso más largo y difícil por el tiempo y esfuerzo empleado. Deben llevarse a cabo ensayos de laboratorio, mediciones a gran escala y cálculos con el fin de integrar mejor el modelo informático a las condiciones que prevalecen en los parámetros locales de cada parte del sistema de estudio.

Finalmente, con los datos implementados se realiza una primera calibración que será validada con los datos de otro periodo si es necesario. La calibración se repetirá tantas veces como sea necesaria hasta hallar la validación adecuada. A continuación se muestra un esquema del proceso:

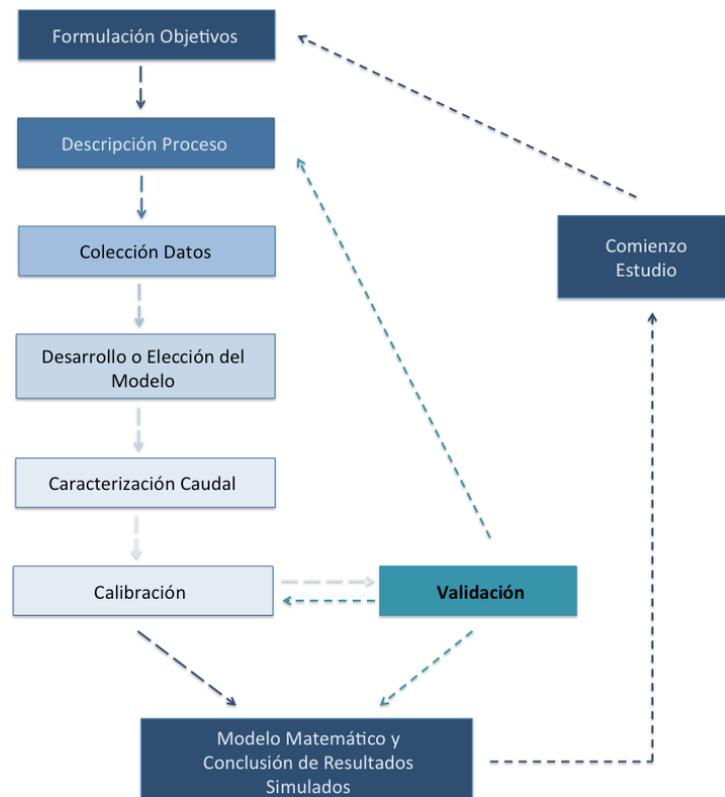


Figura 18: Modelación del proceso matemático.

El modelo que sentó las bases de los modelos de fangos activados corresponde con el Activated Sludge Model No 1, ASM1 (Henze et al., 1987), capaz de reproducir la eliminación de materia orgánica y nitrógeno, en sistemas de fangos activados.

Actualmente, existen infinidad de modelos matemáticos que describen una planta de tratamiento de aguas residuales (EDAR) de diferentes maneras, con buenos resultados. Por esta razón, el modelo matemático utilizado es comúnmente conocido y desarrollado previamente.

A continuación se describen algunos de los modelos disponibles:

➤ **Activated sludge models N°1 (ASM1).**

Modelo desarrollado por International Water Association (IWA) en 1987, su objetivo era simular la degradación de la material orgánica, nitrificación y procesos de desnitrificación en fangos activados (Henze et al., 1987). Tuvo una gran aceptación por parte de la comunidad científica ya que presenta una forma adecuada en relación al comportamiento dinámico y estacionario de los procesos. Sin embargo, el proceso carecía de eliminación biológica de fósforo. El modelo cuenta con 7 componentes solubles, 6 componentes particulados y 8 procesos.

➤ **Activated sludge models N°2 (ASM2).**

Se desarrolló por IWA en 1995, su objetivo era simular la degradación de la material orgánica, nitrificación, desnitrificación y procesos de eliminación de fósforo en fangos activados (Henze et al., 1995). El modelo cuenta con 9 componentes solubles, 10 componentes particulados y 14 procesos.

➤ **Activated sludge models N°2d (ASM2d).**

Fue desarrollado por IWA en 1999 con el objetivo de simular los mismos procesos que el modelo anterior y el proceso de desnitrificación de PAOs (Henze et al., 1999). Consiste en una actualización del modelo ASM2, en donde además de añadir como se ha nombrado antes la desnitrificación que poseen las PAO, incluye el almacenamiento de los polifosfatos y su crecimiento en condiciones anóxicas. Este modelo ha sido ampliamente utilizado para simular el comportamiento de los sistemas reales con eliminación biológica de fósforo.

➤ **Activated sludge models N°3 (ASM3).**

El siguiente modelo fue publicado por IWA en 1999 (Gujer et al., 1999). Fue creado con la finalidad de corregir las carencias encontradas en los modelos anteriores y tras el avance de las investigaciones fue necesaria su creación. Este modelo no incluye los procesos de eliminación biológica de fósforo. El modelo consta de 7 componentes solubles, 6 componentes particulados y 12 procesos.

➤ **Activated sludge models N°3 with metabolic bio-P (ASM3-bioP).**

Lo desarrolló IWA en 2001 con el objetivo de simular los procesos referentes a ASM3 y el proceso de eliminación biológica de fósforo (Rieger et al., 2001). Cuenta con los mismos componentes y procesos que el ASM3, pero se le añaden algunos más.

➤ **Biological Nutrient Removal Models No.1 y No.2 (BNRM1 y BNRM2).**

Fue publicado en 2004 (Seco et al., 2004). Su característica principal es el empleo de un único modelo matemático para simular y diseñar los procesos físicos, químicos y biológicos más importantes que tiene lugar en una EDAR tanto en la línea de agua como en la línea de fango. Este modelo, tiene en cuenta aquellos efectos que pueden ocasionar unos tratamiento sobre otros, de forma que el funcionamiento de la EDAR puede ser optimizado. Las características principales de los procesos de eliminación de materia orgánica y nutriente que se incluyen en BRMN1 Y BNRM2, están basados en el ASM2d (Henze et al., 1999) con ciertas modificaciones:

- El proceso de fermentación tiene lugar debido a otro grupo de bacterias (acidogénicas) distintas a las bacterias heterótrofas.

- Incluye un algoritmo de cálculo del pH, teniendo en cuenta las reacciones ácido-base que afectan al pH del sistema. Además, se considera el efecto del pH en la cinética de los procesos biológicos implicados en una EDAR (Serralta, 2004).
- los procesos biológicos que tienen lugar en los tratamientos anaerobios se representan mediante un modelo simplificado de la digestión anaerobia basado en el modelo propuesto por (Siegrist et al., 1993).
- Se modelan los procesos de sedimentación mediante un modelo basado en el propuesto por (Tackács et al., 1991), que incluye los fenómenos de compresión de fango (Ribes, 2004).
- El modelo simula las transformaciones bioquímicas que se producen en decantadores primarios, secundarios y espesadores. De modo que se contemplan los procesos de sedimentación en decantadores y espesadores, los procesos de desnitrificación que se manifiestan en decantadores secundarios, así como los procesos de fermentación – elutriación que pueden tener lugar en decantadores primarios (Ribes et al., 2002).

Este modelo BNRM1 está implementado en el software DESASS (Design and Simulation of Activated Sludge Systems) (Ferrer et al., 2008), que permite el diseño y simulación de los diferentes procesos en conjunto, con el fin de optimizar el funcionamiento global de una EDAR.

El modelo BNRM2 fue desarrollado por el grupo de investigación CALAGUA en 2013, se considera una mejora del modelo anterior. Como los procesos y componentes se van a describir en el apartado de materiales y métodos.

I.2.4 PLATAFORMAS DE SIMULACIÓN

Debido a la complejidad de los modelos que se han comentado en el apartado anterior, se ha visto en la necesidad de implementarlos mediante herramientas informáticas, hoy en día existen infinidad de software que ayudan a poner en práctica los modelos creados y poder llevar a cabo la simulación de las estaciones de depuración de aguas residuales. A continuación se comentan algunas de las plataformas de simulación disponibles:

- **DESASS (Design and Simulation of Activated Sludge Systems)** es un simulador de estaciones depuradoras de aguas residuales urbanas configurado bajo Windows, enfocado básicamente al entrenamiento de personal y a propósitos educativos. Está diseñado y optimizado para la simulación de los principales procesos físicos, químicos y biológicos involucrados en una EDAR. En el diseño de DESASS se ha hecho particular énfasis en la velocidad de cálculo, presentación gráfica y fácil manejo. DESASS trabaja en un entorno intuitivo y permite evaluar esquemas completos de tratamiento de aguas residuales, permitiendo representar desde sistemas sencillos como fangos activados para la eliminación de material orgánica, nitrógeno y fósforo hasta plantas completas que incluyan digestores anaerobios, reactores de membrana, etc. El programa tiene implementado un algoritmo de modelación matemática basado en el modelo biológico BNRM1 desarrollado por CALAGUA. Este modelo permite simular las operaciones básicas más importantes de una EDAR e incluye, la posibilidad de considerar los procesos biológicos que tienen lugar en decantadores y espesadores junto con los procesos de

sedimentación y compresión de fangos. Su diseño es para un uso rápido y sencillo, el programa posee un amplio catálogo de herramientas que permiten a ingenieros y operadores experimentar en un amplio intervalo de condiciones de operación, así como realizar estudios de sedimentabilidad sobre el proceso y comparar alternativas.

- **BioWin** es un software de simulación dinámica el cual debe ser calibrado con las características de la EDAR que se quiere simular, permitiendo de este modo simular diferentes configuraciones o formas de trabajar en el proceso para optimizar la eliminación biológica de nitrógeno o cualquier parámetro. Este programa tiene implementado conceptos del ASM1 propuesto por el grupo de trabajo de la IAWQ (International Association of Water Quality) actual IWA (International Water Association) (Henzel y col., et al 1987).
- **AquaSim** es un programa orientado a objetivos, ha sido desarrollado en el Instituto Federal Suizo de Ciencia y Tecnología Ambiental (EAWAG). Consiste en una configuración especial de un modelo, se representa mediante comportamientos que se conectan mediante enlaces (Diagrama de flujo), dentro de los compartimentos (reactor, río, lago, cámara de aireación, etc.) se producen fenómenos como: procesos de transporte, procesos de reacción. El programa permite al usuario definir un número arbitrario de componentes o sustancias a ser modeladas y es extremadamente flexible en la formulación de los procesos de transformación. No sólo ofrece la posibilidad de realizar simulaciones de la evolución temporal del sistema especificado por el usuario, sino también métodos para la identificación de los parámetros del sistema modelado (análisis de sensibilidad y estimación automática de parámetros), permitiendo estimar la incertidumbre de los resultados calculados.
- **West** es un software potente y fácil de usar para el modelado dinámico y la simulación de plantas de tratamiento de aguas residuales (EDAR) y otros tipos de sistemas relacionados con la calidad del agua. Está diseñado para operadores, ingenieros e investigadores interesados en estudiar procesos físicos, biológicos o químicos en plantas de tratamiento de aguas residuales, sistemas de alcantarillado y ríos. Peter Trop Larsen, director para España de DHI Water y Environment empresa desarrolladora.
- **GPS-X** es un software potente y fácil de usar para el modelado dinámico y la simulación de plantas de tratamiento de aguas residuales (EDAR) y otros tipos de sistemas relacionados con la calidad del agua. Está diseñado para operadores, ingenieros e investigadores interesados en estudiar procesos físicos, biológicos o químicos en plantas de tratamiento de aguas residuales. Fue desarrollado por Hydromantis (Environmental software Solutions, Inc.).
- **SIMBA** es un software basado en los modelos de la IAWQ, muy similar al software BioWin.

- **SUMO** es un software para la implementación de un componente que permite un proceso externo, interactúa con la simulación de tráfico. Dicho componente contiene una serie de comandos para poder controlar la simulación y los objetos que lo componen. Está diseñado para operadores, ingenieros e investigadores interesados en estudiar procesos físicos, biológicos o químicos en plantas de tratamiento de aguas residuales.

I.3. INSTRUMENTACIÓN, CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN DE UNA EDAR

El uso de los instrumentos adecuados para llevar a cabo la explotación de una EDAR, es muy importante, ya que permite minimizar la generación de residuos y el consumo energético. La implantación de un sistema automático de control implicaría una mejora de los rendimientos, de la calidad del efluente final, debido a que limitamos los tiempos de respuesta ante cambios de las variables del proceso, y una optimización del coste de la explotación de la planta.

La ICA (Instrumentación, control y automatización) permite optimizar los costes de inversión y explotación, asegura el funcionamiento y disminuye el impacto ambiental, actuando inmediatamente en caso de producirse cualquier anomalía.

La instrumentación se basa en un sistema de equipos de medición que recoge la información de las variables del proceso (temperatura, presión, oxígeno disuelto, pH, etc.) en tiempo real mediante sensores y que actúa mediante actuadores para efectuar los cambios que sean necesarios (válvulas de frecuencia o soplantes).

La automatización se refiere a los elementos que recogen, procesan y muestran los datos del sistema de instrumentación para llevar a cabo las acciones comandadas por los algoritmos de control (autómatas, convertidores de señal, etc.).

El control se trata de algoritmos que permiten mantener las variables de proceso en el valor deseado mediante la información que llega a través de la instrumentación (sensores) buscando conseguir los objetivos de operación.

Los tratamientos que se llevan a cabo para purificar las aguas residuales, tienen mayores dificultades que el resto de procesos industriales. Dichas dificultades se nombran a continuación:

- Eliminación de métodos de análisis en línea adecuados
- La complejidad de este tipo de procesos y el elevado grado de interacción entre las reacciones bioquímicas y los fenómenos de transporte
- Complejidad en el sistema regulador existente dentro de los propios microorganismos, teniendo en cuenta además que el sistema de control solo puede manipular las condiciones ambientales extracelulares.

El campo de la instrumentación, automatización y control de procesos es cada vez más importante, sobre todo en planta de depuración ya que contribuye a la eficacia energética, gracias al control profundo que se tiene de la instalación. Además, supone una mayor

eficiencia energética y un gran ahorro económico de explotación. Contribuye a los requisitos de mejora en calidad del efluente y mejora el conocimiento de la complejidad de las instalaciones.

I.3.1 INSTRUMENTACIÓN EN EDAR

Los instrumentos de control de una planta se encargan de obtener las medidas necesarias, transmitirlos a distancia, obtener un registro de cada una de las medidas, actuar sobre una variable, etc. Alguno de los ejemplos de instrumentación implementada en EDAR son:

- Sensores → Recogen la información de la variable que se pretende medir de manera directa. Capaces de recoger las variables de presión, temperatura, nivel, OD, pH, conductividad, potencial redox, turbidez y pesaje.
- Analizadores → Recoge la información a través de un análisis químico in-situ. En este caso la variable medible depende de si es para líquidos o para gases. Para líquidos puede medir concentración de nutrientes como el amonio, nitrato, nitrito, fósforo, etc. o también puede medir DQO, DBO o COT; y en el caso de los gases se mide principalmente la absorción mediante infrarrojos, cromatografía y espectrofotometría.
- Variador de frecuencia → Recoge la variación de frecuencia durante el funcionamiento de las soplantes. Normalmente suele contar con una terminal de entrada por señal analógica, esto hace que se pueda controlar dicha frecuencia.
- Válvula de regulable → Son equipos que funcionan bajo las ordenes de todo o nada, es decir, realizará la apertura o cierre de la válvula cuando sea necesario, es un mecanismo asociado a un fluido. Estos dispositivos permiten modificar de forma automática el volumen de reacción en tiempo real.

I.3.2 CONTROL DE UNA EDAR

En primer lugar, se debe tener claro cual es el objetivo para crear el sistema de control adecuado, es decir, el conjunto de algoritmos que controlan un sistema, manipulándolo en cuanto al funcionamiento predeterminado y poder así obtener los resultados buscados. Sobre todo se busca la estabilidad y robustez frente a perturbaciones y errores de los modelos. Se puede distinguir entre varios tipos de sistemas de control:

➤ **Control por retroalimentación**

Es el sistema de control más utilizado, se analiza a través de un sensor la variable que se quiere mantener controlada y se comparan los valores obtenidos en cada momento con un valor de consigna facilitado por el operador del sistema. A partir del error existente entre el valor deseado y el real, el controlador fija la actuación a realizar en el proceso a través de la modificación de la variable manipulada.

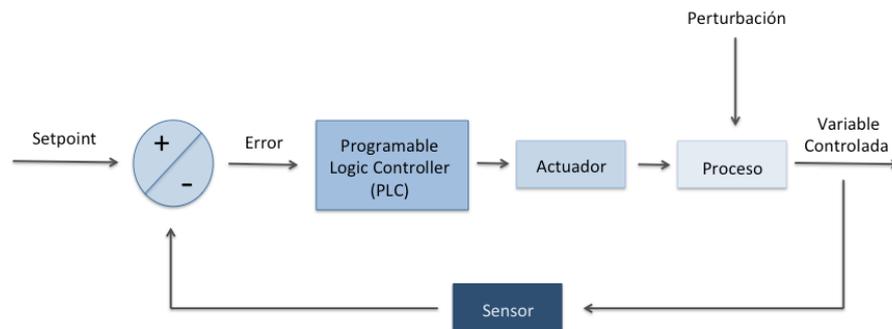


Figura 19: Proceso de control por retroalimentación.

El controlador en este caso se trata de un controlador tipo todo/nada o de un control PID, que son los algoritmos de control básicos. A continuación se explica cada uno de ellos:

- Controlador todo/nada → su configuración es muy sencilla, solo se toma una única entrada y un valor de referencia de la entrada, conectando la salida cuando la entrada de la variable controlada se encuentra por encima del valor de consigna o por debajo del valor de consigna. Su mayor desventaja, es el elevado consumo energético y la baja precisión para ajustar al valor de consigna por fluctuar entre la banda de máx. /mín.
- Controlador PID (Proporcional Integral Derivativo) → es el más utilizado en el sector industrial, debido a su efectividad en diversas aplicaciones, se utiliza para eliminar los problemas asociados de la respuesta excesiva del controlador y su falta de modulación, se intenta ajustar la respuesta obtenida en función de la magnitud del error.

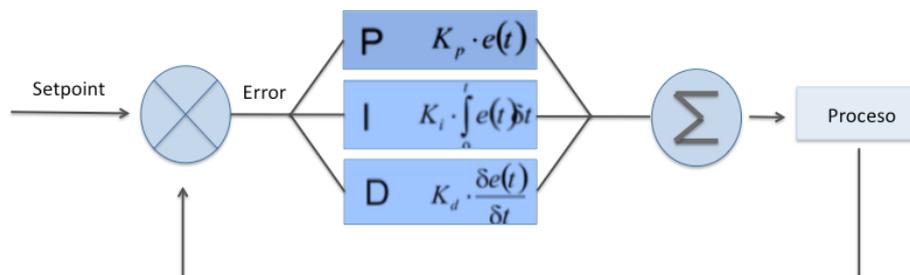


Figura 20: Componentes del controlador (PID).

Su estructura de control es muy sencilla, en el caso de tener un sistema muy complejo se vuelve un sistema lento e incluso limitando su uso.

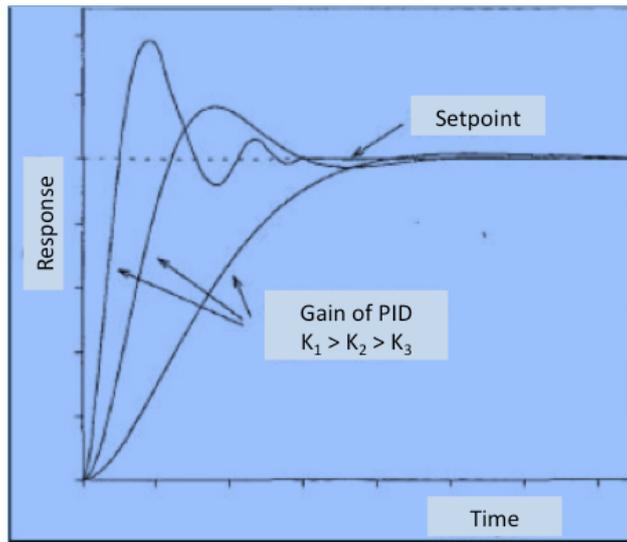


Figura 21: Respuesta del controlador (PID).

➤ **Control anticipativo**

Es otra alternativa de control, actúa antes de que la perturbación aleje el sistema de las condiciones deseadas. Principalmente, este tipo de sistema analiza la perturbación previa a la entrada del sistema y se toma la acción de control necesaria para minimizar su efecto. La disposición de modelos eficientes que definen esta acción, hacen que este tipo de control no sea utilizado de forma individual, sino que trabaja siempre acoplado a un lazo de regulación por retroalimentación que permite en todo momento conocer y ajustar desviaciones de la variable controlada.

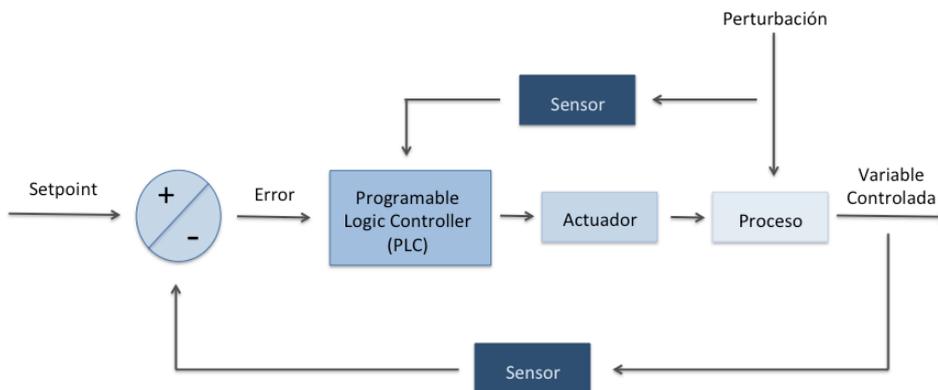


Figura 21: Proceso de control por anticipación.

I.3.2.1 TÉCNICAS AVANZADAS

Los avances en el sector informático y automático traen consigo una ampliación de las posibilidades de controlar los procesos gracias al surgimiento de una gran serie de nuevas herramientas matemáticas. Es por esta razón que aparece la lógica difusa, una técnica que es totalmente diferente a la aplicación de un controlador PID. El controlador PID se basa en unos algoritmos matemático, que “recibe” un valor numérico, aplica el algoritmo calibrado y “emite” otro valor de salida que se aplicará sobre la constante correspondiente. Tras los

avances tecnológicos comentados anteriormente, surge un nuevo concepto llamado **lógica difusa**, está asociado con la manera en que las personas perciben el medio, por ejemplo: ideas relacionadas con la altura de una persona, velocidad con la que se mueve un objeto, la temperatura dominante en una habitación, cotidianamente se formula de manera ambigua y depende de quién percibe el efecto físico o químico.

Una persona puede ser alta o baja, algo puede moverse rápido o lento, una temperatura puede ser baja, moderada o alta, se dice que estas afirmaciones acerca de una variable son ambiguas porque rápido, bajo, alto son afirmaciones del observador, y estas pueden variar de un observador a otro. Uno se puede preguntar cuándo algo es frío o caliente, que tan baja es la temperatura cuando decimos frío, o que tan alta es cuando decimos caliente. Los **conjuntos difusos**, definen este tipo de ambigüedades, y es una extensión de la teoría clásica de conjuntos, donde un elemento pertenece o no a un conjunto, tal elemento tiene solo 2 posibilidades, pertenecer o no son una extensión de los clásicos, donde se añade una función de pertenencia, definida esta como un número real entre 0 y 1. Los conjuntos difusos son la base para la lógica difusa, del mismo modo que la teoría clásica de conjuntos es la base para la lógica Booleana. Un conjunto difuso (fuzzy set) se define matemáticamente a partir de la siguiente expresión:

$$A = \{ (x, \mu_A(x)) / x \in X \}$$

Siendo X una colección de objetos que representa el dominio de la aplicación, expresados en forma genérica por x. Donde $\mu_{A(x)}$ es el grado de pertenencia dentro del intervalo [0,1] del elemento x al conjunto difuso A. El concepto de lógica difusa empezó a desarrollarse en 1965 (Lotfy A. Zadeh, 1965), y todo el tiempo se ha estado trabajando en el tema de control de procesos. Su objetivo es determinar de la manera lógica que hay que hacer para conseguir los objetivos de control en base al conocimiento de un operador, haciendo uso de la experiencia y conocimiento para construir un controlador que emule el comportamiento de tal persona. Los algoritmos de la lógica difusa son seleccionados mediante unas etapas que se recogen en la siguiente figura:

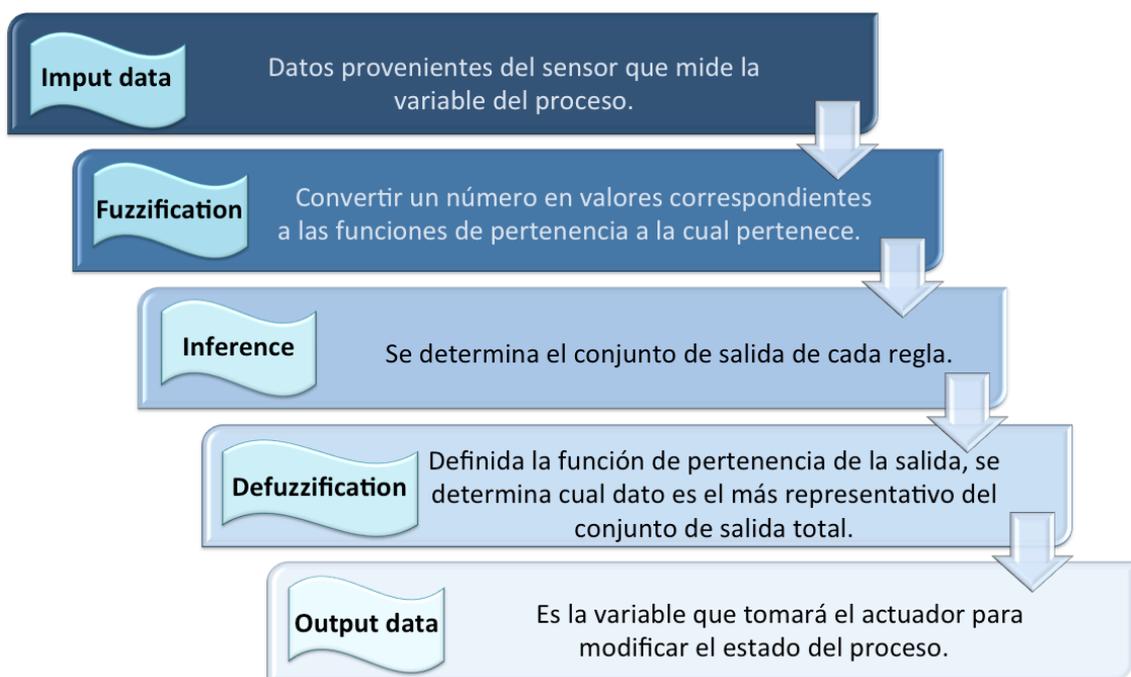


Figura 23: Etapas para la toma de decisión.

A continuación se pasa a explicar cada uno de los algoritmos de control:

- Datos de entrada (input data) → en esta etapa se calcula las variables de entrada al sistema de control, los datos que se utilizan provienen del sensor que mide la variable del proceso, puede que exista ruido y desviaciones en comparación al valor real.
- Fuzzificación → es aquella etapa donde se le asigna una variable lingüística a las variables generadas en la etapa de entrada de datos. Seguidamente el controlador difuso traduce las entradas numéricas en variables lingüísticas, con el fin de poder utilizarlas posteriormente, etiquetando el valor obtenido de la variable de entrada y asignándole un grado de pertenencia. Es muy importante definir las funciones de pertenencia, para determinar el grado de verdad de las correspondientes salidas. Se asume que la variable de salida puede ser medida en un control estándar de lazo cerrado, utilizando términos como grande negativo, landre positiva, pequeño negativo y pequeño positivo.
- Inferencia → La determinación de las conclusiones o la generación de hipótesis basados en el estado de una estrada es llamado inferencia. Relaciona los grados de verdad de la variable lingüística de entrada con los grados de verdad a las etiquetas lingüísticas definidas para la variable lingüística de salida. Hay que crear e identificar las reglas que se aplican a cada situación. La lógica difusa es deductiva, mediante un antecedente y un consecuente, el grado de verdad del consecuente es deducido a partir del grado de verdad del antecedente. Por lo que, en la inferencia se utiliza la información de la base de conocimiento para generar reglas mediante el uso de condiciones.
- Defuzzificación → es la etapa donde se determinan los valores numéricos de las variables físicas de la salida mediante el uso de valores difusos de cada etiqueta lingüística definida para la variable difusa de salida. Su finalidad es conseguir que las acciones de control sean activadas mediante los resultados obtenidos.
- Datos de salida → El valor de la variable física de salida controlador es comandado al actuador correspondiente para realizar la acción de control sobre el proceso.

1.3.3 AUTOMATIZACIÓN EN EDAR

La automatización consiste en proporcionar una respuesta con garantía de futuro con el fin de satisfacer las necesidades de la planta, mediante los equipos de los que se disponen. Se busca en todo momento conseguir una eficiencia máxima, una gran flexibilidad y una elevada rentabilidad. Otro de los objetivos importantes que se buscan con la automatización es la simplificación tanto del sistema como del mantenimiento, de forma que el operario no requiera de grandes conocimientos para la manipulación de los equipos. La automatización de una EDAR es un proceso que se divide en tres etapas:

1ª Supervisión y adquisición de datos (SCADA) → es un software que permite el acceso a datos remotos de un proceso y permite el control de dicho software. Se encarga de la monitorización o supervisión, que realiza la interfase entre los niveles de control y los de gestión. Las funciones principales que realiza una SCADA son:

- Monitorización: consiste en la representación de los datos en tiempo real a los operadores que contiene una planta.
- Supervisión: supervisión, mando y adquisición de los datos pertenecientes al proceso y posteriormente la toma de decisiones.
- Mando: facilidad para que los operadores de planta puedan cambiar tanto datos como consignas desde el ordenador.

2ª Control mediante autómatas programables (PLC) → conjunto de elementos dedicados a tareas de control y supervisión del sistema, normalmente suelen estar alejados de la SCADA, es por ello que se comunican con ella mediante un canal de comunicación que puede ser de diferentes tipos.

3ª Sistemas de comunicación → son sistemas que sirven para comunicar un servidor de datos y cualquier elemento de campo. La comunicación se hace mediante tarjetas, permiten el intercambio de datos de forma bidireccional entre la SCADA y las unidades remotas mediante un protocolo de comunicación, como por ejemplo: modbus, Ethernet, etc. Además, el sistema debe contar con un sistema de transporte de la información como por ejemplo: línea telefónica, fibra óptica, etc.

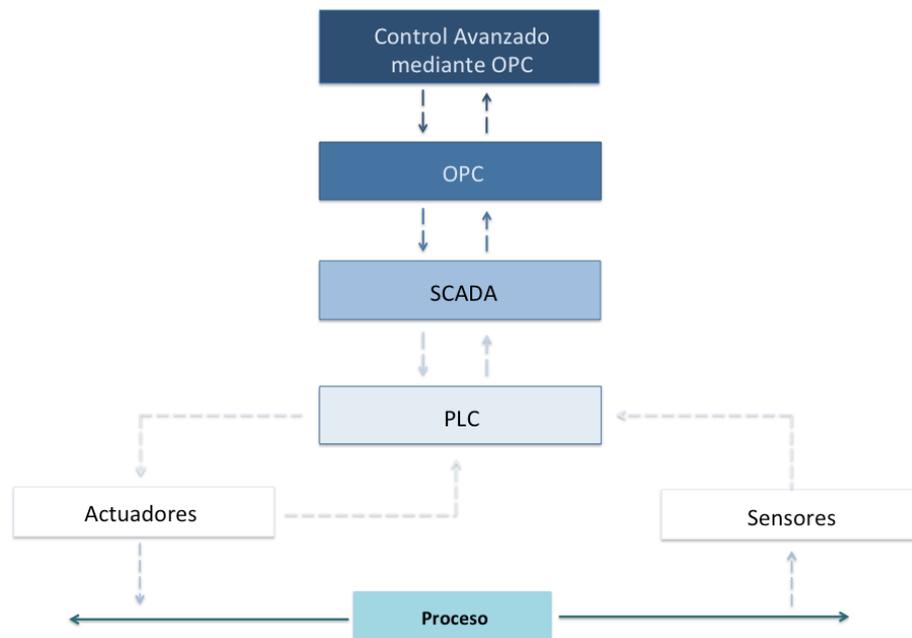


Figura 24: integración de la Instrumentación, Control y Automatización básica en una EDAR.

Actualmente todos los equipos que forman parte de una EDAR como son: bombas, válvulas, medidores, sensores, agitadores, etc. están gobernados por un autómata programable. El autómata está dotado de entradas y salidas digitales a la vez que entradas y salidas analógicas, con el fin de recibir, gestionar la señal y enviar la respuesta a dichos equipos según los valores introducidos previamente.

Este PLC controla el funcionamiento de aquellos elementos de instalación que se encuentren en automático y esto permitirá tener un conocimiento preciso de la evolución del

proceso. El cuadro del PLC suele encontrarse en la sala destinada a armarios eléctricos. Una de las funciones de un PLC, es también la adquisición de datos desde transmisores y/o sondas, y la transmisión de esta información hasta el SCADA (los PLC tienen una escasa o casi nula capacidad de almacenamiento y es necesaria su unión a un SCADA). Del mismo modo, el PLC realiza las funciones de transmisión de datos en dirección inversa, enviando la secuencia de comando establecida por el SCADA hasta los diferentes equipos y elementos de instrumentación. El PLC incluirá, del mismo modo, los algoritmos de control necesarios para continuar con el normal funcionamiento del proceso en aquellas situaciones que, por fallo de comunicación SCADA-PLC, sea necesario.

La SCADA es una interfaz que permite controlar y supervisar los procesos, así como la adquisición de datos a tiempo real, en el que a través de PLC y autómatas, se procesan señales analógicas y digitales que informan del estado de la instalación y el proceso. Este programa contiene los algoritmos de control y de operación incluidos por el usuario, siendo posible la modificación de estos, si fuere necesario. Así que a través de este equipamiento se puede visualizar en una pantalla y registrar parámetros de funcionamiento de una planta como pueden ser:

- Arranque y paro de equipos
- Alarmas producidas en los distintos equipos
- Evolución histórica de niveles
- Consumos de bombas
- Horas de funcionamiento de bombas
- Totales de consumos

Además, el operario puede cambiar consignas, arrancar y parar motores, etc. Otra ventaja del SCADA es la generación de un registro histórico de los eventos ocurridos en la EDAR. Este registro es accesible para consultas por parte del usuario y se guarda en formatos (Excel), que permiten la explotación a otras aplicaciones con el fin de realizar cualquier tipo de tratamiento con los datos. La evolución de las variables analógicas también es registrada con el mismo formato, permitiendo al usuario ver su evolución gráfica en un periodo de tiempo seleccionado.

Para poder realizar la comunicación entre el SCADA y PLC con la instrumentación, es necesaria la instalación de tarjetas de comunicación, adecuadas y compatibles con los estándares de comunicación. Estas tarjetas de comunicación son tanto de entrada como de salida para permitir ambas direcciones en la adquisición y envío de información. Los protocolos de comunicación más comúnmente utilizados son Profibus, Ethernet industrial (ProfiNET) y MPI. Además de estos sistemas de comunicación físicos, existen otros sistemas de comunicación *OLE for Process Control* (OPC). Estos sistemas han sido introducidos en los últimos años, debido a las necesidades de implementar algoritmos de control avanzados en la EDAR, o a la interacción entre diferentes aplicaciones informáticas y el SCADA. Gracias a este protocolo se hace posible la comunicación entre diferentes fuentes de información (clientes OPC) y un único elemento (servidor OPC), todas ellas mediante un único protocolo de comunicación.

A continuación se muestra la siguiente figura:

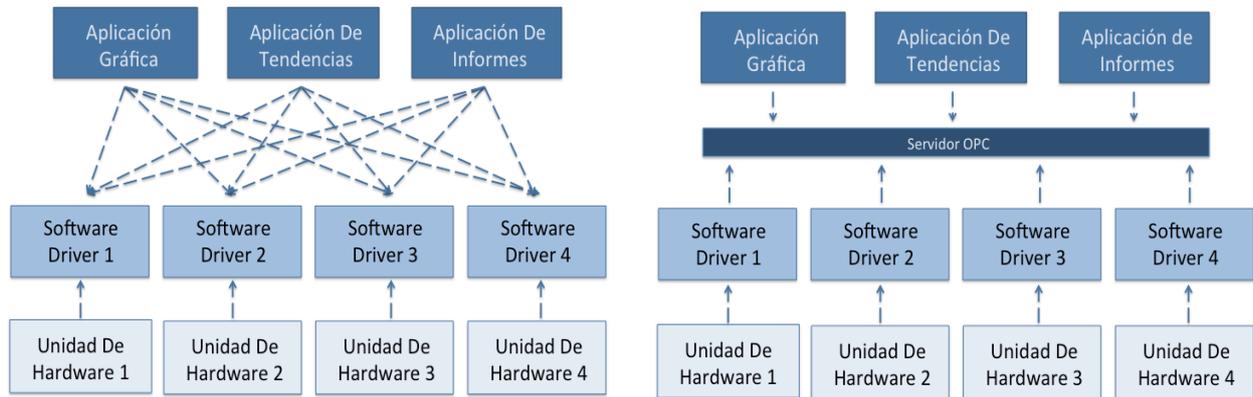


Figura 257: Comparación entre una asociación tradicional (izquierda) y una asociación OPC (derecha).

Como se puede apreciar en la figura anterior, se muestra la simplicidad que presenta el uso de un servidor OPC, comparado con la implementación de cada uno de los drivers de cada uno de los equipos. Asimismo, se muestra la minimización de enlaces de comunicación necesarios, para cada una de las aplicaciones que ejercen algún tipo de actuación sobre los equipos instalados en el sistema de control y automatización.

II. OBJETIVOS

II. OBJETIVOS

El objetivo principal del presente Trabajo Final de Máster es la optimización del proceso de eliminación biológica de nitrógeno y materia orgánica en un sistema de fangos activados con una estructura de flujo Bardenpho.

Se utilizará el modelo BNRM2 introducido en DESASS para poder simular la EDAR estudio con los datos facilitados, y posteriormente se procederá a la calibración de los parámetros del modelo para poder representar de la mejor manera posible el efluente de la EDAR.

Se evaluará el comportamiento de la EDAR mediante el software DESASS. Para ello se utilizará el modelo BNRM2, que una vez calibrado y validado, servirá para simular el funcionamiento de la EDAR ante variaciones dinámicas del afluente al sistema, tal como propone el modelo BSM1.

Posteriormente se implementará un sistema de control basado en lógica difusa para la optimización del proceso de eliminación biológica de nitrógeno. El sistema de control, el cual viene incorporado en la herramienta LoDif BioControl, se basa en el uso de una sonda de amonio para la optimización del sistema de aireación, es decir, se trata de un sistema ABAC.

Por tanto, el trabajo consiste en representar en el software de simulación las condiciones reales de la planta para estudiar su comportamiento, además de comprobar si se consigue la calidad adecuada del efluente en cuanto a concentraciones de nutrientes y materia orgánica se refiere. Seguidamente, se implementará, calibrará y validará un sistema de control avanzado para el sistema de aireación y para el proceso de eliminación de amonio. Dicho sistema de control se implementará mediante el software LoDif BioControl.

Finalmente, una vez calibrado y validado el sistema de control para varias situaciones, se procederá al estudio del consumo energético de la EDAR tras la implementación de la estrategia de control.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

III. MATERIALES Y MÉTODOS

III.1. ESTACIÓN DE DEPURACIÓN DE AGUA RESIDUAL

III.1.1 CASO DE ESTUDIO

El estudio se centra en una depuradora situada al norte de Polonia, a través de una serie de datos facilitados por la Universidad Politécnica de Gdansk (E. Zaborowska et al., 2012). Como se ha comentado, la planta se encuentra en el norte de Polonia, sirve a las comunidades de Slupsk y Kobylnica (aproximadamente 200.000 PE). El flujo de entrada es de 28.500 m³/d, distribuidos en tres líneas de tratamiento, en el que cada una de ellas cuenta con un flujo de entrada de 9.500 m³/d (dato utilizado para el presente trabajo). A continuación se muestra una figura de localización:



Figura 26: Localización de la Estación de Depuración de Aguas Residuales.

Hay dos redes separadas de alcantarillado, una para el agua de tormenta y la otra para las aguas residuales. La EDAR estudio, se construyó en 1998 pero en 2010 completó las obras de inversión para los fangos. Con esta modificación, la planta consiguió una mayor reducción de fangos y de la materia orgánica en el proceso de estabilización y la desintegración ultrasónica, así como una mayor reducción del agua contenida en el sedimento en procesos de deshidratación. El resultado es una completa neutralización y la utilización de fangos en el proceso de compostaje, que incluye tanto un aumento de la producción de fangos y la reducción de grasas, ya que en la región es un problema importante. Todas las mejoras comentadas anteriormente, permitieron una reducción de las impurezas del 60%.

Actualmente, desde el año 2015 se trabaja en una ampliación por la empresa de “Abastecimiento de Agua de Slupk” con el fin de aumentar la posibilidad de purificar más las cargas contaminantes y optimizar los procesos tecnológicos, además de la reducción de gases a la atmósfera y reducción de malos olores. A continuación se muestra una figura de la planta de tratamiento de aguas residuales:

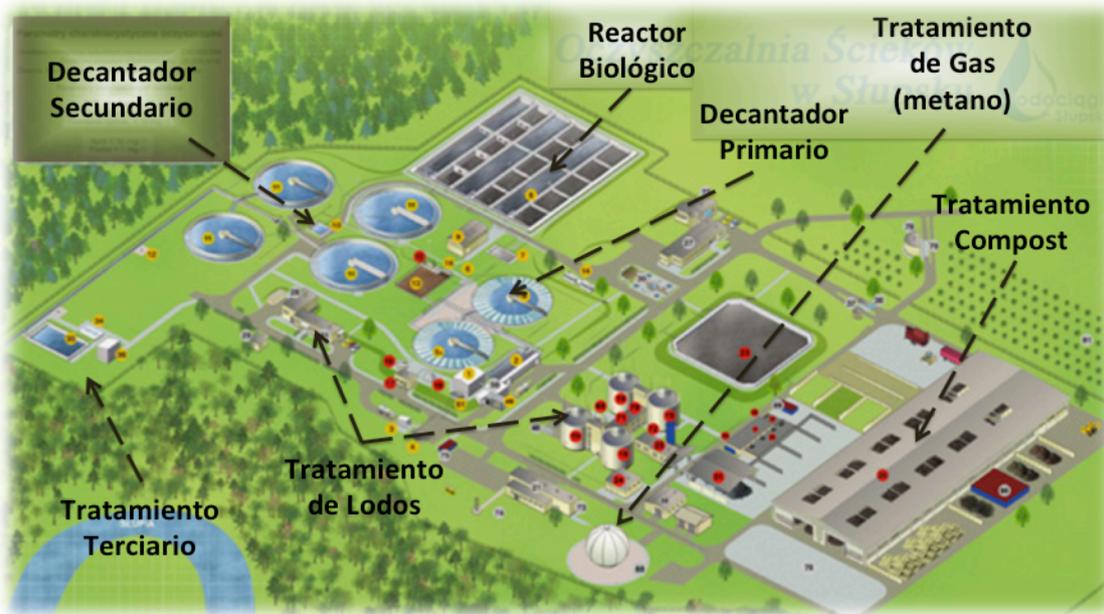


Figura 27: Descripción de la Estación Depuradora de Aguas Residuales.

En la parte superior, se puede ver una descripción de cada una de las acciones en la planta de tratamiento de agua residual y como se divide. A continuación se muestra una figura representativa del reactor biológico, a fin de comprender mejor la estructura de distribución:

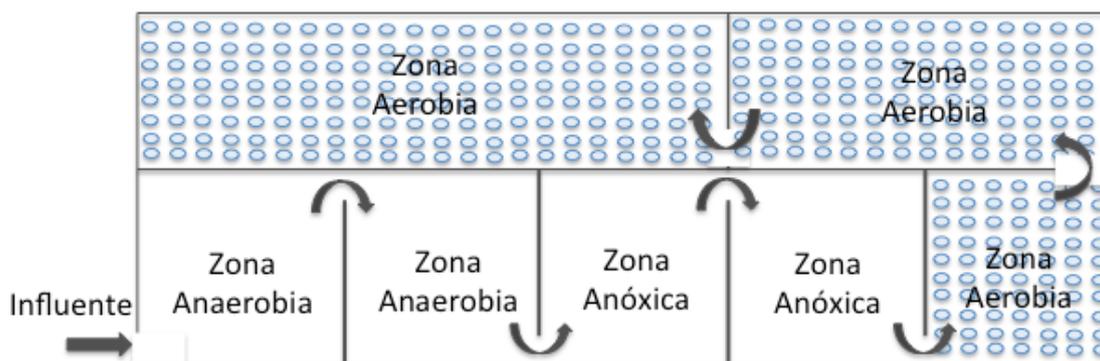


Figura 28: Reactor biológico de la EDAR estudio.

III.1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO Y OPERACIÓN DE LA EDAR

En este estudio, se ha desarrollado el diagrama de flujo mediante el software DESASS de forma virtual. Para ello, se tomaron y arrastraron los iconos de los procesos unitarios necesarios desde la biblioteca de procesos unitarios. Posteriormente, se conectaron por vías de flujo. A continuación se muestra una figura representando el esquema y una tabla con algunos datos relevantes del diagrama de flujo:

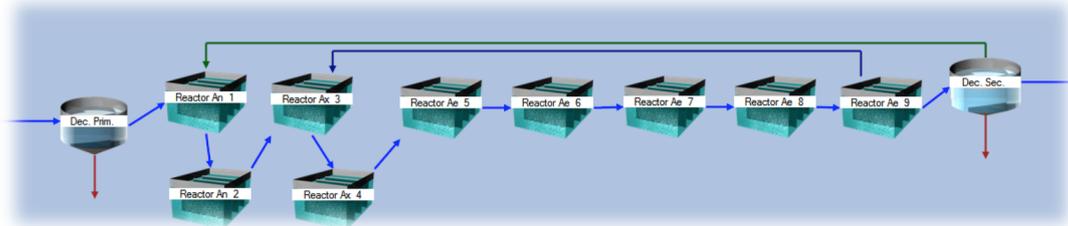


Figura 29: Esquema de la línea de aguas de la EDAR estudio en DESASS.

Tabla 4: Datos relevantes del diagrama de flujo.

DIAGRAMA DE FLUJO			
Planta Completa		Por Línea (son tres líneas)	
TCR (días)	35		
Qm (m ³ /d)	28500	Qm (m ³ /d)	9500
Qp (m ³ /d)	52642	Qp (m ³ /d)	17500
Volumen Reactor Biológico (m ³)	23490	Volumen Reactor Biológico (m ³)	7830
Decantación 1ª(m ³)	908		
Decantación . 2ª(m ³)	5024		

El diseño de la planta virtual comienza con una entrada de agua, seguidamente de una decantación primaria, con el fin de liberar algunas de las impurezas antes de llegar a los reactores. Posteriormente el agua se dirige a un bioreactor de flujo Bardenpho modificado, en el cual cuenta con una recirculación interna, concretamente desde la zona D del reactor aerobio al primer reactor anóxico. Además el esquema de flujo está compuesto por una serie de reactores. A continuación se describen cada uno de ellos:

- Reactor 1 → consiste en un reactor con condiciones anaerobias.
- Reactor 2 → consiste en un reactor con condiciones anaerobias.
- Reactor 3 → consiste en un reactor con condiciones anóxicas.
- Reactor 4 → consiste en un reactor con condiciones anóxicas.
- Reactor 5 → consiste en un reactor facultativo.
- Reactor 6 → consiste en un reactor con condiciones aerobias, hace referencia a la zona A del reactor aerobio.
- Reactor 7 → consiste en un reactor con condiciones aerobias, hace referencia a la zona B del reactor aerobio.
- Reactor 8 → consiste en un reactor con condiciones aerobias, hace referencia a la zona C del reactor aerobio.
- Reactor 9 → consiste en un reactor con condiciones aerobias, hace referencia a la Zona D del reactor aerobio.

Finalmente, la línea de aguas cuenta con una decantación secundaria. En cuanto a la línea de fangos, los fangos procedentes de ambas decantaciones son dirigidas a un espesador y posteriormente a un digestor anaerobio, con el fin de llevar a cabo el proceso de digestión y producir biogás. Finalmente el fango digerido es deshidratado con centrifugadoras para obtener un fango adecuado para otros usos. Además, el agua procedente del espesado y la deshidratación es recirculada a la planta de cabecera con el objetivo de limpiarlo y no tener ninguna descarga de agua sucia.

En cuanto a la operación de la planta cabe destacar su rendimiento es del 100%, ya que cuenta con tres líneas de reactor biológico, dichas líneas están operativas durante todo el año y en todo momento, es decir que la planta está sobredimensionada con el fin de solventar problemas técnicos y poder depurar la misma cantidad de agua en todo momento. Además, el resto de los elementos están duplicados o triplicados, con el fin de solventar problemas futuros. La planta opera un total de 28.500 m³/día aproximadamente y su capacidad de caudal de acogida es de 32.000m³/día.

III.1.3 CARACTERIZACIÓN DEL AGUA

A continuación se muestran los datos obtenidos de la caracterización del agua de entrada. El periodo de la toma de datos fue durante los años 2011 – 2012, para conocer la composición de las características del agua residual de la planta. A continuación se mostrará una tabla con los promedios anuales, estación de verano y estación de invierno:

Tabla 5: Datos de la caracterización del agua de entrada.

INFLUENTE			
Parámetros	Anual	Invierno	Verano
DQO _T (mg O/L)	659.3	643.44	650.25
DQO _S (mg O/L)	276.91	270.24	273.11
DQO _{SUSP} (mg O/L)	382.39	373.2	377.14
DBO _{Lim} (mg O/L)	383.5	317.75	335.29
DBO _{Lim S} (mg O/L)	314.47	260.56	274.94
DBO _{Lim Susp} (mg O/L)	69.03	57.2	60.35
Acidos Volátiles (mg Hac/L)	112.85	107.54	99.20
NH ₄ ⁻ (mg NH ₄ /L)	44.6	38.65	46.16
N _T (mg N/L)	73.7	65.78	74.13
N _S (mg N/L)	55.27	49.33	55.59
N _{SUSP} (mg N/L)	18.43	16.45	18.54
P _T (mg P/L)	16.2	13.93	16.82
P _S (mg P/L)	12.96	11.15	13.45
P _{SUSP} (mg P/L)	3.24	2.78	5.37
PO ₄ ⁺ (mg P/L)	12.00	10.70	12.97
Alcalinidad (mg CaCO ₃ /L)	360	360	360
SST (mg/L)	226.4	240.17	208.12
SSV (mg/L)	169.8	60.04	52.03
Temperatura (°C)		12	19

III.2. MODELO BNMR2 (BIOLOGICAL NUTRIENT REMOVAL MODEL No.2)

El modelo BNRM (Biological Nutrient Removal Model) fue desarrollado por el grupo CalAgua en el año 2004 con la aparición de BNRM1 (Seco et al., 2004) y BNRM2 (Barat et al. 2013), su principal objetivo era representar todos los procesos físicos, químicos y biológicos que puede darse en una EDAR. Debido a que el modelo incluye la mayor parte de los procesos, dicho modelo es muy útil para el diseño, simulación y optimización.

El modelo se ha utilizado para el programa informático DESASS (Desing and Simulation of Activated Sludge Systems), desarrollado por el grupo CalAgua con el fin de simular los procesos que ocurren en una EDAR (Ferrer et al., 2008).

Los procesos físicos que se incluyen son: sedimentación, clarificación y espesamiento, elutriación de ácidos grasos volátiles y transferencia entre las fases de gas-líquido. Los procesos químicos incluidos son las reacciones ácido – base, asumiendo condiciones de equilibrio. Los procesos biológicos que se incluyen son: eliminación de materia orgánica, nutrientes (nitrógeno y fósforo); nitrificación, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. Las condiciones ambientales en cada unidad de operación (aerobio, anóxico o anaerobio) determinaran que grupos de bacterias pueden crecer. Además, considera los procesos de precipitación química apareciendo la digestión anaerobia y se consideran tres grupos de bacterias autótrofas: amoniooxidantes *k-strategist*, amoniooxidantes *r-strategist* y nitritooxidantes.

➤ **Biological Nutrient Removal Model No.2 (BNRM2).**

- Componentes solubles
 - S_F (mg DQO/l) → Sustrato fácilmente biodegradable fermentable (no VFA)
 - S_A (mg DQO/l) → Ácidos volátiles / Productos fermentables (acetato)
 - S_{VFA} (mg DQO/l) → Productos de fermentación excepto acetato (propiónico)
 - S_U (mg DQO/l) → Materia orgánica inerte soluble
 - S_{NHx} (mg N/l) → Amonio más nitrógeno amoniacal
 - S_{NO_2} (mg N/l) → Nitrito total (NO_2^- & HNO_2)
 - S_{NO_3} (mg N/l) → Nitrito total
 - S_{N_2} (mg N/l) → Dinitrogeno
 - S_{PO_4} (mg P/l) → Orthophosphato
 - S_{O_2} (mg O_2 /l) → Oxígeno disuelto
 - S_{CH_4} (mg DQO/l) → Metano disuelto
 - S_{H_2} (mg DQO/l) → Hidrogeno disuelto
 - S_{iC} (mmol C/l) → Carbono inorgánico (CO_2 , HCO_3^- & CO_3^{2-})
 - S_{Ca} (mg Ca/l) → Calcio inorgánico soluble
 - S_{Mg} (mg Mg/l) → Magnesio inorgánico soluble
 - S_K (mg K/l) → Potasio inorgánico soluble
 - S_{Fe} (mg Fe/l) → Hierro inorgánico soluble
 - S_{Al} (mg Al/l) → Aluminio inorgánico soluble
 - S_H (mmol H/l) → Concentración protónica total

- Componentes particulados
 - X_{CB} (mg DQO/l) → Sustrato lentamente biodegradable
 - X_U (mg DQO/l) → Materia orgánica inerte particulada
 - X_{OHO} (mg DQO/l) → Biomasa heterótrofa
 - $X_{AOO,r}$ (mg DQO/l) → Organismos amoniooxidantes (r-strategist), (oxidación de amonio a nitrato)
 - $X_{AOO,k}$ (mg DQO/l) → Organismos amoniooxidantes (r-strategist), (oxidación de amonio a nitrato)
 - X_{NOO} (mg DQO/l) → Organismos nitritooxidantes (oxidación de nitrito a nitrato)
 - X_{PAO} (mg DQO/l) → Organismo acumuladores de fósforo
 - $X_{PAO,PP}$ (mg P/l) → Almacenamiento de Poly- P en PAO
 - $X_{PAO,stor}$ (mg DQO/l) → Almacenamiento de Poly – Hidroxido - alcanato
 - X_{PRO} (mg DQO/l) → Bacterias acetogénicas
 - X_{AO} (mg DQO/l) → Bacterias Acetogénicas
 - X_{ACO} (mg DQO/l) → Organismos metanogénicos hidrogenotróficos
 - X_{HMO} (mg DQO/l) → Organismos metanogénicos hidrogenotróficos
 - X_{ACP} (mmol ACP/l) → Amorphus calcium phosphate ($Ca_3(PO_4)_2 \cdot xH_2O$)
 - X_{HAP} (mmol HAP/l) → Hydroxyapatite ($Ca_5(PO_4)_3OH$)
 - X_{MAP} (mmol MAP/l) → Struvita ($MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$)
 - X_{New} (mmol New/l) → Newberite ($MgHPO_4 \cdot 3H_2O$)
 - X_{Viv} (mmol Viv/l) → Vivianita ($Fe_3(PO_4)_2 \cdot 8H_2O$)
 - X_{Str} (mmol Str/l) → Strengite ($FePO_4$)
 - X_{Cal} (mmol Cal/l) → Carbonato calcico ($CaCO_3$)
 - X_{TSS} (mg TSS/l) → Sólidos suspendidos totales
 - X_{NVSS} (mg DQO/l) → no influyente – sólidos volátiles suspendidos

- Procesos
 - Hidrólisis Aerobia → Hidrólisis del sustrato lentamente biodegradable bajo condiciones aerobias ($S_{O_2} > 0$).
 - Hidrólisis Anóxica → Hidrólisis del sustrato lentamente biodegradable bajo condiciones anóxicas ($S_{O_2} \approx 0$, $S_{NO_3} > 0$). Este proceso es más lento que la hidrólisis aerobia.
 - Hidrólisis Anaerobia → Hidrólisis del sustrato lentamente biodegradable bajo condiciones anaerobias por organismos heterótrofos ($S_{O_2} \approx 0$, $S_{NO_3} \approx 0$). Este proceso es más lento que la hidrólisis aerobia.
 - Hidrólisis Anaerobia por X_{AO} → Hidrólisis del sustrato lentamente biodegradable bajo condiciones anaerobia por bacterias acidogénicas ($S_{O_2} \approx 0$, $S_{NO_3} \approx 0$). Este proceso probablemente es más lento que la hidrólisis aerobia.
 - Crecimiento Aerobio sobre S_F , S_{VFA} y S_{Ac} por bacterias heterótrofas → Estos procesos se modelan como tres procesos paralelos debido a la diferencia de sustrato. Tasa de crecimiento (μ_m) y coeficiente yield (Y_H) es idéntico. Oxígeno (S_{O_2}), nutrientes (S_{NH_4} and S_{PO_4}) y posiblemente pH (S_H) se producen sólidos retenidos y en suspensión (X_{TSS}).

- Crecimiento Anóxico sobre S_F y S_{NO_3} , S_{Ac} y S_{NO_3} y S_{VFA} y S_{NO_3} por bacterias heterótrofas → Estos procesos son similares al crecimiento aerobio, requieren de nitrato (S_{NO_3}) en lugar de oxígeno. En la deshidratación se libera pH y es inhibida por el oxígeno (S_{O_2}). La tasa de crecimiento máximo (μ_m) se reduce por el factor (η_{NO_3}) con el fin de simular que no todos los in X_{OHO} pueden realizar una mayor desnitrificación y que solo se puede conseguir con tasas reducidas.
- Crecimiento Anóxico sobre S_F y S_{NO_2} , S_{Ac} y S_{NO_2} y S_{VFA} y S_{NO_2} por bacterias heterótrofas → Estos procesos son similares al crecimiento anóxico sobre NO_3 pero necesita nitrito (S_{NO_2}) en lugar de nitrato (S_{NO_3}).
- Lisis Bacterias Heterótrofas → Este proceso es la suma de todos los procesos de desintegración de los organismos heterótrofos.
- Almacenamiento de X_{PAO} , S_{tor} sobre S_{Ac} y X_{PAO} , S_{tor} sobre S_{VFA} Organismos Acumuladores de fósforo (PAO) → PAO libera fosfato (S_{PO_4}) a partir del poly-fosfato ($X_{PAO,PP}$) y utiliza la energía producida por el acetato almacenado (S_{Ac}) y el propionico (S_{VFA}) como almacenamiento de materiales orgánicos de células internas $X_{PAO,Stor}$. Se produce principalmente en condiciones anaerobias.
- Almacenamiento Aerobio de $X_{PAO, PP}$, Almacenamiento Anóxico $X_{PAO, PP}$ sobre S_{NO_3} y Almacenamiento Anóxico de $X_{PAO, PP}$ sobre S_{NO_2} Organismos Acumuladores de Fósforo (PAO) → El almacenamiento de Ortho-phosphate (S_{PO_4}) requiere de energía como célula interna del poly-phosphate ($X_{PAO, PP}$), que la adquiere como alimento de $X_{PAO, Stor}$. El almacenamiento $X_{PAO,PP}$ es detenido si el contenido de fósforo de las PAO es muy elevado. Por esta razón, el término inhibición de $X_{PAO, PP}$ es introducido por el almacenamiento de f_{PP_PAO} , el máximo valor permisible es $f_{PP_PAO, Max}$. No todas las PAO pueden ser capaces de desnitrificar y vitrificar bajo condiciones anóxicas. Por esta razón, la tasa máxima de almacenamiento de Poly-fosfato se reduce por el factor $\eta_{PAO, Ax3}$ o $\eta_{PAO, Ax2}$ en condiciones anóxicas.
- Crecimiento Aerobio y Anóxico sobre S_{NO_3} y S_{NO_2} Organismos Acumuladores de Oxígeno (PAO) → Se supone que el crecimiento de PAO es solo con productos de almacenamiento orgánico interno de células $X_{PAO,Stor}$. Los organismos consumen ortho-phosphato (S_{PO_4}) como nutrientes. Crecimiento de PAO es un proceso aerobio o anóxico, que se puede hacer con oxígeno, nitrito o nitrato. No todos los PAO pueden ser capaces de desnitrificar y la desnitrificación puede proceder a una tasa reducida en condiciones anóxicas. Por esta razón, la tasa de crecimiento máximo de PAO se reduce por el factor $\eta_{PAO, Ax3}$ o $\eta_{PAO, Ax2}$ en condiciones anóxicas.
- Lisis de X_{PAO} , $X_{PAO, PP}$ y $X_{PAO, Stor}$ Organismo Acumuladores de Oxígeno (PAO) → El almacenamiento de $X_{PAO, PP}$ y $X_{PAO, Stor}$ se modela por separado de la biomasa X_{PAO} , los tres componentes deben tener diferentes procesos de desintegración. Los productos de lisis X_{PAO} se eligen en analogías con los productos de lisis X_{OHO} . Los productos de almacenamiento se descomponen en ortho-phosphato (S_{PO_4}) y productos de fermentación (S_A).
- Crecimiento de las bacterias Amoniooxidantes → El amonio se oxida a nitrito, lo que causará una demanda de oxígeno, dando como resultado un aumento de la biomasa autotrófica y una producción de nitrito. El amonio y el fósforo se utiliza como nutrientes para ser incorporados en la masa celular. Estos

- procesos tienen un efecto sobre el pH y la demanda de oxígeno. Este proceso debe ser en condiciones aerobias.
- Lisis Bacterias Amoniooxidantes → El proceso se modela de la misma manera que los heterótrofos decaen.
 - Crecimiento bacterias Amoniooxidantes → El proceso se modela de la misma manera que las bacterias amoniooxidantes.
 - Lisis Bacterias Amoniooxidantes → El proceso se modela de la misma manera que las bacterias amoniooxidantes.
 - Crecimiento Bacterias Nitritooxidantes → El Nitrito se oxide a nitrato, causará una demanda de oxígeno, dando como resultado un aumento de la biomasa autotrófica y una producción de nitrato. El amonio y el fósforo se utiliza como nutriente para ser incorporados en la masa celular. Estos procesos tienen un efecto sobre el pH y la demanda de oxígeno. Este proceso debe ser en condiciones aerobias.
 - Lisis Bacterias Nitritooxidantes → El proceso se modela de la misma que la desintegración heterotrófica.
 - Crecimiento Bacterias Acetogénicas → S_{VFA} se oxide a S_{Ac} y S_{H_2} dando como resultado un aumento de la biomasa acidogénica. El amonio y el fósforo se utilizan como nutrientes para ser incorporados en la masa celular. Estos procesos tienen un efecto sobre el pH. Este proceso debe ser en condiciones anaerobias.
 - Lisis Bacteria Acetogénicas → El proceso se modela de la misma manera que la desintegración heterotrófica.
 - Crecimiento Bacterias Acidogénicas → S_F se oxide a S_{Ac} , S_{VFA} y S_{H_2} dando como resultado un aumento de la biomasa acetogénica. El amonio y el fósforo se utilizan como nutriente para ser incorporados en la masa celular. Estos procesos tienen un efecto sobre el pH. Este proceso debe ser en condiciones anaerobias.
 - Lisis Bacterias Acidogénicas → El proceso se modela de la misma manera que la desintegración heterotrófica.
 - Crecimiento Bacterias Acetoclásticas → S_{Ac} se oxide a S_{CH_4} dando como resultado un aumento de la biomasa acetoclástica metanogénica. El amonio y el fósforo se utiliza como nutrientes para ser incorporados a la masa celular. Estos procesos tienen un efecto sobre el pH. Este proceso debe ser en condiciones anaerobias.
 - Lisis Bacterias Acetoclásticas Metanogénicas → El proceso se modela de la misma manera que la desintegración de heterotróficas.
 - Crecimiento Bacterias Hidrogenotróficas Metanogénicas → S_{H_2} se oxide a S_{CH_4} dando como resultado un aumento de biomasa hidrogenotrófica metanogénica. El amonio y el fósforo se utiliza como nutrientes para ser incorporados en la masa celular. Estos procesos tienen un efecto sobre el pH. Este proceso debe ser en condiciones anaerobios.
 - Lisis Bacterias Hidrogenotróficas Metanogénicas → El proceso se modela de la misma manera que la desintegración de heterotróficas.
 - Stripping de $S_{[CO_2]}$, S_{O_2} , S_{CH_4} , S_{H_2} , S_{NH_3} → Estos procesos simula el movimiento de cada componente del agua al aire.

- Precipitación de X_{ACP} , X_{Str} , X_{MAP} , X_{New} , X_{Viv} , X_{Var} , X_{Cal} , X_{HAP} y Disolución de X_{ACP} , X_{Str} , X_{MAP} , X_{New} , X_{Viv} , X_{Var} , X_{Cal} , X_{HAP} → Estos procesos simulan la precipitación y la redisolución de cada componente, que son procesos inversos y en estado estacionario por lo que deben estar en equilibrio.

III.3. MODELO BSM1 (BENCHMARK SIMULATION MODEL No.1)

El modelo BSM1 (Alex et al., 2008) surge de la necesidad de acabar con las siguientes dificultades:

- Variabilidad del influente
- Complejidad química, física y biológica
- Diferencia en los tiempos
- Falta de criterio de evaluación estándar para diferentes estrategias de control

La dinámica de entrada correspondiente al modelo BSM1 se utiliza para estudiar su evolución referente al caudal y cargas contaminantes. Para ello, se ha normalizado (en tanto por uno) la variación propuesta por el modelo BSM1 para cada uno de los parámetros de entrada del mismo (ej. caudal, concentración de compuestos solubles, particulados). Posteriormente, se han aplicado las dinámicas obtenidas a las características del agua afluyente de la planta de estudio, mediante el producto del valor medio de un determinado parámetro por la dinámica correspondiente calculada. A continuación se muestran dos gráficas para visualizar el explicado anteriormente:

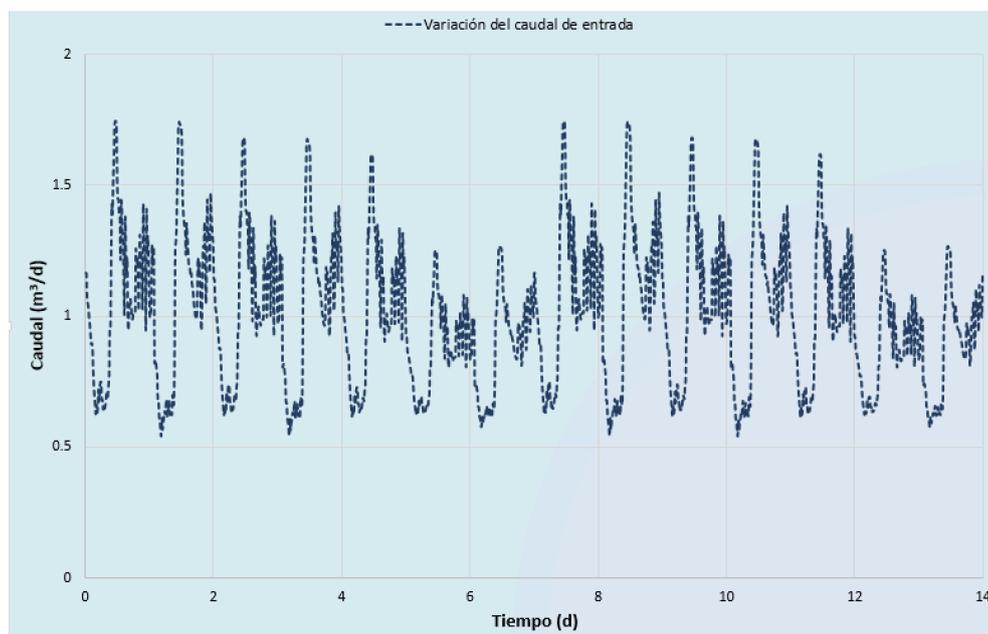


Gráfico 1: Variación del caudal de entrada a la EDAR en tanto por uno.

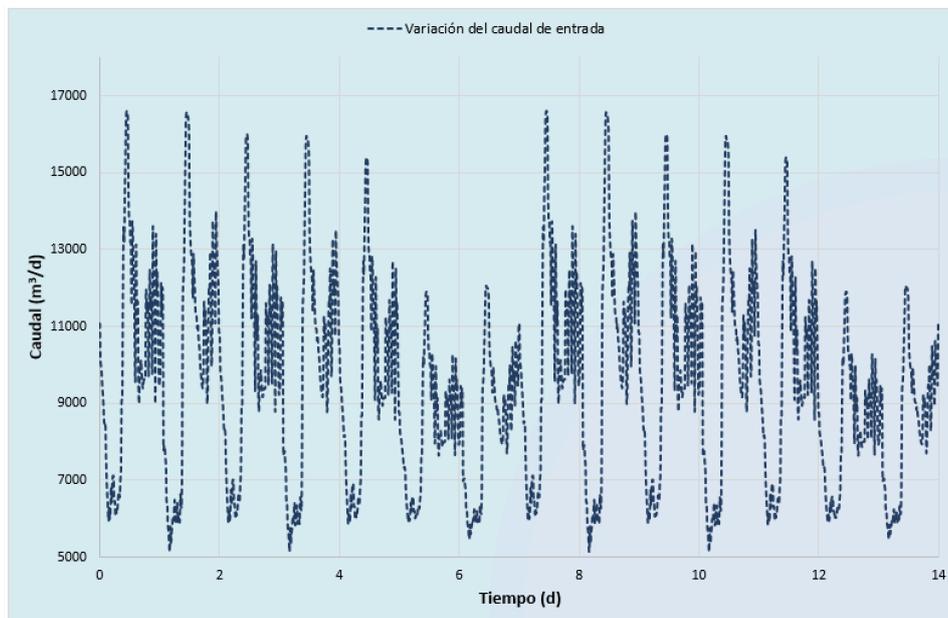


Gráfico 2: Variación del caudal de entrada a la EDAR tras realizar el producto entre la dinámica de entrada de caudal en tanto por uno y el valor promedio de caudal afluente a la EDAR estudiada.

Como se puede apreciar en el gráfico anterior el caudal cae respectivamente cada día por las noches y tiene un pico máximo de 16.590 m^3 aproximadamente en la mitad del día. Sin embargo al final de la semana, como coincide con el fin de semana la variación presenta un menor caudal máximo aproximadamente de 12.000 m^3 , teniendo en cuenta que el caudal medio de entrada es de $9.500 \text{ m}^3/\text{d}$. Además, a continuación se muestra el gráfico referente a la concentración de amonio a la entrada de la EDAR:

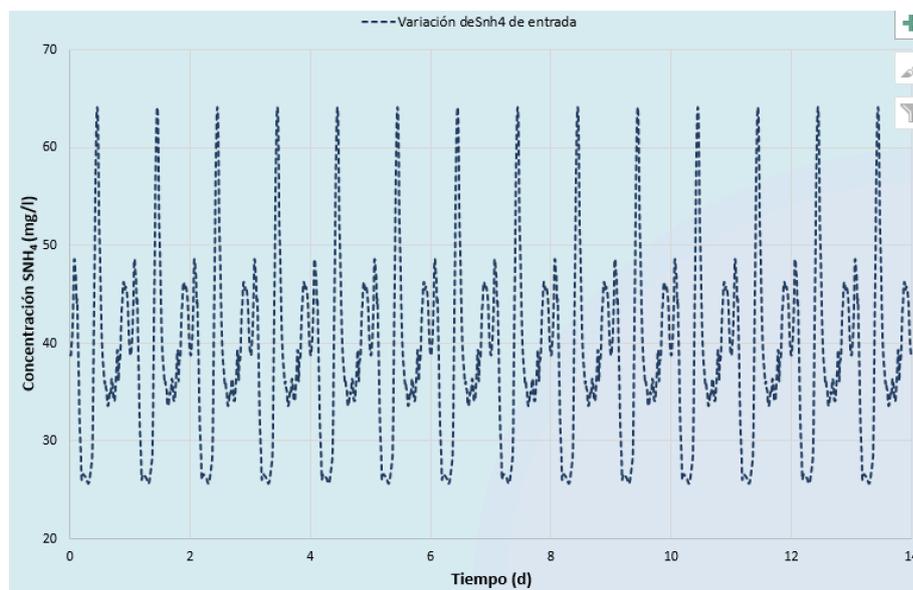


Gráfico 2: Variación del amonio de entrada a la EDAR.

En el caso del amonio se hace la evolución de 14 días al igual que en la evolución del caudal, referente a los días que dura la simulación. A destacar los valores altos de

aproximadamente de 60 mg/L, muy por encima del valor de vertido establecido, ya que dicho valor se establece en 10 mg/L, lo que esto trae consigo es una disminución elevada de dichos picos.

III.4. DESASS

El software de simulación DESASS (Ferrer et al., 2008) nace ante la necesidad de crear un simulador de estaciones depuradoras de aguas residuales que permita albergar la elevada complejidad de los procesos biológicos que surgen en las mismas.

El grupo CalAgua buscó con este simulador albergar todos los procesos físicos, químicos y biológicos que se recogen en el modelo BNRM. Por lo que DESASS es un simulador de EDAR diseñado y optimizado para la investigación de los procesos de eliminación de materia orgánica y nutrientes presentes en aguas residuales, para la evaluación de EDAR, para la operación de entrenamiento de personal y para propósitos educativos, con un particular énfasis en la velocidad de cálculo, presentación de gráficas y fácil manejo.

Este software permite diseñar, simular y evaluar esquemas completos de tratamiento, incluyendo tanto la línea de agua como la de fangos, pudiéndose representar desde sistemas tan sencillos como la eliminación de materia orgánica, hasta procesos más complejos en los que se incorporan los esquemas de eliminación biológica de nitrógeno, fósforo, fermentación de fango primario y digestión de fangos (aerobia y anaerobia).

Este simulador permite experimentar con diferentes unidades de tratamiento y controlar las consecuencias de modificación de las condiciones de operación sobre el proceso.

DESASS presenta las siguientes características:

- Fácil representación → permite representar gráficamente tanto en régimen estacionario como en régimen transitorio, la evolución de las variables de los procesos en cuestión. Se incluyen las concentraciones en los reactores y en el efluente de las variables del modelo BNRM1.
- Amplia simulación → simula una gran variedad de configuraciones de plantas permitiendo fijar los volúmenes, caudales y concentraciones que van desde planta de experimentación (escala piloto), hasta plantas de gran tamaño.
- Diferentes tipos de simulaciones → permite las simulaciones dinámicas de variaciones de cargas (variación de carga diurna, eliminación de fangos en exceso, relaciones de recirculación), así como la introducción de condiciones iniciales en los reactores en régimen transitorio.
- Rápido → cuenta con una gran rapidez de cálculo numérico, tanto para régimen transitorio como estacionario.
- Comparación inmediata de resultados para condiciones de verano e invierno, en régimen estacionario.
- Simultaneidad de esquemas → consideración de esquemas de forma simultánea, en serie o en paralelo, obteniéndose una mayor flexibilización en las configuraciones de sistemas de tratamiento.
- Posibilidad de simular los procesos de sedimentación en los decantadores y espesadores, además de los procesos biológicos que se pueden producir en ellos.

- Aireación → diseño de los sistemas de aireación, mediante tres tipos de maquinaria (difusores, turbinas y Venturi).
- Programa auxiliar → incluye un programa complementario para la actualización de la base de datos de la maquinaria.
- Exportar datos → permite la visualizar los datos en una hoja de cálculo Excel para facilitar su uso en la elaboración de informes.

Todas las características descritas facilitan que el software se pueda aplicar en diferentes situaciones, como las que se muestran a continuación:

- Diseñar nuevas plantas de tratamiento debido a que se puede simular los diferentes procesos y las diferentes condiciones.
- Diagnóstico y optimización de plantas ya existentes.
- Investigación para la reproducción de los resultados obtenidos en laboratorio o el estudio de los diferentes parámetros como afectan al desarrollo del proceso.
- Utilidad para la enseñanza, en la forma de visualizar el comportamiento de la EDAR y el simular mediante diferente alternativas buscando una óptima.
- La capacidad de extraer mediante nuevos esquemas de tratamiento, la viabilidad de los mismos por ser más adecuados que los tratamientos convencionales.
- Su utilización para el desarrollo de algoritmos de control y optimización del sistema de aireación basada en lógica difusa. Y este último punto es el más relacionado con el presente trabajo.

La simulación de la planta se ha hecho a través del software DESASS debido a que para desarrollar el modelo de compresión BNRM2, dicho modelo está disponible en el software DESASS. El programa cuenta con muchas más aplicaciones como: diseño, operaciones, capacitación de operadores, investigación de ahorro de costes, investigación / enseñanza, administración, planificación energética entre otros.

III.4.1 CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DE SISTEMAS DE FANGOS ACTIVADOS

Como se ha comentado anteriormente, para la EDAR estudio se ha validado y calibrado el modelo BNRM2, para ello se han seguido los siguientes pasos, se muestran en la siguiente figura:

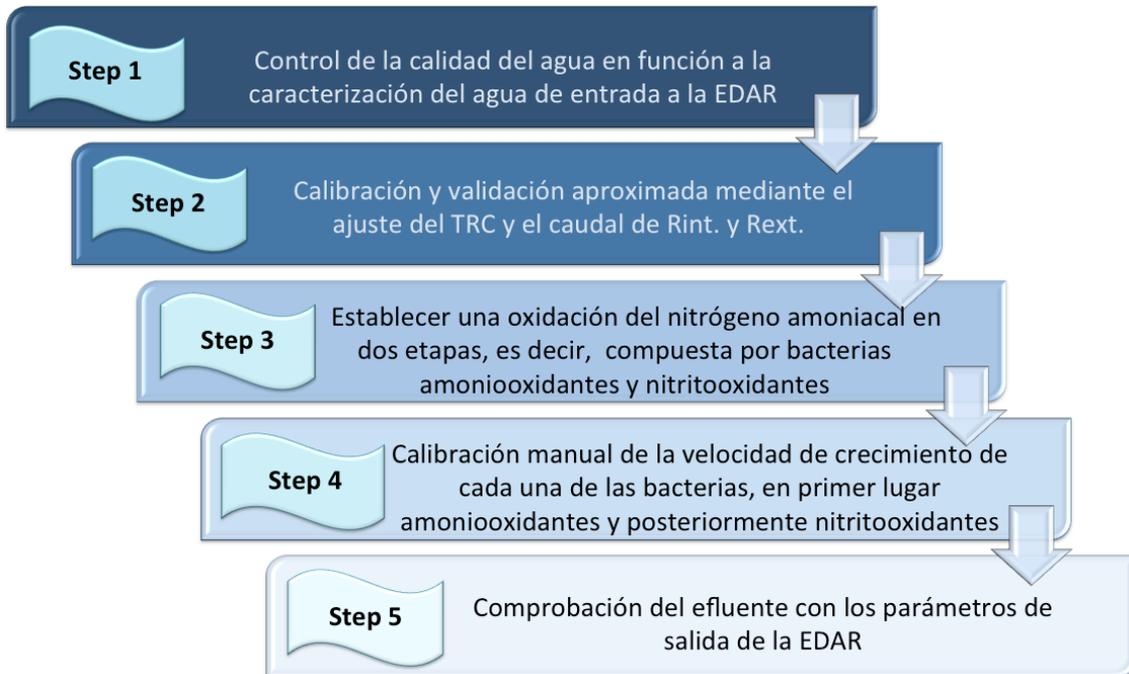


Figura 30: Etapas a seguir para la calibración y validación de los fangos activados en DESASS.

Step 1 → Esta etapa se centra en la evaluación de los datos referentes a la caracterización del agua de entrada a la EDAR. Principalmente se han observado si existe alguna anomalía en los datos proporcionados y calcular las fracciones de DQO, DBO, Nitrógeno, Fósforo y otros parámetros necesarios. Además se han calculado las constantes estequiométricas adecuadas para la caracterización del agua y de esta manera conseguir una adecuada caracterización.

Step 2 → Una vez conseguida la caracterización oportuna, se ha procedido a meter todos los datos en DESASS y comprobar que la caracterización coincide con la calculada de forma manual o con cualquier otra herramienta informática, como por ejemplo Excel. Mediante las variaciones oportunas en tiempo de retención celular (TCR) y los caudales de recirculación interna (Rint.) y recirculación externa (Rext.), se ha conseguido una primera aproximación de los parámetros de salida de la EDAR.

Step 3 → Como en la etapa anterior no se ha podido conseguir la calibración correcta del efluente, se procede a establecer una nitrificación en dos etapas. Lo que supone una calibración manual de los parámetros cinéticos de K_{NH_4} y μ_{max} pertenecientes a las bacterias autótrofas, con el fin de controlar las bacterias amoniooxidantes y nitritooxidantes.

Step 4 → Posteriormente se ha calibrado manualmente en primer lugar las bacterias amonioxidantes, es decir, que se ha ido calibrando manualmente la Uamm y una vez estabilizada se ha ido calibrando manualmente la Unit.

Step 5 → Finalmente se ha realizado una última comprobación para verificar que la salida de efluente se cumplía y que los balances estaban completamente ajustados.

III.5. LoDif BioControl

La aplicación LoDif BioControl (FuturENVIRO – Junio/June 2014) representa un software configurable que integra diferentes sistemas de control de los principales procesos a optimizar en las EDAR, conjugando la optimización del proceso con la reducción de los costes de operación implicados. Los principios que ha guiado su desarrollo han sido la facilidad de manejo para el usuario, la flexibilidad para configurar las diferentes estrategias de control en función de las características de la EDAR y la estandarización para facilitar y/o hacer posible la implementación de los algoritmos de control en cualquier tipo de EDAR.

En la actualidad, dependiendo del tipo de configuración y tipo de sondas con las que cuente la EDAR, LoDif BioControl permite la implementación de un amplio abanico de algoritmos de control para la optimización del proceso biológico en una EDAR, siendo los más importantes el control del sistema de aireación y el proceso de eliminación de nutrientes.

La aplicación LoDif BioControl se puede instalar en cualquier PC con entorno Windows, en la que exista al menos un servidor OPC configurado para la comunicación con la instrumentación implicada en la estrategia de control a implementar en la EDAR.

La instalación de dicha aplicación es muy sencilla, se realiza de forma totalmente guiada, mediante un asistente de configuración que permite definir los elementos sobre los que se desea aplicar la estrategia de control. Es por esta razón, que la herramienta se adapta a la mayoría de configuraciones de EDAR existentes, dando la posibilidad de añadir todo tipo de elementos como zonas de reacción (aerobias, anóxicas y anaerobias), sondas de todo tipo (oxígeno, pH, Redox, amonio, nitrato, caudal, presión, etc.), bombas de recirculación, agitadores, equipos de aireación (soplantes, turbinas, etc.) y válvulas.

Dependiendo de la configuración y configuración presente en la EDAR, es posible aplicar diferentes algoritmos de control que se encuentran disponibles en la aplicación, que se ajuste de la mejor manera posible a la configuración seleccionada.

Finalmente, la aplicación estará lista para comenzar a funcionar, una vez se hayan definido tanto el sistema, como los controladores que actuarán sobre él. Desde la interfaz del usuario, se puede activar/desactivar los diferentes sistemas de control definidos y modificar las condiciones de operación de los mismos.

Con el fin de facilitar el control del proceso por parte del personal de la EDAR, LoDif BioControl cuenta con diversas herramientas, se procede a comentarlas a continuación:

- Comportamiento como una SCADA → se muestran todos los elementos definidos en la configuración del sistema, actualizando en tiempo real información relativas a los

- mismos. Además se pueden modificar parámetros desde la SCADA directamente, dichos parámetros como consignas de oxígeno, apertura de las válvulas...
- Visualizador en tiempo real → la implementación de cualquier sistema de control mediante la aplicación descrita, no requiere de ningún esfuerzo adicional, es decir, no necesita modificaciones del SCADA, simplemente muestra el funcionamiento del controlador con todos los parámetros de entrada y las acciones de control comandadas.
 - Transferencia de la tecnología → se ha llevado a cabo por el grupo de investigación CalAgua, mediante implementaciones de los algoritmos de control integrados en la aplicación en diversas EDAR (Algesí, Denia-Ondara-Pedreguer, Pinedo, Gandia, Castellon...). En todas ellas se ha observado una mejora en cuanto a la estabilidad de los procesos biológicos, sedimentación de los fangos y un importante descenso en el consumo energético de los equipos de aireación.
 - Reducción de costes → no solo supone una mejora en las diferentes estrategias de control sin necesidad de modificar el SCADA de la EDAR, sino que también se han apreciado notablemente la reducción en los costes de operación.

III.5.1 SISTEMA DE CONTROL DE LA AIREACIÓN

El sistema de control de la aireación utilizado en este trabajo es el desarrollado por Ruano et al. (2013). El objetivo principal de este controlador, se centra en el mantenimiento de la concentración de oxígeno en el nivel deseado en cada reactor aerobio, otro de los objetivos del controlador es el mantenimiento de la presión mínima en la tubería de aire con el fin de garantizar un consumo mínimo de energía. Para asegurar que la presión está en el valor mínimo necesario para lograr el primer objetivo se tiene una de las válvulas de control siempre completamente abierta. Es por ello que la válvula que siempre permanece abierta corresponde al reactor con mayor demanda de oxígeno, en este caso es el aerobio, ya que las necesidades de oxígeno van variando a lo largo del día.

El sistema de control avanzado consiste en una combinación de controladores de lógica difusa con un sistema experto de control. Los controladores difusos son considerados como una distribución en cascada, dividiéndose en dos capas:

- Capa de campo → incluye dos tipos de controladores de lógica difusa destinados a controlar el oxígeno disuelto (OD) en forma de concentración en los diferentes reactores aerobios (N) y la presión de descarga de las soplantes (P).
- Capa de control.

Cabe destacar, que cada reactor aerobio consiste en una rejilla independiente de difusores de burbuja fina con una válvula de control y un sensor de oxígeno.

Los controladores destinados al control del oxígeno disuelto modifican la apertura de la válvula (ΔV_N) de acuerdo con la concentración de OD y la P del controlador modificando la velocidad de rotación de las soplantes (frecuencia de las soplantes) y el número mínimo de encendidos/apagados de las soplantes (n° soplantes encendidos/apagados) de acuerdo con la presión de descarga. Además, cada válvula de control está gobernada por un controlador de OD independiente, el controlador de presión se aire se implementa a fin de evitar que el

movimiento de una válvula de control afecte al caudal de aire por el resto de las válvulas de control existentes en el mismo sistema de tuberías de aire.

El controlador difuso en la capa de control, es el que establece que válvula debe mantenerse con la apertura máxima (V_{MAX}) y el set-point del controlador de presión de aire (P_{SP}). P_{SP} se modifica de acuerdo con la concentración de oxígeno en el reactor en el que la válvula de control está completamente abierta. En primer lugar, si cualquier válvula de control no está completamente abierta la consigna de presión se reduce para forzar a los controladores difusos de la capa de campo para abrir las válvulas. Este controlador supervisor garantiza que la presión del nivel de descarga siempre es el mínimo requerido para distribuir el aire a lo largo del sistema mantenimiento los niveles de OD deseados. Las acciones de control mandadas por el conjunto de controladores difusos son supervisadas por un sistema experto.

Este sistema experto consiste en un sistema de reglas basadas en el conocimiento dirigido a minimizar el consumo de energía minimizando la consigna de presión de aire y el número de veces que los sopladores son cambiados de encendido/apagado. Este sistema de reglas basadas en el conocimiento consiste en un grupo de reglas generales para cada EDAR y un grupo de reglas específicas relacionadas con las características particulares de cada EDAR y las especificaciones operacionales de la planta. Por ejemplo, este sistema de reglas basadas en el conocimiento no permite el movimiento de las válvulas de control forzada a abrirse por completo (regla general) y no permite el encendido de otro ventilador hasta que la diferencia entre la concentración de oxígeno y el valor de consigna alcance un valor predefinido (norma específica).

Este sistema de control avanzado es implementado en LoDif BioControl para su posterior calibración y validación. Se hace necesaria la conexión entre el sistema creado en DESASS y LoDif BioControl para la implementación y así poder calibrar el sistema buscando la opción óptima de estrategia de control de oxígeno. A continuación se muestran varias figuras representativas:

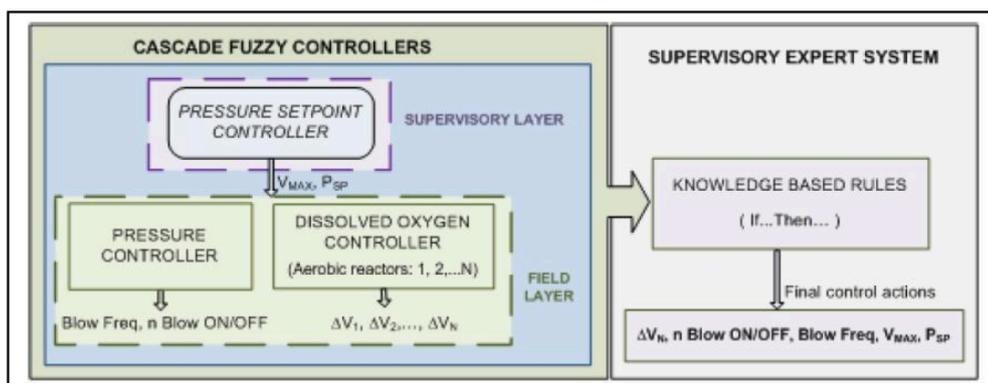


Figura 31: Estructura básica del control del sistema de aireación (Ruano et al., 2013).

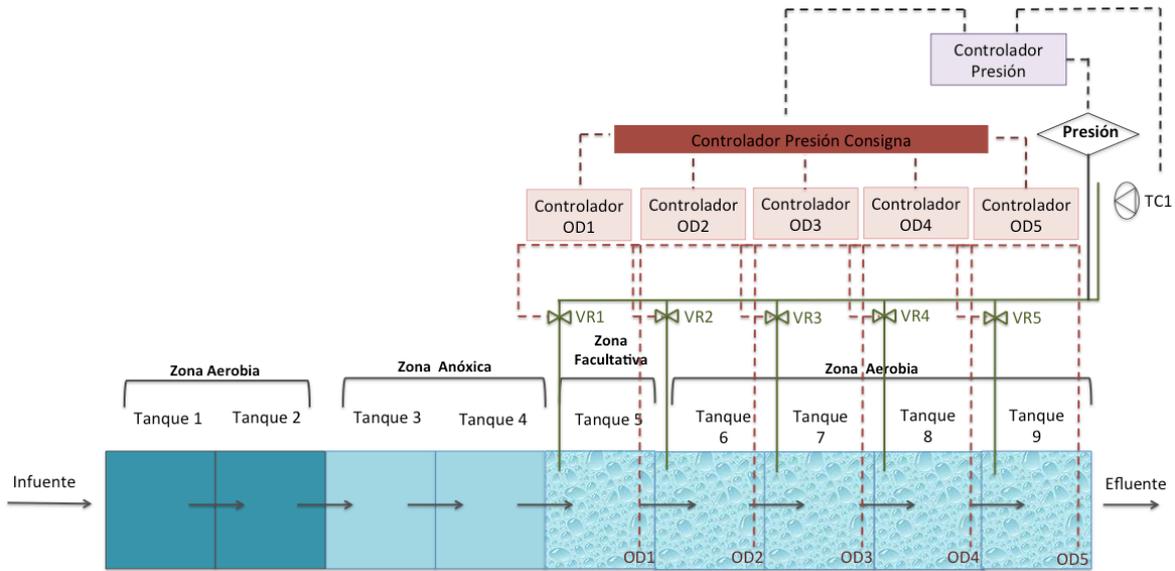


Figura 32: Estructura básica del control de aireación.

III.5.2 SISTEMA DE CONTROL DE NUTRIENTES (ABAC)

El sistema de control de amonio (ABAC) es un sistema de control supervisor, el cual establece una consigna de oxígeno disuelto mínima con el fin de garantizar las condiciones de vertido. Dicho sistema de control se lleva a cabo mediante una sonda de nutrientes, se basa en mantener una consigna de amonio al final del reactor aerobio, la cual modifica la consigna de oxígeno disuelto del sistema del control de aireación. A continuación se muestra una figura representativa:

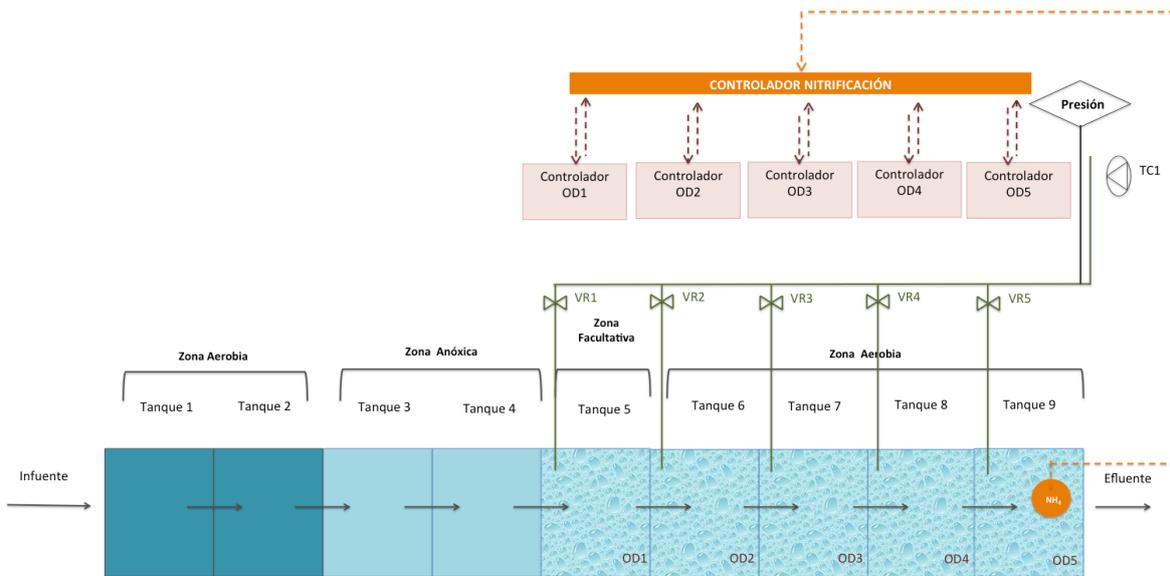


Figura 33: Estructura básica del control de nutrientes.

Para la simulación de este sistema de control, como se ha comentado anteriormente se han establecido unas consignas de oxígeno disuelto mínimas y máximas, y una consigna de amonio en la parte final del reactor biológico.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

IV.1. DISEÑO DEL ESQUEMA DE TRATAMIENTO EN ESTADO ESTACIONARIO

IV.1.1 CARACTERIZACIÓN DEL AGUA EFLUENTE

Para llevar a cabo el estudio de la EDAR se ha utilizado la caracterización del agua facilitada por la Universidad Politécnica de Gdansk, concretamente se ha hecho el estudio para la situación más desfavorable, que en este caso ha sido la estación de invierno. A continuación se muestra una tabla con los datos utilizados:

Tabla 6: Caracterización del agua de entrada utilizada en DESASS.

INFLUENTE	
Parámetros	Invierno
DQO _T (mg O/L)	643.44
DQO _S (mg O/L)	270.24
DQO _{SUSP} (mg O/L)	373.2
DBO _{Lim} (mg O/L)	317.75
DBO _{Lim S} (mg O/L)	260.56
DBO _{Lim Susp} (mg O/L)	57.2
Acidos Volátiles (mg Hac/L)	107.54
NH ₄ ⁻ (mg NH ₄ /L)	38.65
N _T (mg N/L)	65.78
N _S (mg N/L)	49.33
N _{SUSP} (mg N/L)	16.45
P _T (mg P/L)	13.93
P _S (mg P/L)	11.15
P _{SUSP} (mg P/L)	2.78
PO ₄ ⁺ (mg P/L)	10.70
Alcalinidad (mg CaCO ₃ /L)	360
SST (mg/L)	240.17
SSV (mg/L)	60.04

Como se puede observar en la tabla anterior se han recogido todos los datos necesarios para la simulación de la EDAR estudio en DESASS. Algunos datos no han sido facilitados como por ejemplo las fracciones suspendidas o algunas de las fracciones solubles y se han obtenido mediante las otras fracciones que si se conocían o mediante cierre de balances. Además, se ha ajustado la caracterización del agua de la forma más adecuada posible, con el fin de plasmar el agua real de salida.

En la tabla que se muestra a continuación aparece la información de las constantes estequiométricas:

Tabla 7: Parámetros estequiométricos introducidos en DESASS.

INFLUENTE	
Parámetros	Valores
i_{NBM} (mg N/mg DQO)	0.07000
i_{NXiBM} (mg N/mg DQO)	0.03000
i_{NXiBM} (mg DQO/L)	0.03000
i_{TSSXio} (mg DQO/L)	0.48266
i_{TSSXs} (mg DQO/L)	0.48266
i_{TSSXbm} (mg DQO/L)	0.7000
i_{Nsf} (mg N/L)	0.06670
i_{NXs} (mg N/L)	0.25761

En las siguientes imágenes se puede observar los valores de entrada introducidos en DESASS:

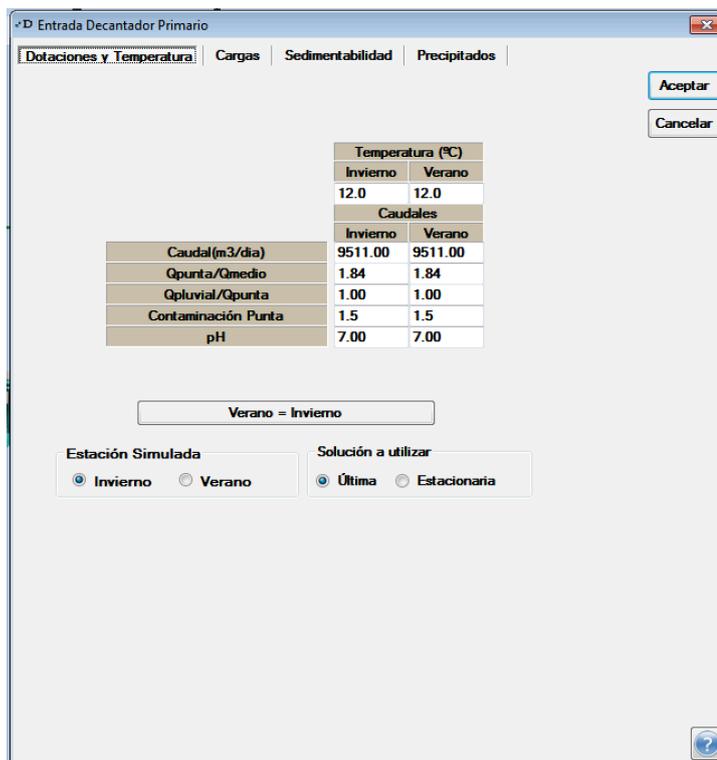


Figura 34: Apartado de Dotaciones y Temperatura de DESASS, en esta pestaña se ha introducido los datos de caudal, factor punta y pH.

Figura 35: Apartado de Cargas de DESASS, en esta pestaña se han introducido las cargas del agua de entrada.

IV.1.2 DISEÑO DEL ESQUEMA DE TRATAMIENTO

Para hacer una aproximación de la planta, se coloca cada uno de los elementos que forman la línea de aguas, en este caso se tendrá en cuenta solo una línea de tratamiento aunque la planta cuente con tres. La colocación de la línea de tratamiento con un sistema de fangos activados en flujo Bardenpho modificado (dos zonas aerobias, dos zonas anóxicas, una zona facultativa y una zona aerobia). Una vez colocado cada uno de los elementos necesarios para representar la línea de aguas en DESASS, se ha procedido a introducir los datos facilitados de la EDAR estudios referentes al reactor biológico. El reactor biológico tiene un volumen total de 7830 m³. A continuación se muestra una tabla con la distribución del reactor biológico y sus valores:

Tabla 8: Características físicas del reactor biológico.

REACTOR BIOLÓGICO				
Zonas		Volumen (m ³)	Porcentaje (%)	Porcentaje Total (%)
Anaerobio	1	720	4.60	9.20
	2	720	4.60	
Anóxico	1	1470	9.39	18.77
	2	1470	9.39	
Anóxico / Aerobio	1	520	6.64	6.64
Aerobio	1	1080	13.79	65.39
	2	1080	13.79	
	3	1480	18.90	
	4	1480	18.90	

Se debe de tener en cuenta que el sistema contiene una decantación primaria y una decantación secundaria. El esquema presenta una recirculación externa de fangos desde la decantación secundaria y una interna desde el reactor aerobio, concretamente desde la zona D (última zona) hacia el primer reactor anóxico. A continuación se muestra una tabla con las características de los decantadores:

Tabla 9: Características físicas del decantador.

DECANTADORES		
Parámetros	Decantador Primario	Decantador Secundario
Diámetro (m)	34	40
Profundidad(m)	2.5	3.5
Área (m ²)	908	5024
Nº	1	3

A continuación se muestra una figura que representa el esquema de tratamiento desarrollado en DESASS:

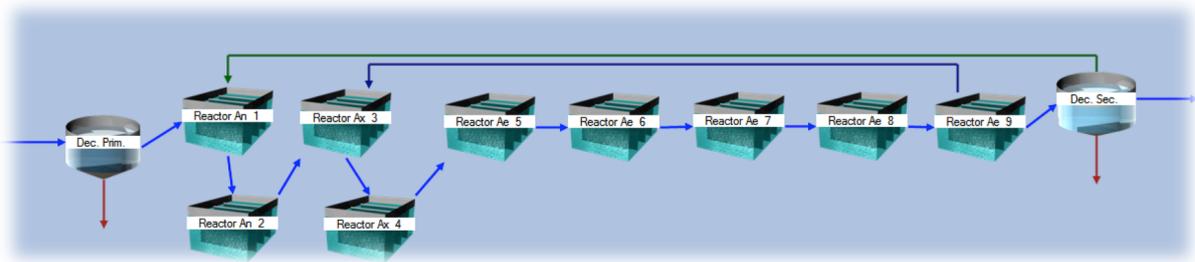


Figura36: Esquema de tratamiento inicial en DESASS equiparable al modelo BSM2.

Tabla 10: Datos necesarios para el cálculo de DESASS.

PARÁMETEROS	DESCRIPCIÓN	VALOR
TRC (d)	Tiempo de retención celular	21
$Q_{REC} + Q_{PURGA} / Q_{ENT}$	Tasa de extracción de lodos del decantador dividido por el caudal de entrada	0.55
Q_{PURGA} (m ³ /d)	Caudal de purga	189
Q_{REC}/Q_{ENT}	Tasa de recirculación de fangos	1.178
X_{TSS}	Concentración de sólidos en el reactor	3325

Como se puede apreciar en la tabla anterior el tiempo de retención celular se ha fijado en 21 días, después de realizar varias simulaciones. $Q_{REC} + Q_{PURGA}/Q_{ENT}$ y Q_{REC}/Q_{ENT} (siendo $Q_{rec} =$

caudal de recirculación, Q_{PURGA} = caudal de purga y Q_{ENT} = caudal de entrada) ha adquirido un valor de 0.55 y 1.178 son los que genera DESASS durante la simulación. El caudal de purga es el que obtiene el DESASS tras una serie de simulaciones y cambio de datos. La concentración de sólidos en el reactor es 3325 mg/L.

Otros datos que se aportaron a DESASS y que son de vital importancia para el ajuste son las concentraciones de oxígeno en los reactores aerobios. Se fija una concentración de oxígeno en el tanque facultativo y en el tanque aerobio de 2 mg/L en ambos tanques.

IV.1.3 CALIBRACIÓN DEL MODELO BNRM2

Una vez introducida en DESASS la caracterización del agua de entrada se introduce los parámetros del modelo BNRM2, con el fin de obtener una salida equivalente a los datos de salida facilitados. Es por esta razón que se han tenido que modificar algunos parámetros cinéticos teniendo en cuenta una temperatura de 12°C, en la situación más desfavorable. Los parámetros calibrados manualmente han sido principalmente el rendimiento de las bacterias autótrofas para condiciones aerobias, con el objetivo de ajustar los valores de salida de nitrógeno y amonio.

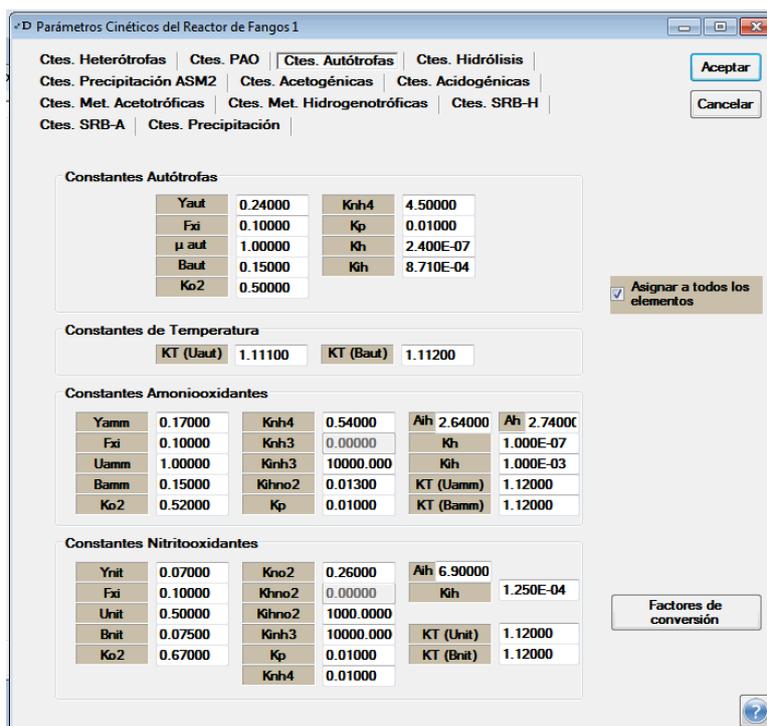


Figura 37: Constantes cinéticas de las bacterias Autótrofas en DEASS.

Como se puede observar en la figura anterior, se muestra todos los valores establecidos para las bacterias autótrofas, pero en este caso se ha modificado el valor de K_{NH_4} , donde su valor inicial era de 1 y calibrándolo manualmente se ha llegado a obtener un valor de 4,5 con el fin de poder obtener una mayor aproximación de la salida de amonio.

El cambio comentado anteriormente no es suficiente para obtener una salida de amonio equivalente a la facilitada en los datos de salida, es por ello, que se ha tenido que recurrir a una nitrificación en dos etapas. Para poder llevar a cabo la nitrificación en dos etapas, se ha

tenido que calibrar manualmente las Uamm y la Unit. A continuación se comentan los cambios realizados en los parámetros cinéticos para obtener la salida de amonio deseada.

Una vez establecido el valor que va adoptar K_{NH_4} , se vuelve a las constantes cinéticas de las bacterias autótrofas para proceder a la calibración manual de las bacterias amoniooxidantes y nitritooxidantes.

Para las bacterias amoniooxidantes se procede a calibrar de forma manual Uamm (velocidad de crecimiento), por defecto está establecida con un valor de 1 y en este caso se ha llegado a un valor de 0,53 con el fin de conseguir una mayor aproximación al valor deseado de amonio en la salida del efluente.

En el caso de las bacterias nitritooxidantes se procede a calibrar de forma manual Unit (velocidad de crecimiento), por defecto está establecida con un valor de 0,5 y en este caso se ha llegado a un valor de 1 con el fin de conseguir una mayor aproximación al valor deseado de S_{NO_3} en la salida del efluente. Pero no es suficiente calibrar de forma manual el parámetro Unit, debido a que de esta manera no se alcanza la salida de S_{NO_2} deseada y es por ello necesario la calibración manual del tiempo de recirculación interno, para obtener la salida del S_{NO_2} deseada.

De esta manera se consigue un ajuste de todas las fracciones del nitrógeno, es decir, tener controlado el amonio, nitrato y nitrito a la salida del efluente. A continuación se muestra la siguiente figura:

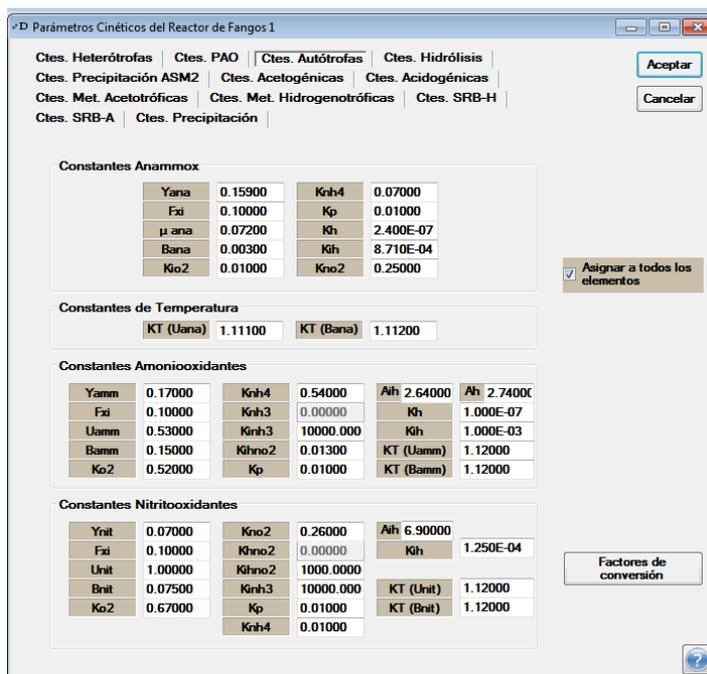


Figura 38: Constantes cinéticas de las bacterias Autótrofas para nitrificación en dos etapas en DESASS.

IV.1.4. DISEÑO DEL SISTEMA DE AIREACIÓN

Para el diseño del sistema de aireación se consideraron unas consignas de oxígeno disuelto tanto en la zona facultativa como zona aerobia de 2 mg/L. En cuanto al diseño de las soplantes, se han considerado un número total de 3 soplantes, de modo que se obtuviera una

mayor flexibilidad a la hora de regular la aireación en función de la demanda y poder así minimizar el consumo energético.

Los resultados obtenidos en el diseño del sistema de aireación se muestran en las siguientes tablas:

Tabla 11: Datos de los difusores en el sistema de aireación implementado.

Nº Tanques	REALES		STANDARD	
	Necesidades de O ₂ (kg/h)		Necesidades de O ₂ (Kg/h)	
	Cond. Medias	Cond. Punta	Cond. Medias	Cond. Punta
Reactor 5	20.8	45.3	39.0	75.7
Reactor 6	23.1	55.7	43.1	93.0
Reactor 7	21.7	25.3	40.5	42.2
Reactor 8	28.1	26.2	52.5	43.8
Reactor 9	22.7	23.2	42.4	38.7

Tabla 12: Datos de los difusores en el sistema de aireación implementado.

Nº Tanques	Marca	Modelo	Longitud (m)	Nº Difusores	Caudal (Nm ³ /h)		Perdida de Carga (mbar)	W _{AIRE} (Kg/seg)
					Q _{UNITARIO}	Q _{RECOMENDADO}		
Reactor 5	FLYGT	Membrana	23	168	6	6	637	0.34
Reactor 6	FLYGT	Membrana	23	224	6.1	6	637	0.46
Reactor 7	FLYGT	Membrana	23	224	2.4	6	637	0.18
Reactor 8	FLYGT	Membrana	23	288	2.1	6	637	0.20
Reactor 9	FLYGT	Membrana	23	288	1.6	6	637	0.16

Tabla 13: Datos de las soplantes en el sistema de aireación implementado.

Marca	Modelo	P _{MOTOR} (KW)	P _{ADS} (KW)	W _{AIRE} (Kg/seg)
LIGP	25.10	55.0	43.3	0.56
Unidades	Operativas	3	Perdida de Carga (mbar)	
	Reserva	1	700	

IV.1.5. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

Tras realizar la calibración el modelo se ajusta adecuadamente a los resultados experimentales. A continuación se muestran los siguientes resultados:

ENFLUENTE		
Parámetros	Reales	Simulados
DQO _T (mg O/L)	28.86	24.69
SST (mg/L)	12.64	10.23
NH ₄ ⁻ (mg NH ₄ /L)	2.58	2.40
N _T (mg N/L)	11.69	10.26

Figura 39: Comparación de los datos reales de salida frente a datos simulados en DESASS.

IV.2. SIMULACIÓN DINÁMICA DEL SISTEMA

Como ya se ha comentado en apartados anteriores, se ha utilizado la curva dinámica del agua de entrada referente al modelo BSM1. Con esto se ha adaptado la caracterización promedio del agua afluente a la EDAR a una posible curva dinámica de entrada, con el fin de obtener una representación de la dinámica de las variables estudiadas. Posteriormente dicha simulación dinámica se utilizará para la simulación del sistema de control de oxígeno disuelto y sistema de control de nutrientes.

A continuación se muestra una figura con el sistema de aireación propuesto para su diseño a través de las soplantes necesarias:

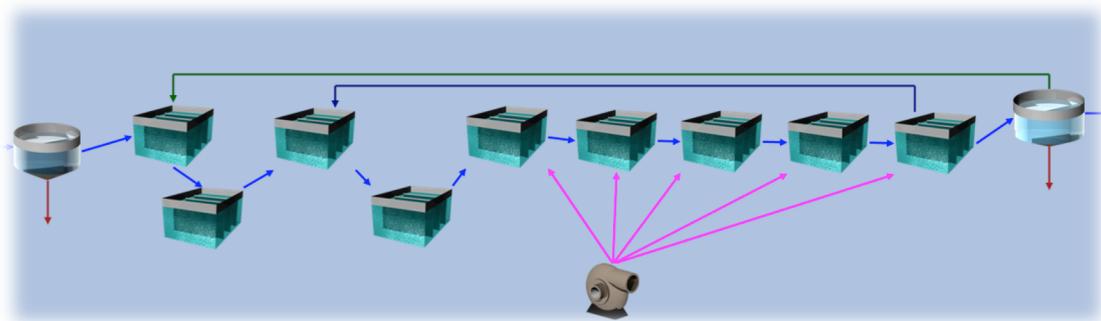


Figura 40: Esquema de la EDAR estudio a implementar el sistema de control configurado a la línea de aguas con el sistema de aireación.

IV.2.1. COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA EN MODO DINÁMICO

En cuanto al diseño del sistema de control por simulación se utiliza la dinámica del afluente descrita en el modelo BSM2 en apartados anteriores.

A continuación se muestran una serie de gráficos con los resultados obtenidos en la simulación para dicho período de simulación:

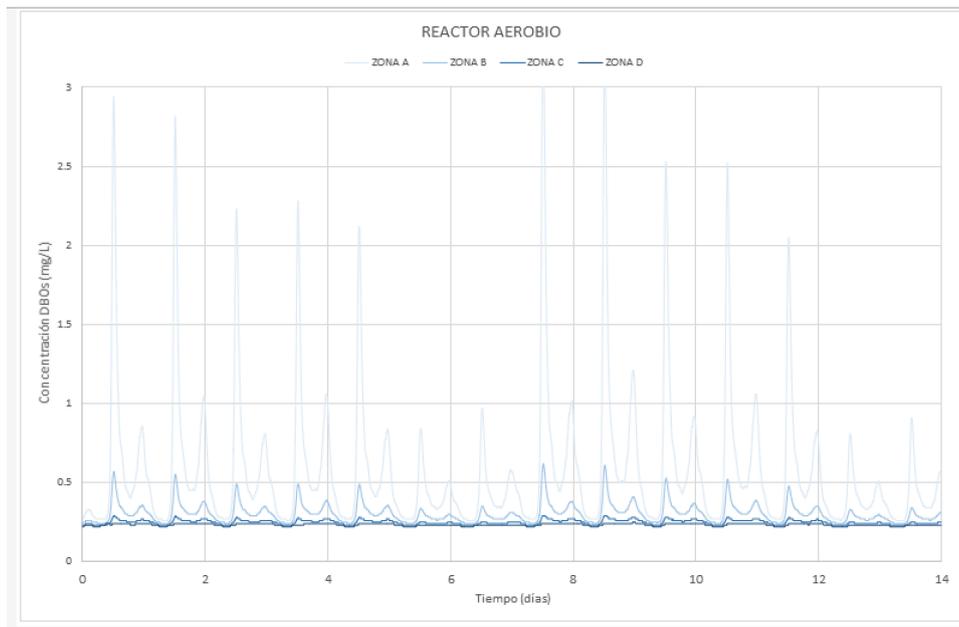


Gráfico 4: Evolución de la Demanda Biológica de Oxígeno Soluble a lo largo del sistema.

En la gráfica anterior se muestran los parámetros biológicos, con el fin de ver su evolución, es decir, su comportamiento en el tiempo dentro del sistema. Como se puede apreciar la simulación se hace a 14 días, ya que es la propuesta por el modelo BSM1. En la gráfica referente a la DBO soluble se aprecia como a medida que se va avanzando en el sistema los picos acusados de concentración van disminuyendo, hasta conseguir una concentración estable, como se puede apreciar en la línea de color azul oscuro referente a la zona D, última zona del reactor biológico. Cabe destacar que en el reactor biológico la zona D, es la más importante, ya que en ella se consumen prácticamente toda la DQOs y DBOs. A continuación se muestran las siguientes gráficas referentes a las fracciones de nitrógeno:

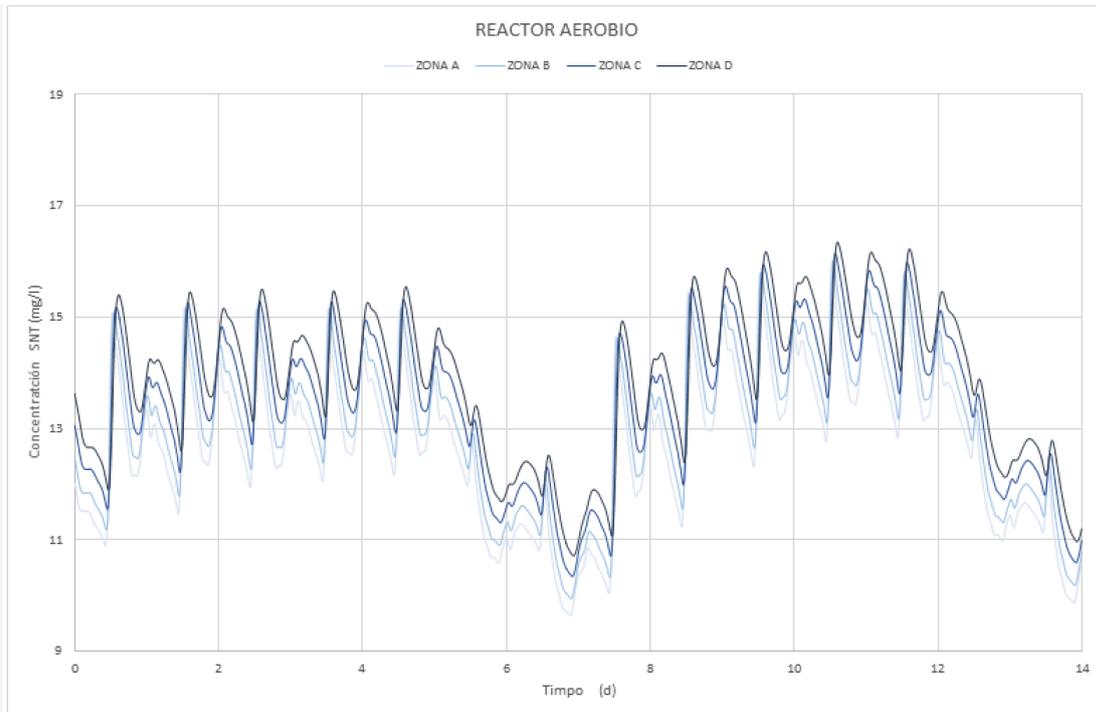


Gráfico 5: Evolución de la concentración de Nitrógeno Total en el sistema.

Como se puede apreciar el nitrógeno total va aumentando a medida que cambiamos de zona dentro del reactor aerobio, es decir, en la primera zona del reactor aerobio (Zona A) la concentración de nitrógeno total es menor que en la última zona (Zona D). La medida de los 14 días de simulación se encuentra aproximadamente en 16 mg/L, es decir, por encima del límite de vertido, según legislación el límite de vertido está en 15 mg/L para el nitrógeno total. Esto puede ser debido a que el nitrógeno o alguna de sus facciones no se estén eliminando en gran medida. Esta concentración de nitrógeno se podría reducir haciendo un control más idóneo de la aireación o con un control de nutrientes, controlando el amonio para que la nitrificación sea adecuada.

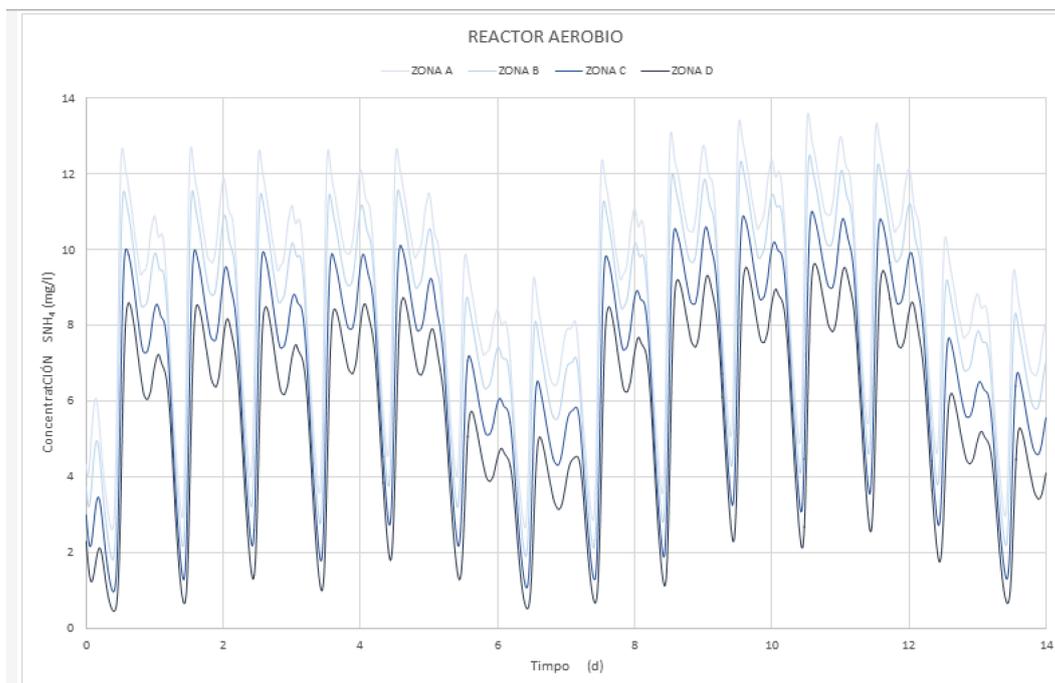


Gráfico 6: Evolución de la concentración de amonio en el sistema.

Sin embargo en el caso del amonio, se puede observar como la concentración va disminuyendo en función a la zona del reactor biológico en la que nos encontremos, debido al equilibrio de eliminación comentado anteriormente del nitrógeno. Es por esta razón que se tendrá una mayor concentración de amonio en la Zona A del reactor con respecto a la Zona D.

A continuación se muestra la tendencia del nitrato, que en este caso es coincidente con la tendencia del nitrógeno, es decir, mayor concentración de nitrato en la Zona D y una menor concentración en la Zona A.

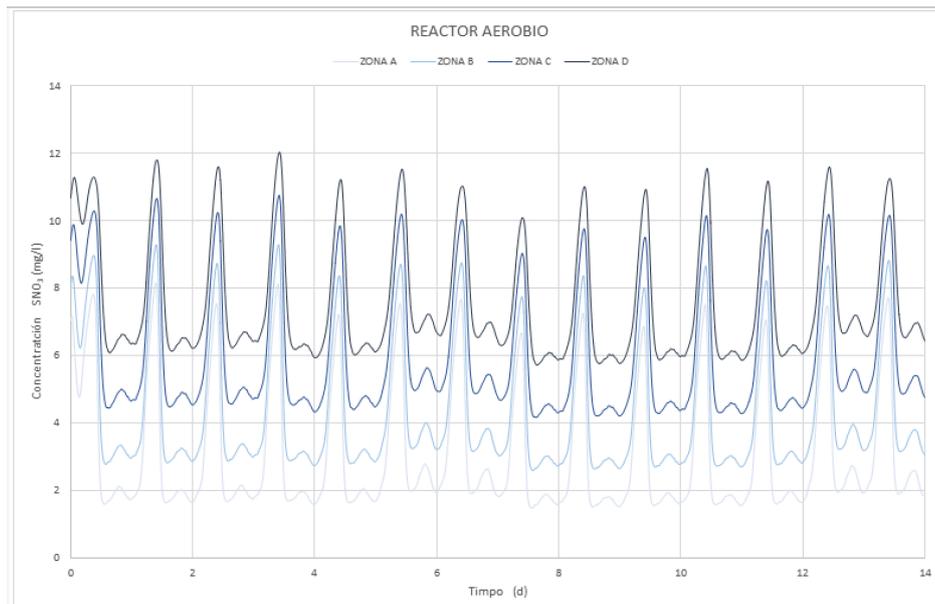


Gráfico 7: Evolución de la concentración de Nitrato en el sistema.

Por último, el diseño del sistema de control ha de buscar cumplir con el criterio más limitante en esta EDAR, es decir, que el nitrógeno total en promedio diario no supere los 15 mg/L. Además, dicho sistema de control ha de garantizar el cumplimiento de los requisitos de vertido pero con el mínimo consumo energético.

IV.3. DISEÑO Y SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL

IV.3.1 IMPLEMENTACIÓN Y CALIBRACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL

La implementación del sistema de control para la optimización de la EDAR se ha llevado a cabo mediante la plataforma LoDif BioControl. Para ello, se conectaron los software DESASS y LoDif BioControl mediante un protocolo de comunicación OPC, seleccionando en DESASS la herramienta de "Simulación con LoDif BioControl". A continuación se muestra la siguiente figura:



Figura 41: Ventana de selección del servidor OPC a utilizar para la conexión de LoDif BioControl con la EDAR real o virtual.

LoDif BioControl se configuró con la estructura de operación de la EDAR estudio diseñada en DESASS. En concreto, un grupo de reactores de fangos activados, correspondiente a la línea de agua simulada, cuenta con dos zonas anaerobias, dos zonas anóxicas, una zona facultativa y cuatro zonas aerobias. Tanto la zona facultativa como las zonas aerobias llevan asociadas una parrilla de difusores, una válvula de regulación y una sonda de control. Con respecto a la última zona aerobia, se le asocia una sonda de amonio. Además, se configuró un grupo de 3 soplantes con variador de frecuencia asociada a un captor de presión, las cuales son las encargadas de suministrar el oxígeno necesario a cada zona. A continuación se muestra la siguiente figura:

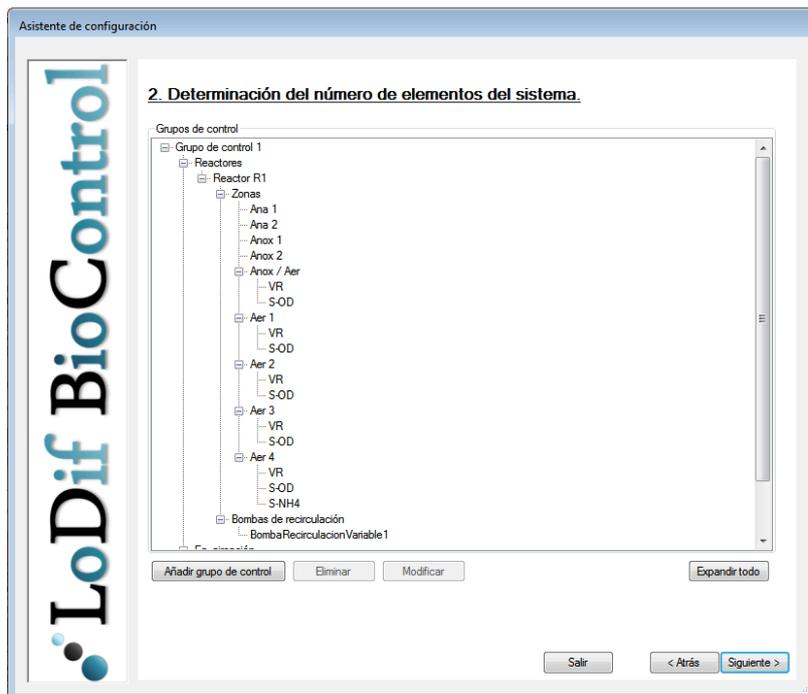


Figura 42: Ventana de selección de los grupos de control del sistema en LoDif BioControl.

A continuación se procede a la identificación de los ítems del servidor para finalizar con la configuración estableciendo la comunicación con DESASS – LoDif BioControl mediante el protocolo OPC, se muestra la siguiente figura:

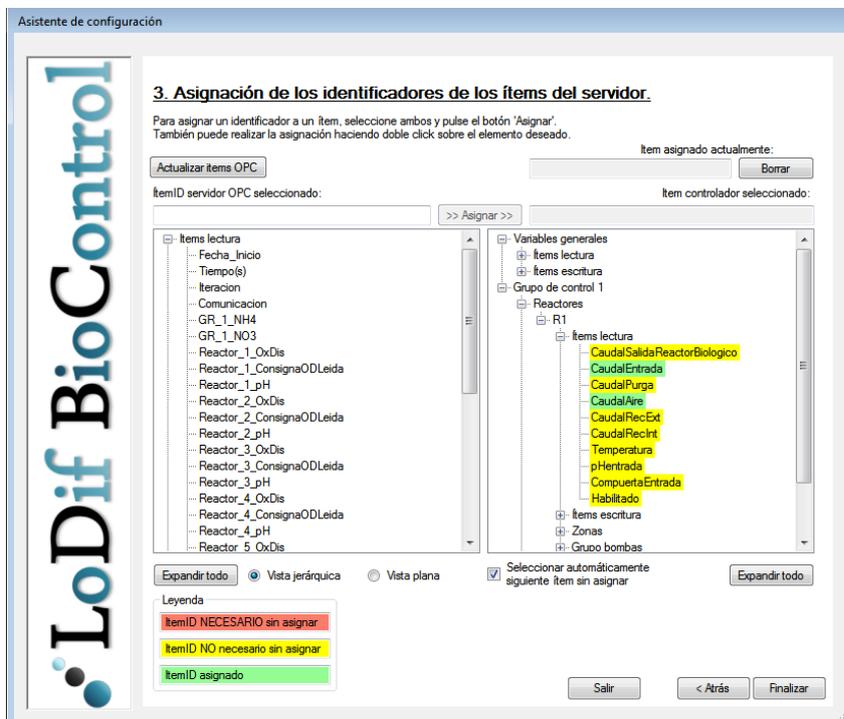


Figura 43: Ventana para la asignación de los ÍTEMS del servidor OPC en LoDif BioControl.

Tras establecer la comunicación DESASS – LoDif BioControl, se obtiene un SCADA que incluye los elementos asociados a la EDAR evaluada. A continuación se muestra la siguiente figura:

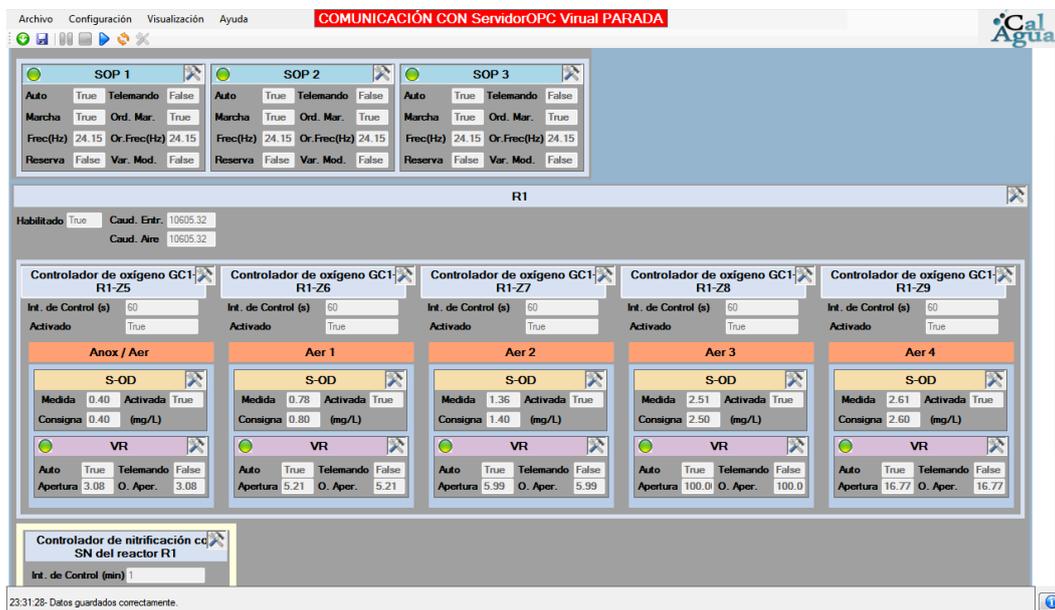


Figura 44: SCADA del proyecto en LoDif BioControl para la visualización de los valores del sistema.

En la parte superior de la SCADA aparecen las soplantes y el captor de presión asociadas al sistema, mientras que en la parte inferior de la figura se muestran las zonas con sistema de aireación, aparecen los controladores de oxígeno asociados a las diferentes zonas como por ejemplo la sonda de oxígeno y la válvula de regulación. A continuación no se puede apreciar, pero se vería la sonda de amonio asociada a la última zona del reactor aerobio.

Tras la configuración del esquema de tratamiento, se procede a la calibración de los diferentes sistemas de control asociados al sistema. Para la calibración de cada uno de los controladores de oxígeno, correspondientes a las cinco zonas aerobias del proyecto, fueron modificados los parámetros asociados a las funciones de pertenencia para el incremento de la apertura de la válvula, es decir, los parámetros asociados a las funciones de pertenencia de la etapa de desfuzzificación. A continuación se muestra una figura de cada una de las zonas para su visualización:

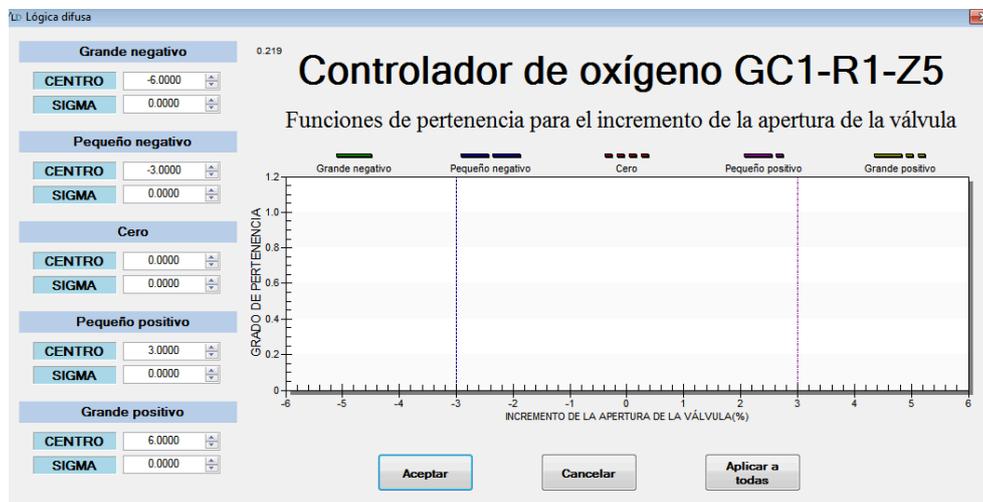


Figura 45: Pantalla de configuración de las curvas de lógica difusa para el control de oxígeno en la zona Anóxica/Aerobia con LoDif BioControl.

Como se puede apreciar en la figura anterior se muestra los valores que se le han asignado a las funciones de pertenencia del controlador para su calibración. Para la zona central de la curva se le ha asignado 0 para el valor CENTRO y 0 para el valor SIGMA, para zona grande negativo se le ha asignado -6 para el valor CENTRO y 0 para el valor SIGMA, para la zona grande positivo se le ha asignado 6 para el valor CENTRO y 0 para el valor SIGMA, para la zona pequeño negativo se le ha asignado -3 para el valor CENTRO y 0 para el valor SIGMA, finalmente para la zona pequeño positivo se le ha asignado el valor 3 para el valor CENTRO y 0 para el valor SIGMA.

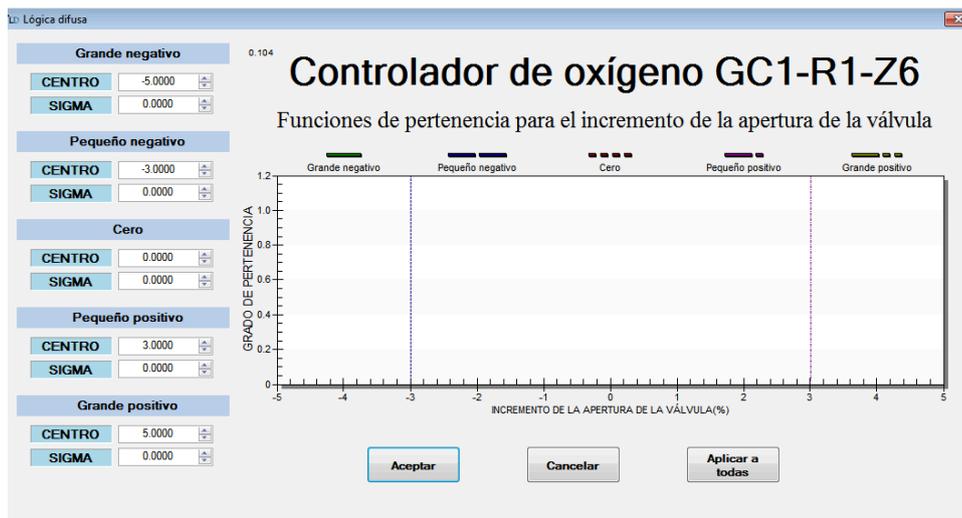


Figura 46: Pantalla de configuración de las curvas de lógica difusa para el control de oxígeno en la zona A del reactor aerobio con LoDif BioControl.

Como se puede apreciar en la figura anterior se muestra los valores que se le han asignado a las funciones de pertenencia del controlador para su calibración. Para la zona central de la curva se le ha asignado 0 para el valor CENTRO y 0 para el valor SIGMA, para zona grande negativo se le ha asignado -5 para el valor CENTRO y 0 para el valor SIGMA, para la zona grande positivo se le ha asignado 5 para el valor CENTRO y 0 para el valor SIGMA, para la zona pequeño negativo se le ha asignado -3 para el valor CENTRO y 0 para el valor SIGMA, finalmente para la zona pequeño positivo se le ha asignado el valor 3 para el valor CENTRO y 0 para el valor SIGMA.

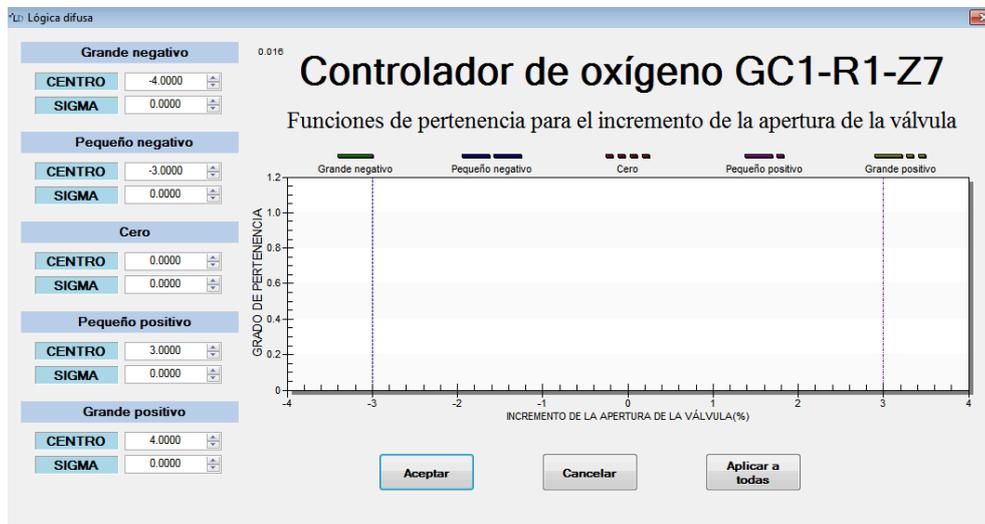


Figura 47: Pantalla de configuración de las curvas de lógica difusa para el control de oxígeno en la zona B del reactor aerobio con LoDif BioControl.

Como se puede apreciar en la figura anterior se muestra los valores que se le han asignado a las funciones de pertenencia del controlador para su calibración. Para la zona central de la curva se le ha asignado 0 para el valor CENTRO y 0 para el valor SIGMA, para zona grande negativo se le ha asignado -4 para el valor CENTRO y 0 para el valor SIGMA, para la zona grande positivo se le ha asignado 5 para el valor CENTRO y 0 para el valor SIGMA, para la zona pequeño negativo se le ha asignado -3 para el valor CENTRO y 0 para el valor SIGMA, finalmente para la zona pequeño positivo se le ha asignado el valor 3 para el valor CENTRO y 0 para el valor SIGMA.

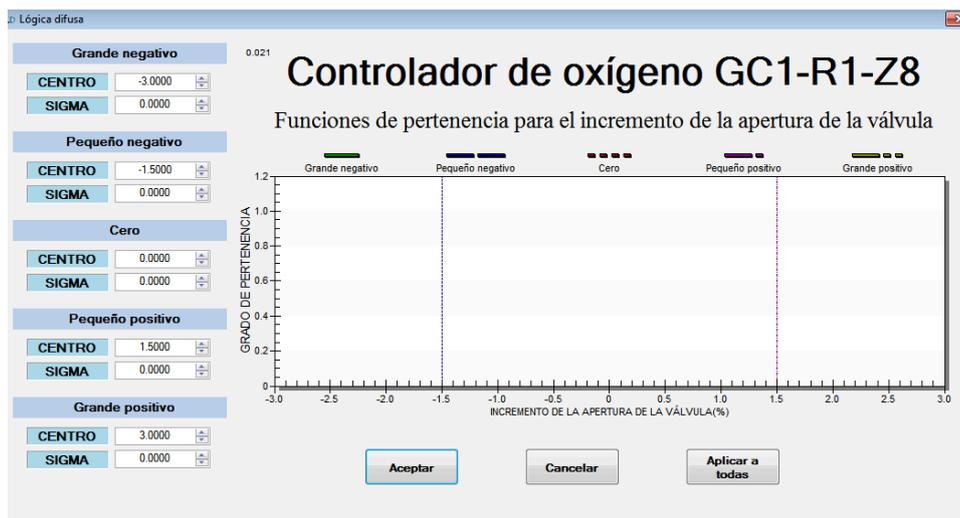


Figura 48: Pantalla de configuración de las curvas de lógica difusa para el control de oxígeno en la zona C del reactor aerobio con LoDif BioControl.

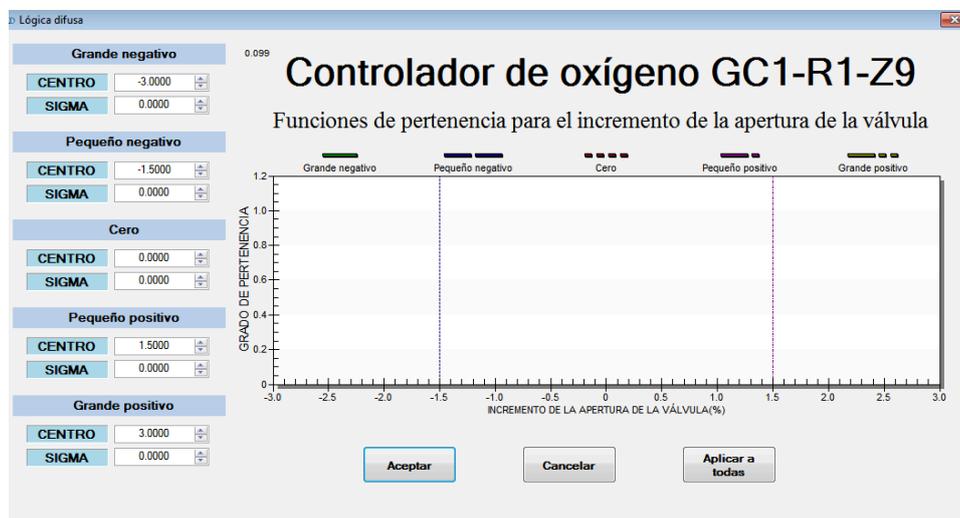


Figura 49: Pantalla de configuración de las curvas de lógica difusa para el control de oxígeno en la zona D del reactor aerobio con LoDif BioControl.

Como se puede apreciar en la figura anterior se muestran los valores que se le han asignado a las funciones de pertenencia del controlador para su calibración. Para la zona central de la curva se le ha asignado 0 para el valor CENTRO y 0 para el valor SIGMA, para zona grande negativo se le ha asignado -3 para el valor CENTRO y 0 para el valor SIGMA, para la zona grande positivo se le ha asignado 3 para el valor CENTRO y 0 para el valor SIGMA, para la zona pequeño negativo se le ha asignado -1.5 para el valor CENTRO y 0 para el valor SIGMA,

finalmente para la zona pequeño positivo se le ha asignado el valor 1.5 para el valor CENTRO y 0 para el valor SIGMA.

En cuanto a la calibración del controlador de presión y el controlador de presión de consigna se ha realizado de forma análoga a los controladores de oxígeno. A continuación se muestran las siguientes figuras:

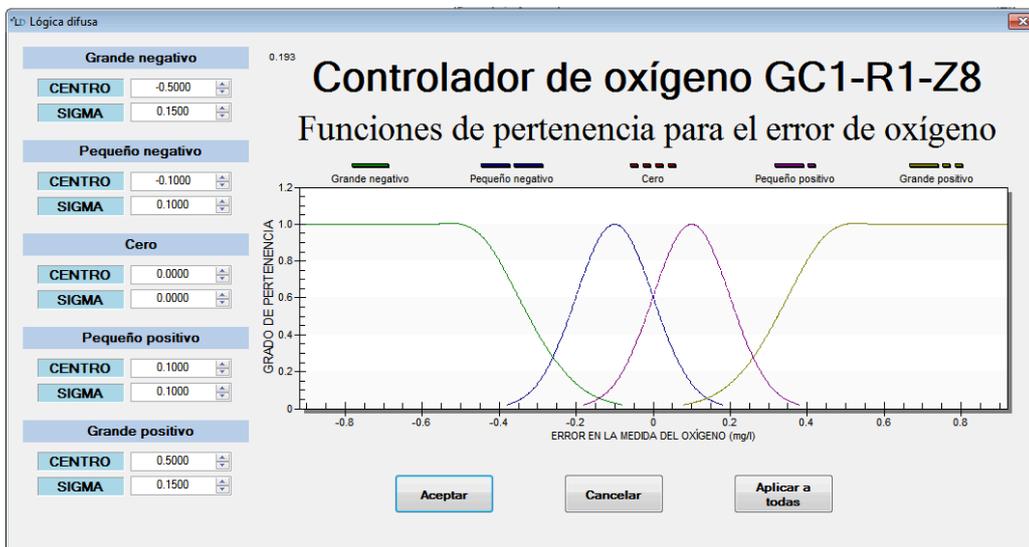


Figura 50: Pantalla de configuración de curvas de lógica difusa para el controlador de presión de consigna por error de oxígeno en LoDif BioControl.

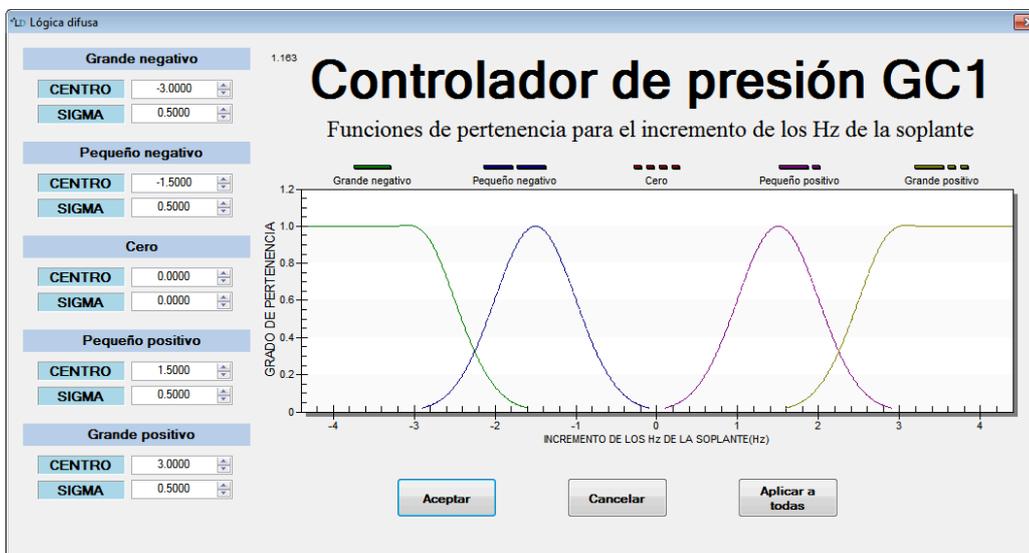


Figura 51: Pantalla de LoDif BioControl para la asignación de las funciones de pertenencia para incrementar los Hz de cada soplantes variando el centro y la apertura de las curvas.

Para la figura 53 se muestra los valores que se le han asignado a las funciones de pertenencia del controlador para su calibración. Para la zona central de la curva se le ha asignado 0 para el valor CENTRO y 0 para el valor SIGMA, para zona grande negativo se le ha asignado -0,5 para el valor CENTRO y 0,15 para el valor SIGMA, para la zona grande positivo se le ha asignado 0,5 para el valor CENTRO y 0,15 para el valor SIGMA, para la zona pequeño negativo se le ha asignado -0,1 para el valor CENTRO y 0,1 para el valor SIGMA, finalmente

para la zona pequeño positivo se le ha asignado el valor 0,1 para el valor CENTRO y 0,1 para el valor SIGMA.

Para la figura 54 se muestra los valores que se le han asignado a las funciones de pertenencia del controlador para su calibración. Para la zona central de la curva se le ha asignado 0 para el valor CENTRO y 0 para el valor SIGMA, para zona grande negativo se le ha asignado -3 para el valor CENTRO y 0,5 para el valor SIGMA, para la zona grande positivo se le ha asignado 3 para el valor CENTRO y 0,5 para el valor SIGMA, para la zona pequeño negativo se le ha asignado -1,5 para el valor CENTRO y 0,5 para el valor SIGMA, finalmente para la zona pequeño positivo se le ha asignado el valor 1,5 para el valor CENTRO y 0,5 para el valor SIGMA.

Finalmente, se obtuvo la combinación de consignas de oxígeno para cada una de las zonas aerobias que permitiese alcanzar concentraciones de nitrógeno total en el efluente justo por debajo de 15 mg/L. Esta concentración se obtuvo tras establecer las consignas de oxígeno siguientes:

- Zona facultativa (Anóx/Aer) → una concentración de oxígeno de 0,4 mg/L.
- Zona A (Reactor aerobio) → una concentración de oxígeno de 0,8 mg/L.
- Zona B (Reactor aerobio) → una concentración de oxígeno de 1,4 mg/L.
- Zona C (Reactor aerobio) → una concentración de oxígeno de 2,5 mg/L.
- Zona D (Reactor aerobio) → una concentración de oxígeno de 2,6 mg/L.

Con los valores establecidos se pretenden alcanzar la nitrificación.

Además como se ha establecido en este trabajo, también se llevará a cabo un control de nutrientes, es por esta razón que se procede a la calibración de cada uno de los componentes del sistema de control de nutrientes, es decir, se han calibrado las diferentes funciones de pertenencia relacionadas con el amonio. A continuación se muestra una figura de cada una de ellas:

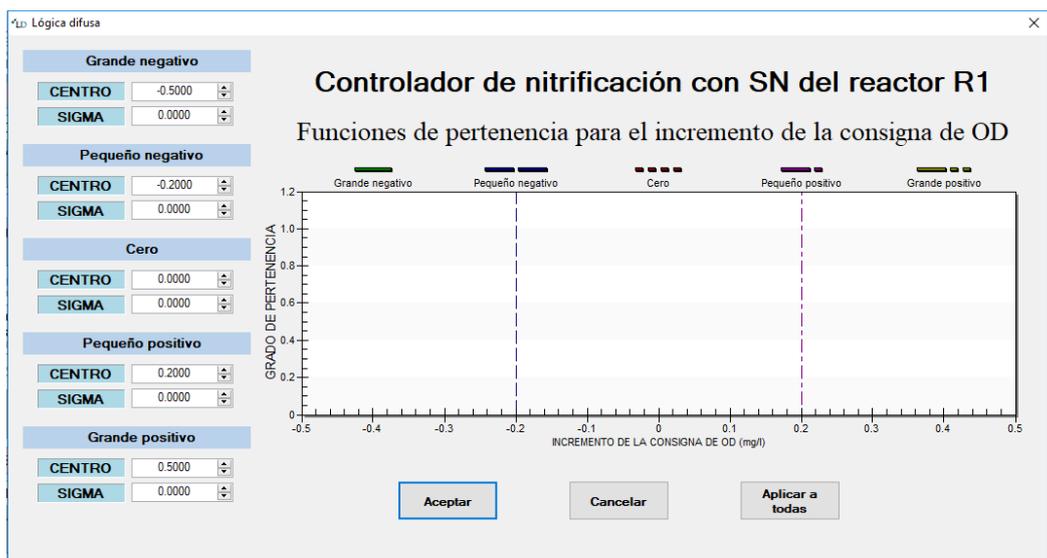


Figura 52: Pantalla de LoDif BioControl para la asignación de las funciones de pertenencia para el incremento de la consigna de OD para el sistema del control de nutrientes, variando el centro y la apertura de las curvas.

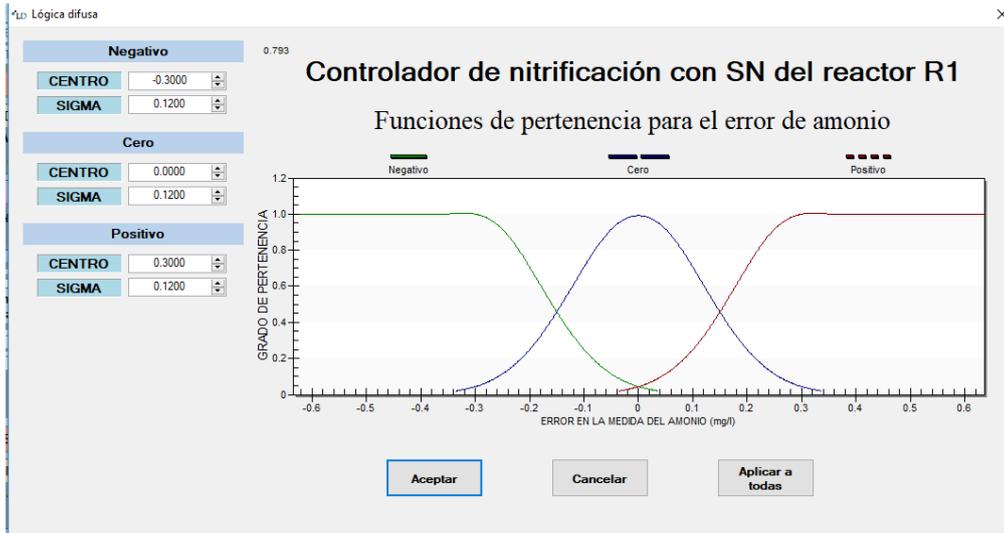


Figura 53: Pantalla de LoDif BioControl para la asignación de las funciones de pertenencia para el error del amonio para el sistema del control de nutrientes, variando el centro y la apertura de las curvas.

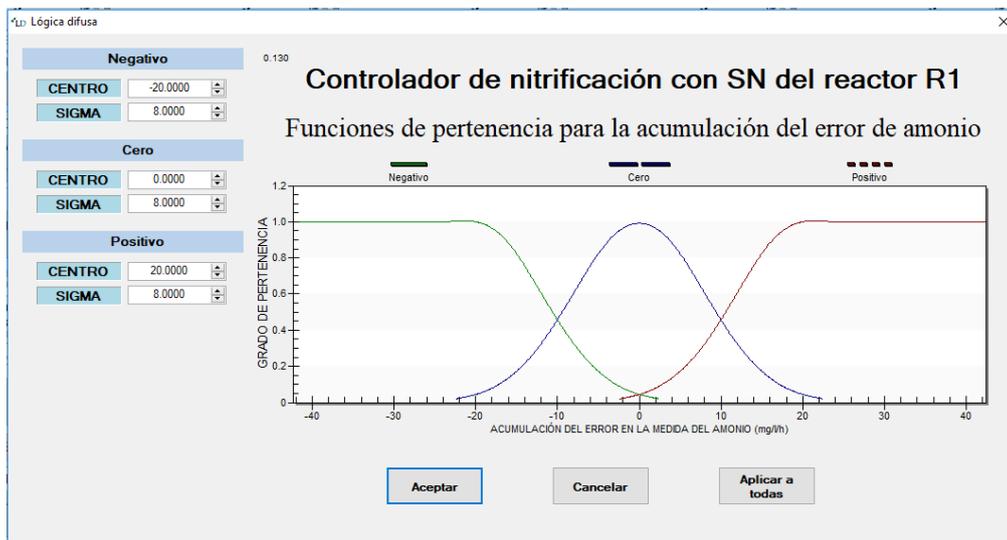


Figura 54: Pantalla de LoDif BioControl para la asignación de las funciones de pertenencia para la acumulación del error de amonio para el sistema de control de nutrientes, variando el centro y la apertura de las curvas.

En último lugar, se han establecido los siguientes valores para la calibración de cada una de las funciones de pertenencia que se pueden apreciar en las figuras anteriores, a continuación se procede a comentar la calibración establecida:

- Funciones de pertenencia para el incremento de la consigna de oxígeno: referente a la figura 55 se muestra los valores que se le han asignado a las funciones de pertenencia del controlador para su calibración. Para la zona central de la curva se le ha asignado 0 para el valor CENTRO y 0 para el valor SIGMA, para zona grande negativo se le ha asignado -0.5 para el valor CENTRO y 0 para el valor SIGMA, para la zona grande positivo se le ha asignado 0.5 para el valor CENTRO y 0 para el valor SIGMA, para la zona pequeño negativo se le ha asignado -0.2 para el valor CENTRO y 0 para el valor SIGMA, finalmente para la zona pequeño positivo se le ha asignado el valor 0.2 para el valor CENTRO y 0 para el valor SIGMA.

Funciones de pertenencia para el error del amonio: referente a la figura 56 se muestra los valores que se le han asignado a las funciones de pertenencia del controlador para su calibración. Para la zona central de la curva se le ha asignado 0 para el valor CENTRO y 0,12 para el valor SIGMA, para zona grande negativo se le ha asignado -0,3 para el valor CENTRO y 0,12 para el valor SIGMA, para la zona grande positivo se le ha asignado 0,30 para el valor CENTRO y 0,12 para el valor SIGMA.

- Funciones de pertenencia para la acumulación del error del amonio: referente a la figura 57 se muestra los valores que se le han asignado a las funciones de pertenencia del controlador para su calibración. Para la zona central de la curva se le ha asignado 0 para el valor CENTRO y 8 para el valor SIGMA, para zona grande negativo se le ha asignado -20 para el valor CENTRO y 8 para el valor SIGMA, para la zona grande positivo se le ha asignado 20 para el valor CENTRO y 8 para el valor SIGMA.

IV.3.2 FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE CONTROL

El funcionamiento del sistema de control se puede observar mediante las diversas gráficas que la herramienta LD Graphics ofrece por la aplicación de LoDif BioControl. En este apartado se mostrará el funcionamiento tanto de la simulación del sistema con control de oxígeno y el funcionamiento del sistema de presión como la simulación del sistema de control de nutrientes y sistema de presión. A continuación se expone cada situación:

➤ FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE CONTROL DE OXÍGENO

Las figuras que se muestran a continuación hacen referencia al funcionamiento del sistema de control de oxígeno en cada una de las zonas estudiadas, es decir, en la zona anóx/aero y zona aerobia.

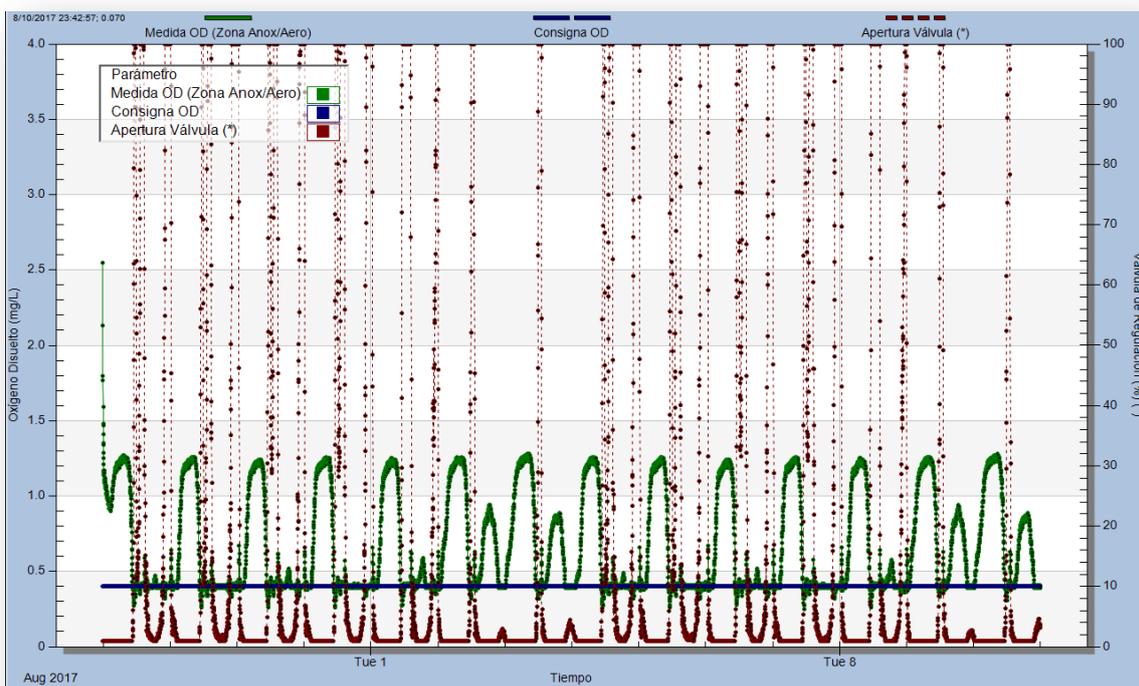


Figura 55: Gráfico de control de oxígeno en la zona Anóxica / Aerobia.

En la figura anterior se muestra el comportamiento de la válvula de regulación de oxígeno, en el sistema de aireación. Dicho gráfico es la representación del reactor anóxico / aerobio, es decir, de la zona facultativa. Como se puede apreciar la línea de color verde hace mención la medida obtenida, la línea de color azul hace mención a la consigna establecida y la línea de color rojo hace mención a la necesidad de apertura o cierre de la válvula de regulación. En este caso el valor de consigna se establece en 0,4 mg/L, es por esta razón que cuando la medida está por encima del valor establecido la válvula de regulación se cierra, con el fin de no aportar más oxígeno, sin embargo cuando la medida se encuentra por debajo del valor establecido la válvula de regulación se abre, con el fin de aportar el oxígeno necesario. Además se puede observar que en ocasiones, se alcanzan un valor aproximadamente de 1.4 mg/L. Por tanto el controlador mantiene en algunos momentos la apertura de la válvula al valor mínimo (5%), y en ocasiones con un valor máximo (100%), en función a la necesidad de oxígeno.

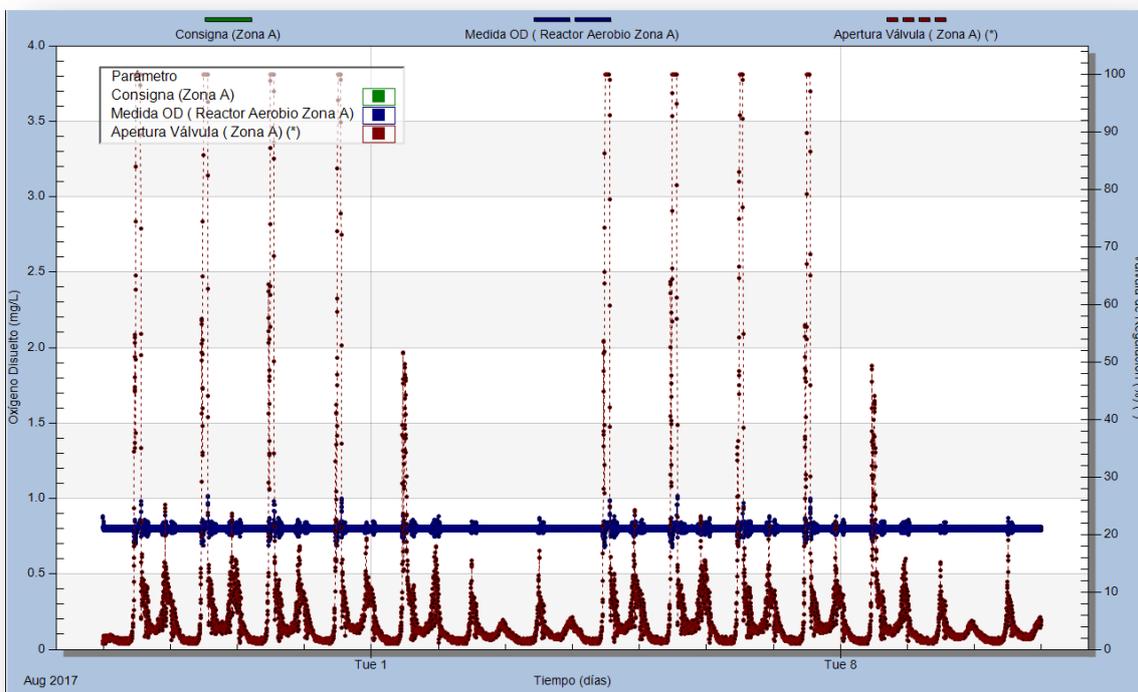


Figura 56: Gráfico de control de oxígeno en el reactor Aerobio (Zona A).

En la figura anterior, se puede apreciar la línea azul hace referencia a la medida obtenida, la línea verde hace referencia a la consigna establecida y la línea roja hace referencia a la válvula de regulación. En este caso, se aprecia que en situaciones puntuales se necesita cerrar la válvula de regulación para dejar de aportar oxígeno al sistema de aireación ya que el valor de consigna se establece en 0,8 mg/L y a veces no se ajusta a la consigna establecida. Dicha representación es del reactor aerobio, concretamente en la zona A.



Figura 57: Gráfico de control de oxígeno en el reactor Aerobio (Zona B).

En la figura anterior la línea de color verde hace referencia a la medida obtenida, la línea de color azul hace referencia a la consigna establecida y la línea de color rojo hace referencia a la válvula de regulación. En este caso, se aprecia que en todo momento la válvula trabaja a mínimo rendimiento, ya que la necesidad de oxígeno es constante y en todo momento se está aportando oxígeno al sistema de aireación, ya que la consigna se ha establecido en 1,4 mg/L. Dicha representación es del reactor aerobio, concretamente en la zona B.

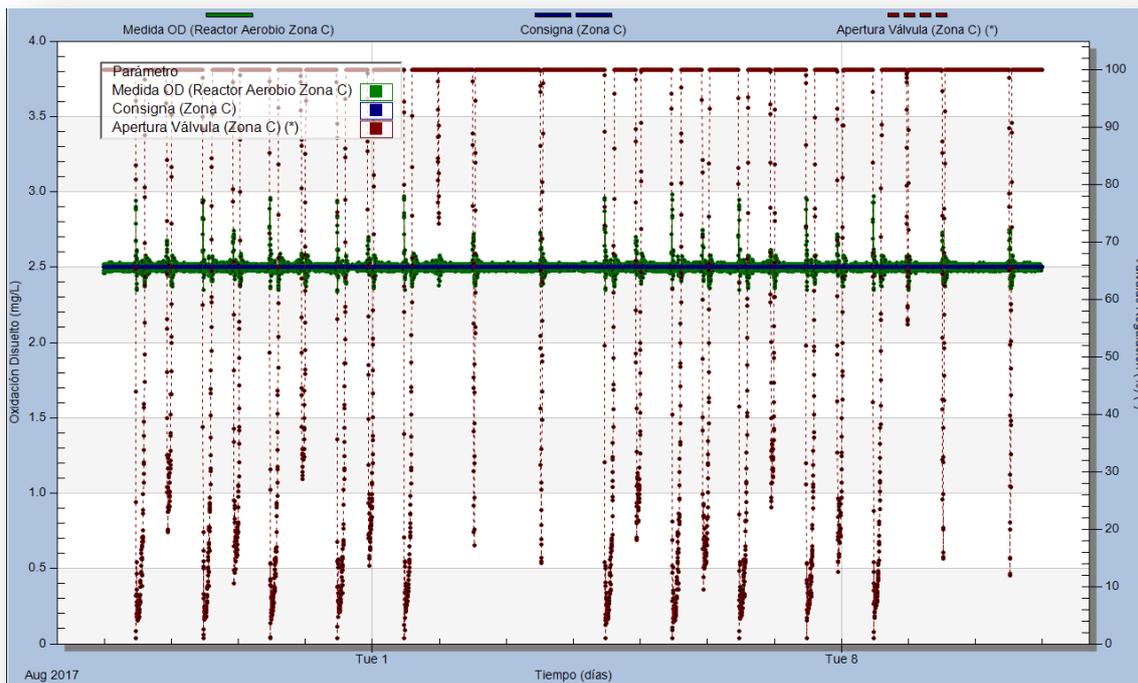


Figura 58: Gráfico de control de oxígeno en el reactor Aerobio (Zona C).

En la figura anterior, la línea verde hace referencia a la medida obtenida, la línea azul hace referencia a la consigna establecida y la línea roja hace referencia a la válvula de regulación. En este caso se aprecia que en todo momento la medida está por debajo, es decir, está controlada por la consigna establecida 2,5 mg/L, sin embargo la válvula de regulación está condicionada por la VR100, es decir, una vez ha parado la válvula de regulación vuelve a arrancar la VR100, ya que el sistema necesita un mayor aporte de oxígeno. Dicha representación es del reactor aerobio, concretamente en la zona C.

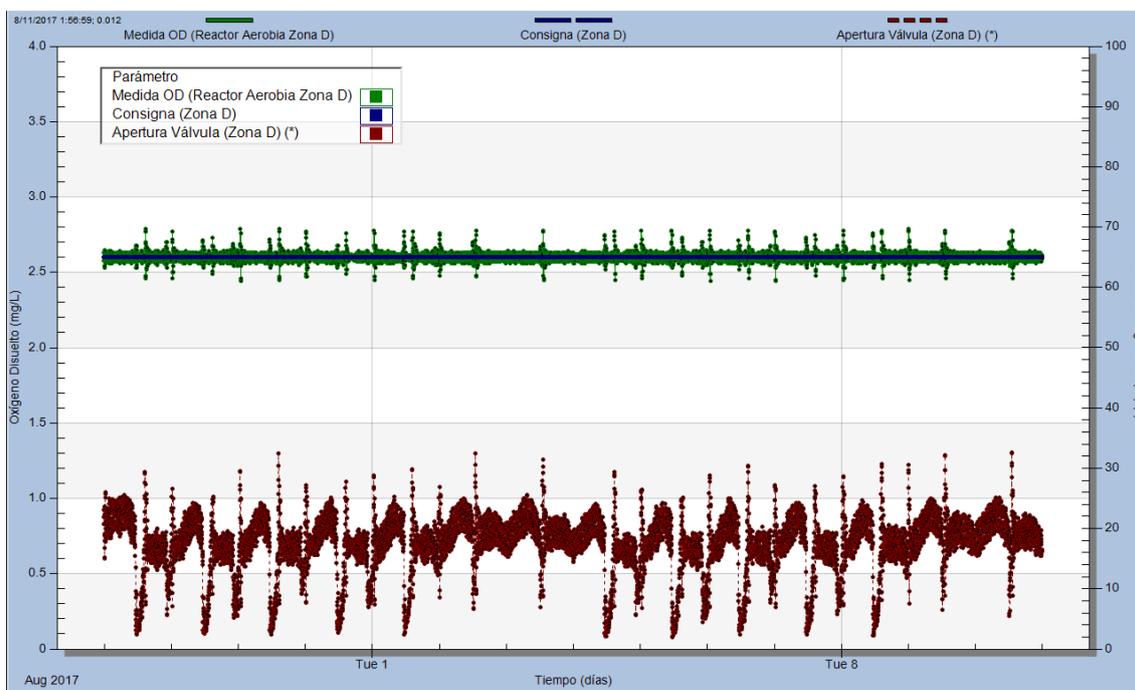


Figura 59: Gráfico de control de oxígeno en el reactor Aerobio (Zona D).

En este caso, como se puede apreciar en la figura anterior la línea de color verde hace referencia a la medida obtenida, la línea de color azul hace referencia a la consigna establecida y la línea de color rojo hace referencia a la válvula de regulación. Se aprecia que en todo momento la válvula trabaja a mínimo rendimiento, ya que la necesidad de oxígeno es constante y en todo momento se está aportando oxígeno al sistema de aireación. En este caso la consigna establecida 2,6 mg/L. Dicha representación es del reactor aerobio, concretamente en la zona D.

➤ FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE CONTROL DE LA PRESIÓN PARA EL CONTROL DE OXÍGENO

Las figuras que se muestran a continuación hacen referencia al funcionamiento del sistema de control de oxígeno en cada una de las zonas estudiadas, es decir, en la zona axón/Aero y zona aerobia.

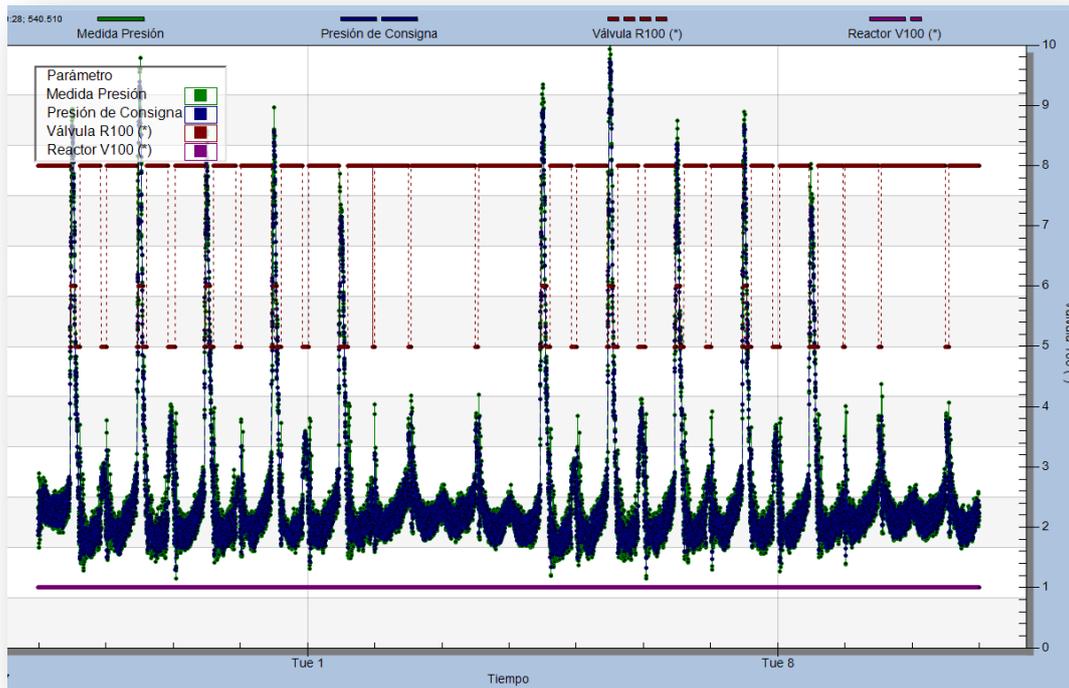


Figura 60: Gráfico que informa sobre el funcionamiento del sistema de control de la presión en lo que respecta a las válvulas que entran en funcionamiento durante la simulación.

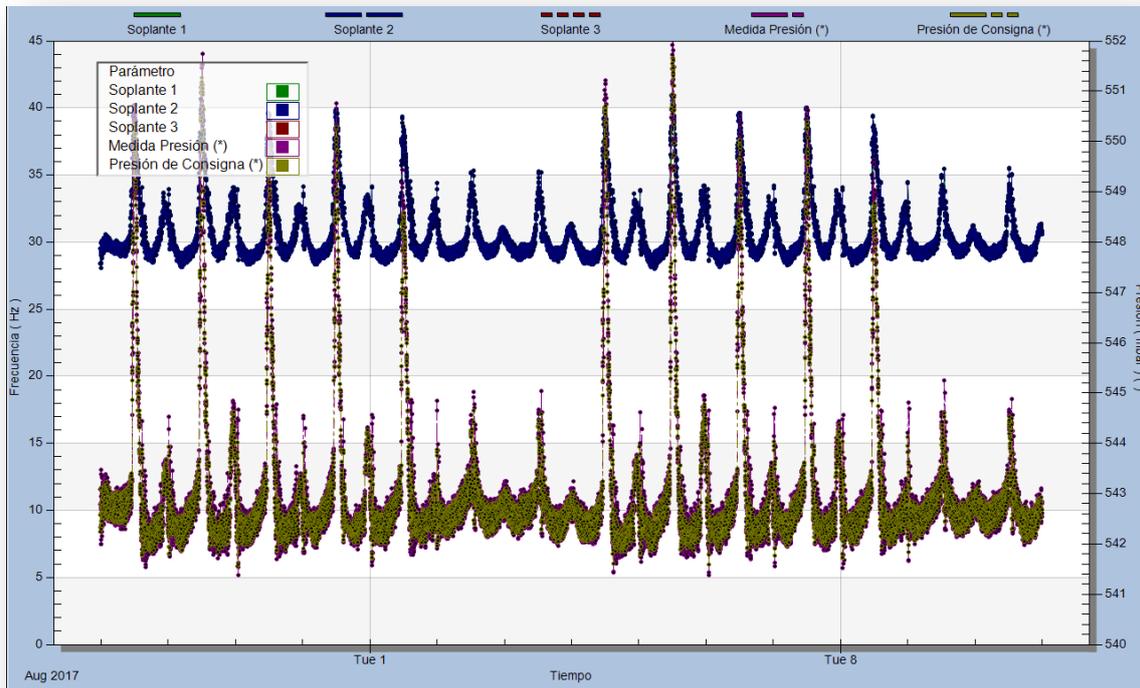


Figura 61: Gráfico sobre el funcionamiento del sistema de control de la presión junto con el valor de presión de consigna.

El controlador de la presión modifica la velocidad de giro de las soplantes en función de la presión de descarga. El objetivo es principalmente evitar tanto el déficit como el exceso de oxígeno en periodos de alta o baja carga. En la figura 63 se observa el funcionamiento del

sistema de control de la presión, que modifica la marcha / paro de las soplantes y su respectiva frecuencia para alcanzar la presión de consigna demandada por el control.

Como se puede observar en la figura 64, el sistema de control de la presión no mantiene las tres soplantes en marcha durante los 14 días de simulación y dos de ellas a diferente frecuencia de funcionamiento y una de ellas está prácticamente parada los 14 días de funcionamiento. La soplantes 1, referente a la línea azul trabaja a una frecuencia mucho mayor que la soplantes 2, referente a la línea roja. Esto es debido a que se reparte de forma equitativa entre los equipos. Por otra parte la soplantes 3 siempre está parada.

Los valores de presión del sistema de aireación entre un valor de 552 mbar principalmente en los días centrales de la simulación y un valor por debajo de 542 mbar en algunos días concretos. En la gráfica se aprecia que el valor de consigna está por debajo de la medida de presión obtenida, referente a la línea morada. Sin embargo, el valor de la válvula de regulación referente a la línea roja, demuestra que todos los valores obtenidos están por debajo de dicha válvula, es por ello que en todo momento intenta permanecer cerrada, figura 63.

En la figura 63 se muestra en cada momento cual es la zona con mayor déficit de oxígeno y por tanto la que mantiene la válvula abierta al 100% y es por esta razón que la válvula manda el valor referente a la presión de consigna. Además, como se puede apreciar el movimiento de presión de consigna reflejado en la gráfica viene condicionado por la concentración de oxígeno en dicha zona y su desfase con respecto a la consigna establecida.

➤ FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE CONTROL DE NUTRIENTES

Las figuras que se muestran a continuación hacen referencia al funcionamiento del sistema de control de nutrientes implantado en la zona D del reactor aerobio.

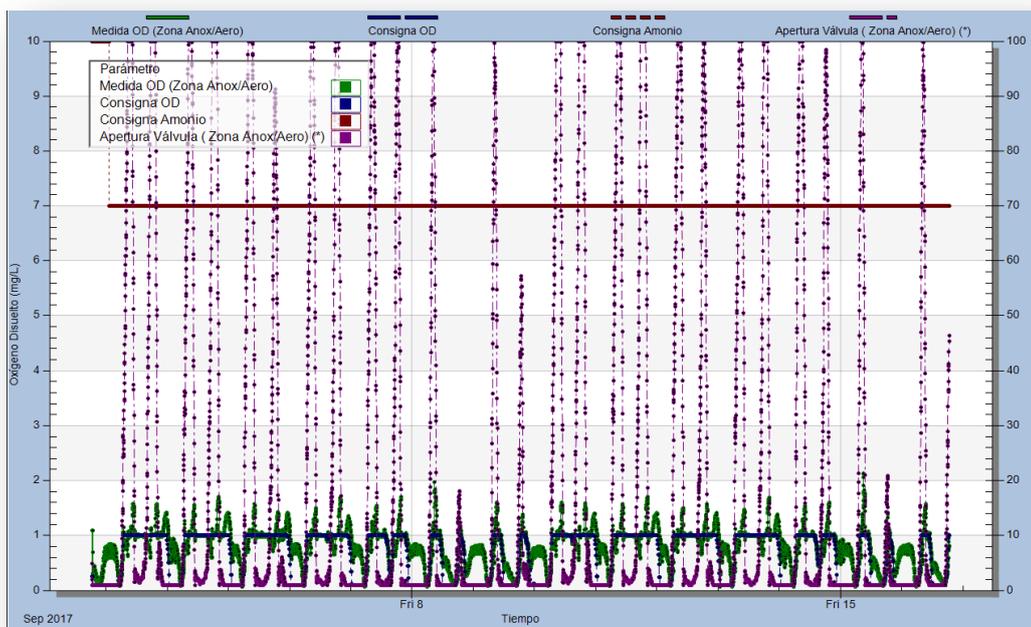


Figura 62: Gráfico de control de oxígeno en la zona Anóxica / Aerobia con control de nutrientes.

En la figura anterior se muestra el comportamiento de la válvula de regulación de oxígeno, en el sistema de aireación. Dicho gráfico es la representación del reactor anóxico / aerobio, es decir, de la zona facultativa. Como se puede apreciar la línea de color verde hace mención la medida obtenida de oxígeno disuelto, la línea de color azul hace mención a la consigna establecida de oxígeno disuelto, la línea de color rojo hace mención a la consigna establecida de amonio y la línea de color morado hace mención a la necesidad de apertura o cierre de la válvula de regulación. En este caso el valor de consigna se establece en un rango de 0,1 mg/L y 1 mg/L, es por esta razón que cuando la medida está por encima del valor establecido la válvula de regulación se cierra, con el fin de no aportar más oxígeno, sin embargo cuando la medida se encuentra por debajo del valor establecido la válvula de regulación se abre, con el fin de aportar el oxígeno necesario. Además se puede observar que en ocasiones, se alcanzan un valor aproximadamente de 2 mg/L. Por tanto el controlador mantiene en algunos momentos la apertura de la válvula al valor mínimo (5%), y en ocasiones con un valor máximo (100%), en función a la necesidad de oxígeno. Cabe destacar que al establecer el control de amonio, la necesidad de oxígeno está más controlada y la válvula de regulación actúa de una forma mas equilibrada, ya que la medida de oxígeno se ajusta mejor al rango de consigna establecido para dicho parámetro. En este caso no se comenta el comportamiento del amonio, ya que el control de nutrientes se establece en la zona final del reactor aerobio. Se comentará mas adelante.

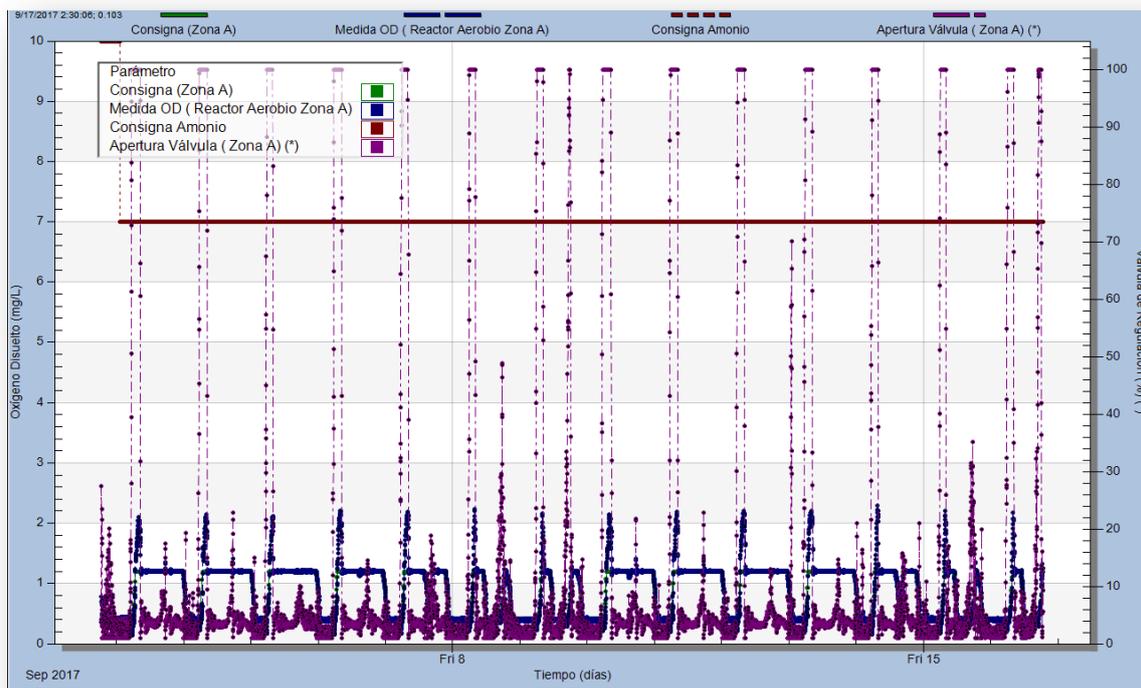


Figura 63: Gráfico de control de oxígeno en el reactor Aerobio (Zona A) con control de nutrientes.

En la figura anterior, se puede apreciar la línea azul hace referencia a la medida obtenida, la línea verde hace referencia a la consigna establecida de oxígeno disuelto, la línea roja hace referencia a la consigna establecida de amonio y la línea morada hace referencia a la válvula de regulación. En este caso, se aprecia que en situaciones puntuales se necesita cerrar la válvula de regulación para dejar de aportar oxígeno al sistema de aireación, es decir, que la válvula de regulación prácticamente en todo momento está aportando oxígeno. Sin embargo en este caso, al establecer un control de nutrientes no se aprecia una elevada mejoría en comparación sin el control de nutrientes, ya que en ambas situaciones la medida de oxígeno se ajusta bastante bien a la consigna o rango de consigna establecido. En este caso el valor de consigna se establece en un rango de 0,4 mg/L y 1,20 mg/L, es por esta razón que cuando la medida está por encima del valor establecido la válvula de regulación se cierra, con el fin de no aportar más oxígeno, sin embargo cuando la medida se encuentra por debajo del valor establecido la válvula de regulación se abre, con el fin de aportar el oxígeno necesario. Además se puede observar que en ocasiones, se alcanzan un valor aproximadamente de 2,5 mg/L. Dicha representación es del reactor aerobio, concretamente en la zona A. En este caso no se comenta el comportamiento del amonio, ya que el control de nutrientes se establece en la zona final del reactor aerobio. Se comentará más adelante.

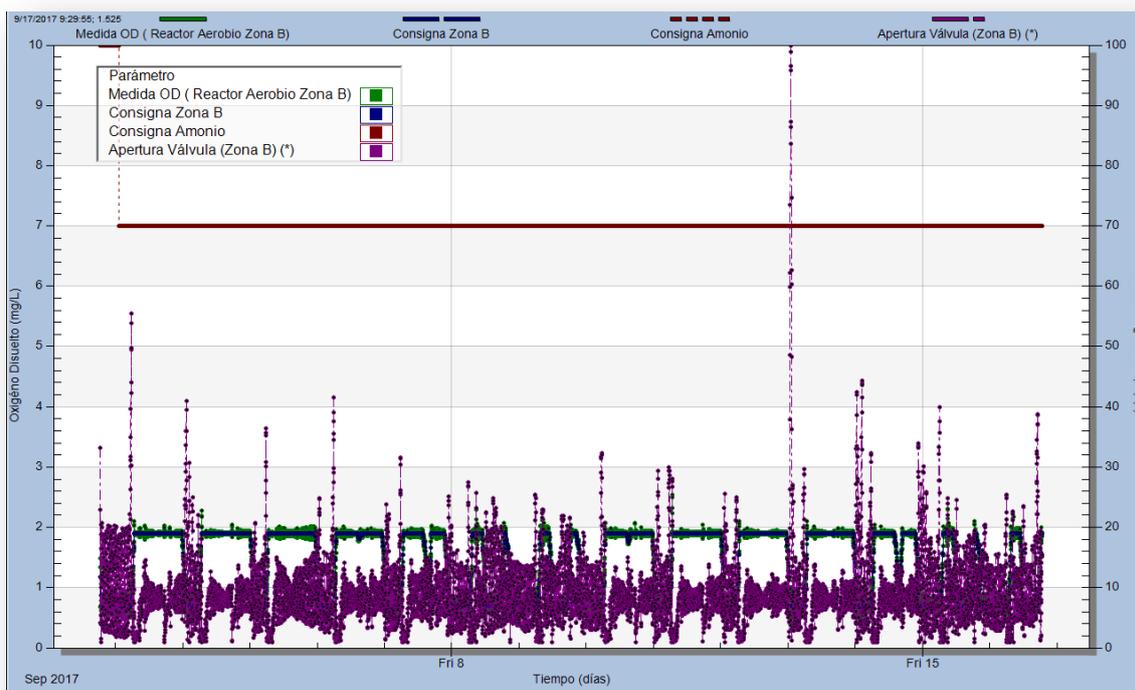


Figura 64: Gráfico de control de oxígeno en el reactor Aerobio (Zona B) con control de nutrientes.

En este caso, como se puede apreciar en la figura anterior la línea de color verde hace referencia a la medida obtenida, la línea de color azul hace referencia a la consigna establecida de oxígeno disuelto, la línea de color rojo hace referencia a la consigna establecida de amonio y la línea de color morado hace referencia a la válvula de regulación. En este caso, se aprecia que prácticamente en todo momento la válvula está abierta, es decir, que se necesita un aporte continuo de oxígeno en el sistema, en casos puntuales dicho aporte no es necesario y la válvula permanece cerrada. El rango de consigna que se establece para esta situación es de 0,7 mg/L y 1,90 mg/L. Se puede apreciar que la medida de oxígeno se ajusta bastante bien al

rango de consigna establecido, de hecho, en este caso la medida oscila en todo momento entre 1,90 mg/L y 2 mg/L, por esta razón en momentos puntuales se aporta oxígeno al sistema. Dicha representación es del reactor aerobio, concretamente en la zona B. En este caso no se comenta el comportamiento del amonio, ya que el control de nutrientes se establece en la zona final del reactor aerobio. Se comentará mas adelante.

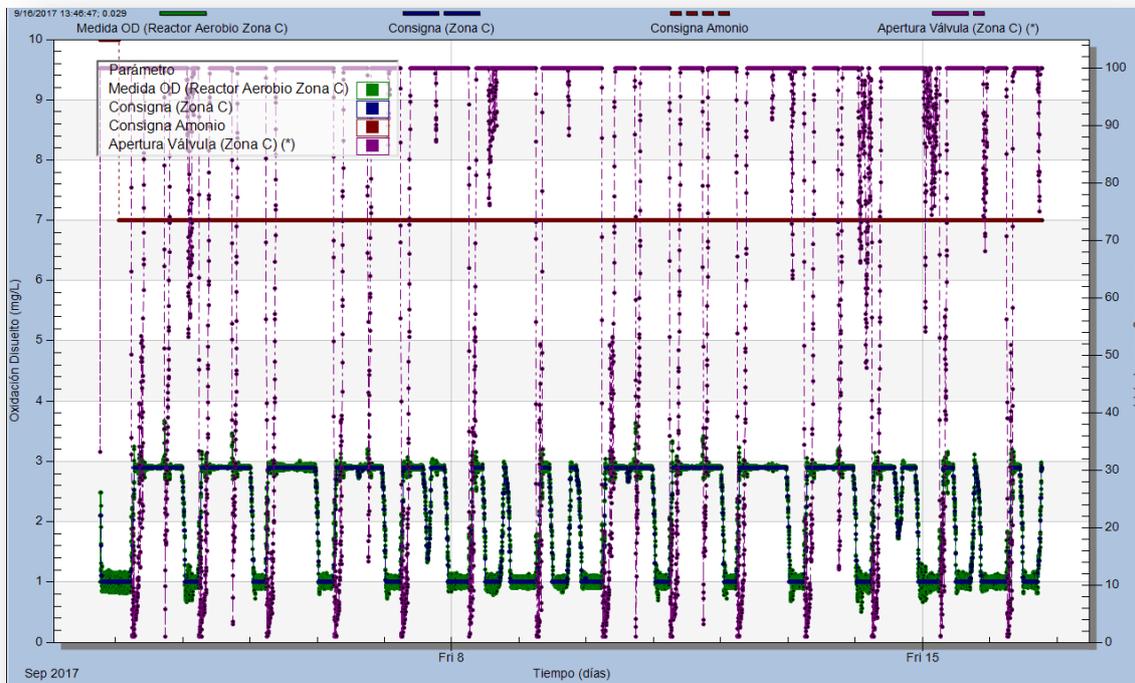


Figura 65: Gráfico de control de oxígeno en el reactor Aerobio (Zona C) con control de nutrientes.

En la figura anterior, la línea verde hace referencia a la medida obtenida, la línea azul hace referencia a la consigna establecida de oxígeno disuelto, la línea de color rojo hace referencia a la consigna establecida de amonio y la línea morada hace referencia a la válvula de regulación. En este caso se aprecia que la medida se ajusta al rango de consigna establecido de 1 mg/L y 2,90 mg/L, si embargo la válvula de regulación está condicionada por la VR100, es decir, una vez ha parado la válvula de regulación vuelve a arrancar la VR100, ya que el sistema necesita un mayor aporte de oxígeno. Cabe destacar, que en esta situación el establecer un control de nutrientes, para esta zona no ha favorecido mucho, ya que la necesidad de oxígeno en esta zona es mayor que en las zonas anteriores y se tiene la necesidad del funcionamiento de la VR100, con el fin de tener en todo momento controlada la medida de oxígeno y que el sistema funciones de una forma adecuada. Dicha representación es del reactor aerobio, concretamente en la zona C. En este caso no se comenta el comportamiento del amonio, ya que el control de nutrientes se establece en la zona final del reactor aerobio. Se comentará mas adelante.

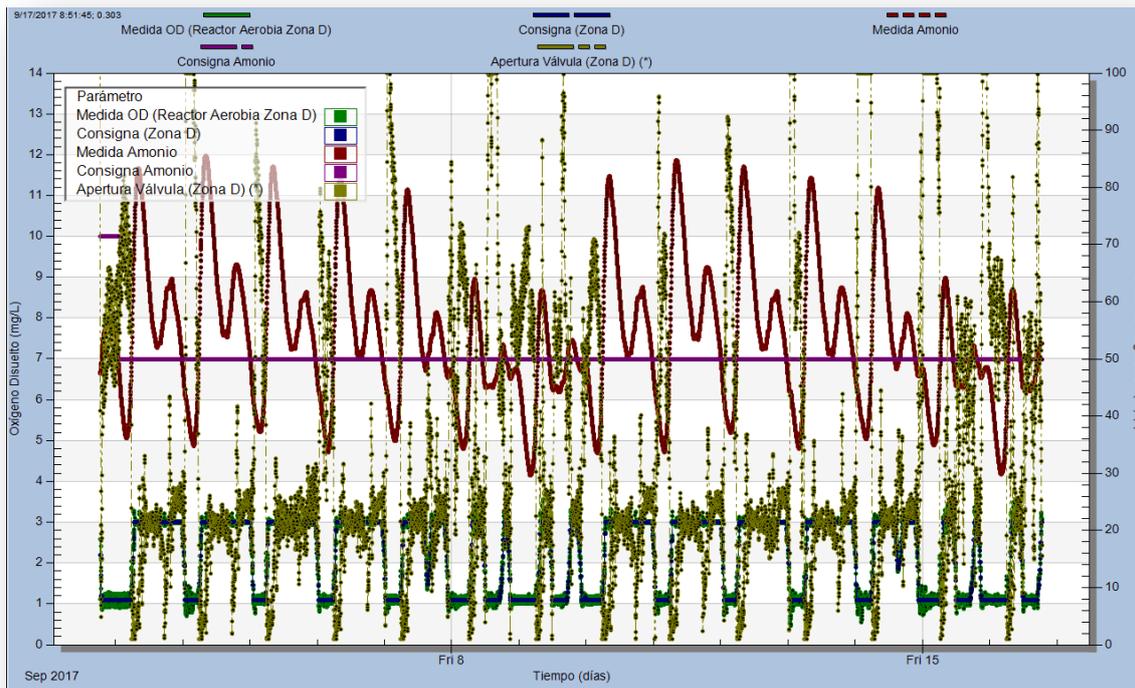


Figura 66: Gráfico de control de oxígeno en el reactor Aerobio (Zona D) con control de nutrientes.

En la figura anterior se aprecia una representación de zona D del reactor aerobio, dicha zona es la más importante, ya que ella se ha establecido la sonda de amonio que se encarga de controlar la concentración de amonio del sistema. Además se ha estudiado como influye dicho control de amonio en la concentración de oxígeno disuelto. La línea verde hace mención a la medida de oxígeno disuelto en el sistema, la línea morada hace mención a la medida de amonio en el sistema, la línea azul hace mención a la consigna establecida para el oxígeno disuelto, la línea roja hace mención a la consigna establecida para el amonio y la línea amarilla hace mención a la válvula de regulación. Como se puede observar el amonio oscila entre 12 mg/L y 5 mg/L, no es un rango muy aceptable ya que lo más conveniente sería que la media de amonio se ajustara a la consigna establecida, pero en este caso no se ha conseguido un mejor ajuste. Además la medida de oxígeno disuelto en el sistema se ve influenciada por dicho control de nutrientes, es decir, el controlador hace que la cantidad de oxígeno en el sistema se ajuste de una forma más proporcionada en el sistema, para esta zona el rango de consigna establecido es de 1,0 mg/L y 3 mg/L, esto hace que prácticamente la válvula de regulación esté abierta, exceptuando en ocasiones puntuales donde existe una cantidad de oxígeno elevada y la válvula de regulación se cierra. Como se puede observar la medida de oxígeno disuelto se ajusta bastante bien al rango de consigna establecido, permitiendo así un funcionamiento del sistema idóneo. En cuanto a la representación del amonio, se detecta que los picos elevados coinciden con los días laborales de la semana y los picos menos acusados son coincidentes con los fines de semana, ya que durante esos días el aporte de nutrientes en las aguas residuales es menor.

Tabla 14: Consignas establecidas frente a rango de consignas para el control de nutrientes.

ZONAS		CONSIGNA ESTABLECIDA (mg/L)	RANGO DE CONSGINA (mg/L)	
			Min.	Max.
Anox/Aero		0.4	0.1	1
Reactor Aerobio	Zona A	0.8	0.4	1.2
	Zona B	1.4	0.7	1.90
	Zona C	2.5	1	2.90
	Zona D	2.6	1.10	3

El rango de consignas que se muestra en la tabla anterior, se ha establecido en función a diferentes iteraciones, es por esta razón que con este rango el control de amonio era más adecuado.

Finalmente comentar que la evolución de los 14 días de simulación se puede apreciar como los valores oscilante entre 12mg/L y 5 mg/L de concentración de amonio aproximadamente, además dichas oscilaciones son coincidentes con los días laborales de la semana, es decir, que de lunes a viernes los valores son mas acusados mientras que los días coincidentes con el fin de semana la concentración de amonio oscila entre 8 mg/L y 4 mg/L aproximadamente. Anteriormente se ha comentado que el control de nutrientes, en este caso el amonio no se ha conseguido completamente, pero se ha intentado ajustar de la mejor forma posible.

➤ **FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE CONTROL DE LA PRESIÓN PARA EL CONTROL DE NUTRIENTES**

Las figuras que se muestran a continuación hacen referencia al funcionamiento del sistema de control de nutrientes en cada una de las zonas estudiadas, es decir, en la zona anóx/Aero y zona aerobia.

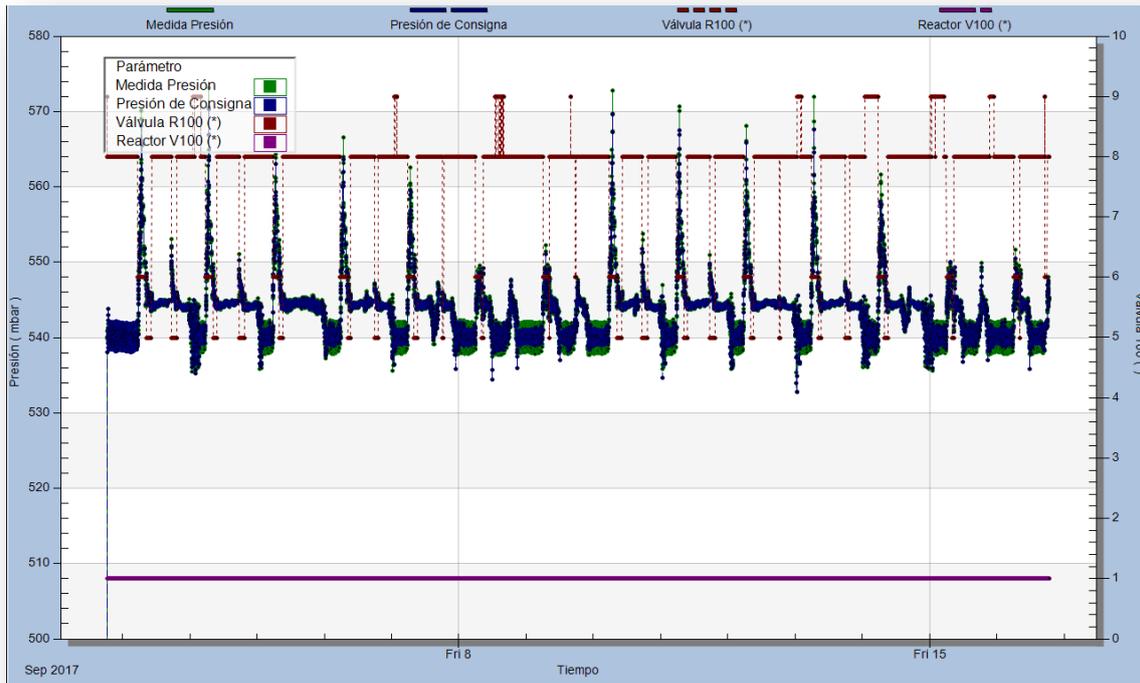


Figura 67: Gráfico que informa sobre el funcionamiento del sistema de control de la presión en lo que respecta a las válvulas que entran en funcionamiento durante la simulación con control de nutrientes.

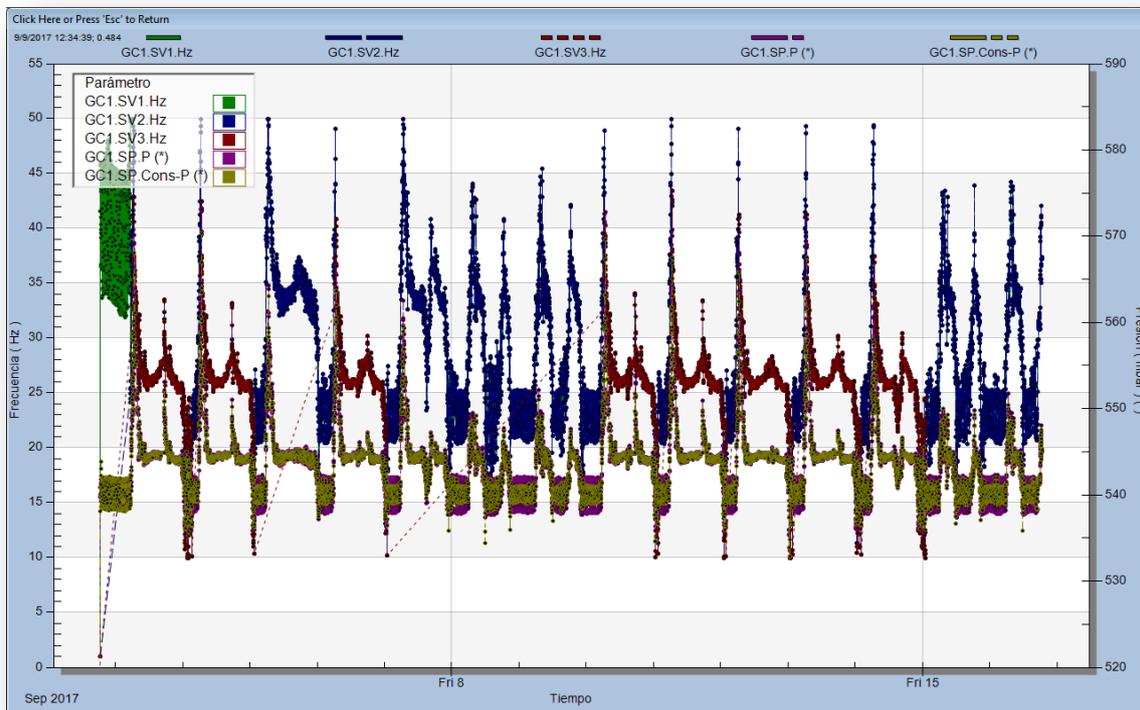


Figura 68: Gráfico sobre el funcionamiento del sistema de control de la presión junto con el valor de presión de consigna con control de nutrientes.

El controlador de la presión modifica la velocidad de giro de las soplantes en función de la presión de descarga. El objetivo es principalmente evitar tanto el déficit como el exceso de oxígeno en periodos de alta o baja carga. En la figura 69 se observa el funcionamiento del sistema de control de la presión, que modifica la marcha / paro de las soplantes y su respectiva frecuencia para alcanzar la presión de consigna demandada por el control.

Como se puede observar en la figura 69, el sistema de control de la presión no mantiene las tres soplantes en marcha durante los 14 días de simulación, es decir, durante el primer día la única soplante que funciona es la número 1 (línea verde), mientras que conforme va avanzando la simulación entran en funcionamiento tanto la número 2 (línea azul) como la número 3 (línea roja). Sin embargo la soplante número 3 (línea roja) se va alternando en funcionamiento con la número 2, es decir, que cuando existe la necesidad de una soplante más, la tercera soplante se ponen en funcionamiento, mientras tanto el sistema trabaja con la utilización de las dos soplantes anteriores. Esto es debido a que se reparte de forma equitativa el funcionamiento entre los equipos para que no se den situaciones de sobreesfuerzo de unos equipos más que de otros.

Los valores de presión del sistema de aireación oscilan entre un valor de 570 mbar y 545 mbar, árticamente los 14 días de simulación. En la gráfica se aprecia que el valor de consigna es coincidente con la medida de presión obtenida, referente a la línea azul. Sin embargo, el valor de la válvula de regulación referente a la línea roja, demuestra que todos los valores obtenidos están por debajo de dicha válvula, es por ello que en todo momento intenta permanecer cerrada, figura 68.

En la figura 68 muestra la zona con mayor déficit de oxígeno y por tanto la que mantiene la válvula abierta al 100% y es por esta razón que la válvula manda el valor referente a la presión de consigna. Además, como se puede apreciar el movimiento de presión de consigna reflejado en la gráfica viene condicionado por la concentración de oxígeno en dicha zona y su desfase con respecto a la consigna establecida.

IV.3.3. RESULTADOS DEL FUNCIONAMIENTO

En este apartado se hará referencia principalmente al consumo energético del sistema y la concentración de nitrógeno total en el sistema. Se hará una comparativa con diferentes situaciones y se comentará la diferencia obtenida entre ellas.

En primer lugar se hablará de consumo energético, para ello se han tenido en cuenta las siguientes simulaciones: simulación sin control de oxígeno, simulación con control de oxígeno y simulación con control de amonio. A continuación se muestra una tabla que recoge los valores de dichas simulaciones:

Tabla 15: Consumo energético promedio por día de varias simulaciones.

DÍAS	SIMULACIÓN SIN CONTROL OXÍGENO	SIMULACIÓN CON CONTROL OXÍGENO	SIMULACIÓN CON CONTROL AMONIO
	CONSUMO ENERGÉTICO (kWh/m ³)	CONSUMO ENERGÉTICO (kWh/m ³)	CONSUMO ENERGÉTICO (kWh/m ³)
1	0.141	0.108	0.099
2	0.139	0.105	0.100
3	0.135	0.107	0.100
4	0.134	0.107	0.099
5	0.129	0.109	0.096
6	0.131	0.110	0.106
7	0.134	0.114	0.109
8	0.127	0.108	0.090
9	0.128	0.107	0.090
10	0.125	0.099	0.100
11	0.129	0.105	0.094
12	0.131	0.104	0.095
13	0.134	0.113	0.101
14	0.135	0.109	0.101

En la tabla 14 se muestra el consumo energético en los escenarios de simulación descritos anteriormente. Como se puede apreciar el consumo energético sin control de oxígeno es mucho mayor que cuando se aplica cualquier tipo de controlador. A continuación se muestran unos gráficos para ver su comparación:

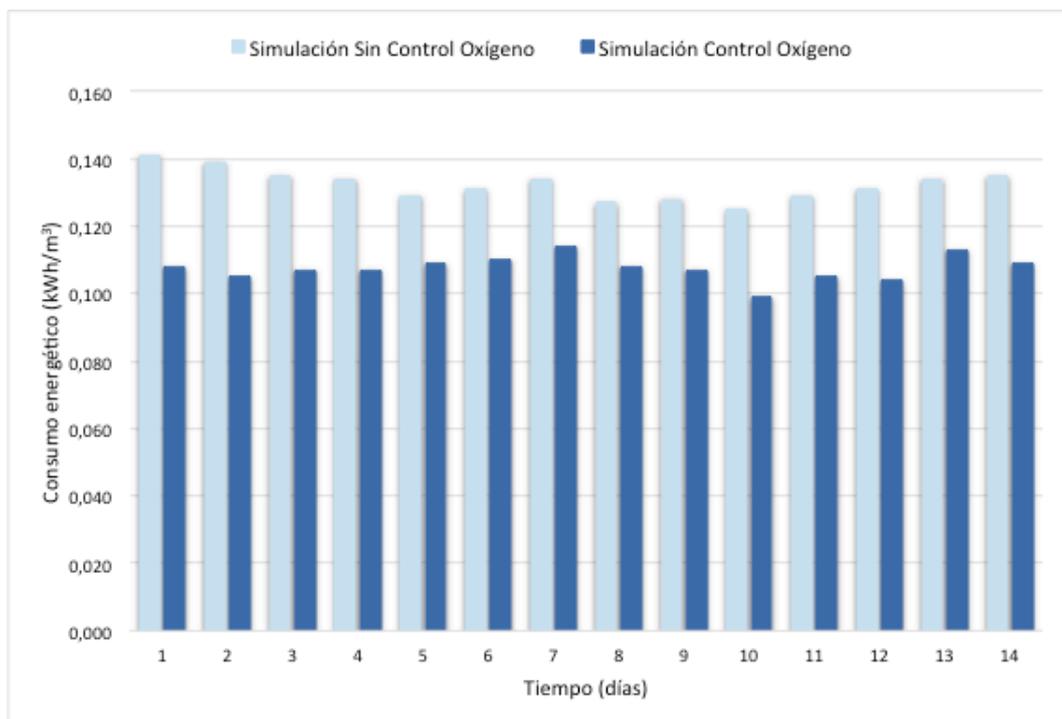


Gráfico 8: Consumo energético comparando el sistema sin control de oxígeno y el sistema de control oxígeno.

En el gráfico 10 se aprecia como el consumo energético de la simulación sin control de oxígeno es mayor que la simulación con control de oxígeno. El valor de consumo máximo para la simulación sin control de oxígeno es de 0,140 kW/m³ (línea azul claro), sin embargo el valor de consumo máximo para la simulación con control de oxígeno es de 0,114 kW/m³ (línea azul oscuro), lo que supone un ahorro energético de 19% aproximadamente, de lo que se puede deducir que al implantar un sistema de control el consumo energético va a mejorar.

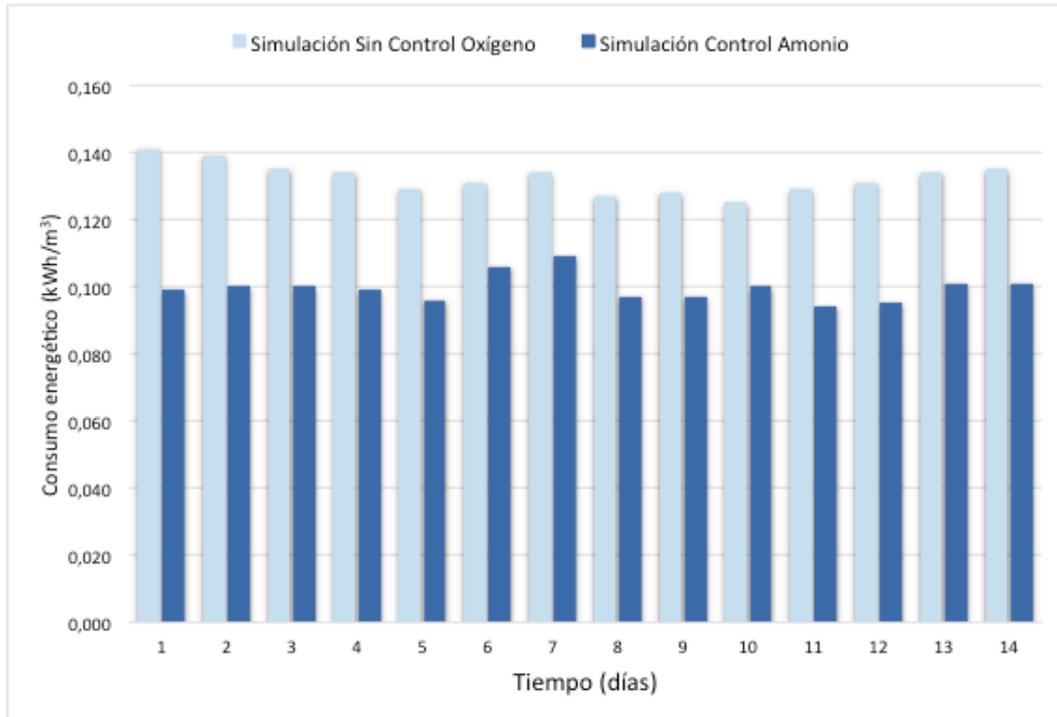


Gráfico 9: Consumo energético comparando el sistema sin control de oxígeno y el sistema de control amonio.

De igual forma sucede con el gráfico 11, el consumo energético de la simulación sin control de oxígeno es mayor que la simulación con control de amonio. El valor de consumo máximo para la simulación sin control de oxígeno es de 0,140 kW/m³ (línea azul claro), sin embargo el valor de consumo máximo para la simulación de control de amonio es de 0,109 kW/m³ (línea azul oscuro), lo que supone un ahorro energético de 22% aproximadamente. Es por esta razón que al implantar un sistema de control de nutrientes, el efecto sobre el consumo energético es mucho mayor que con un control de oxígeno.

Finalmente se muestra el gráfico 12 en el que se comparan ambos sistemas de aireación con el fin de estudiar cual es más eficaz, en cuanto al consumo energético se refiere.

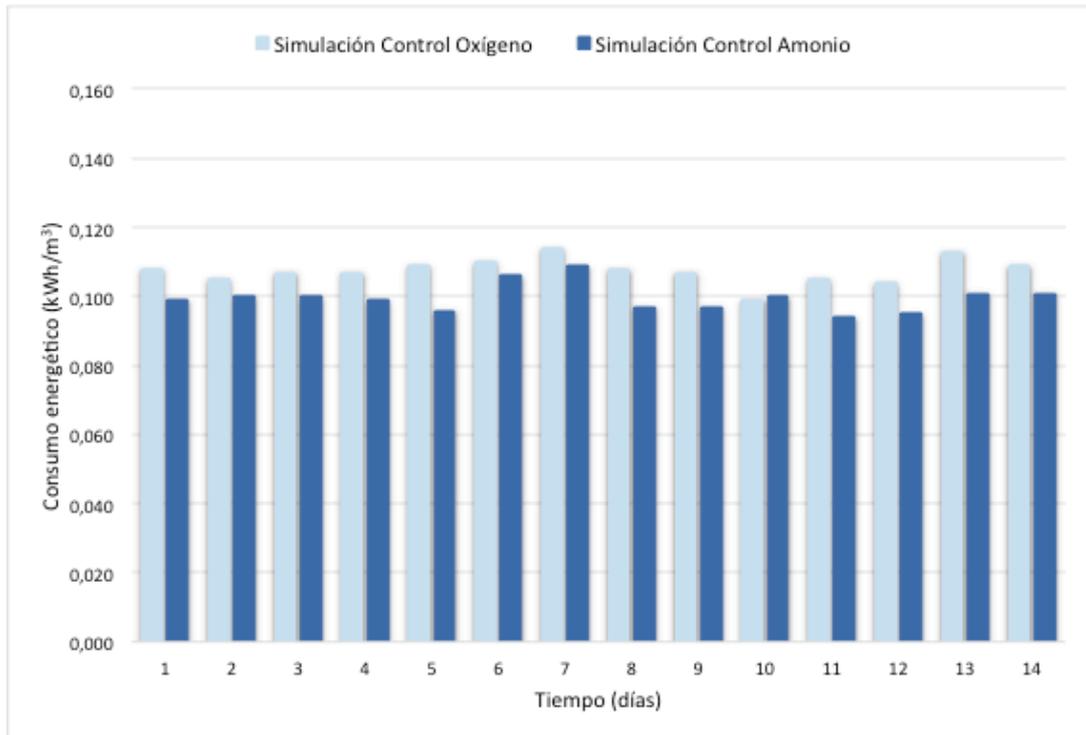


Gráfico 10: Consumo energético comparando el sistema del control de oxígeno y el sistema de control amonio.

En este caso la comparación entre ambos sistemas de control no es tan acusado, pero existe una leve diferencia entre ambos. El valor de consumo máximo para la simulación del control de oxígeno es de 0,114 kW/m³ (línea de color azul claro), mientras que el valor de consumo máximo para la simulación de control de amonio es de 0,109 kW/m³ (línea de color oscuro), lo que supone un ahorro energético de 5% aproximadamente. Por lo tanto, el mejor sistema de control en cuanto ahorro energético sería el sistema de control de amonio.

Tabla 16: Concentración de nitrógeno total promedio por día de varias simulaciones.

DÍAS	SIMULACIÓN SIN CONTROL OXÍGENO	SIMULACIÓN CON CONTROL OXÍGENO	SIMULACIÓN CON CONTROL AMONIO
	NITRÓGENO TOTAL (mg/L)	NITROGENO TOTAL (mg/L)	NITROGENO TOTAL (mg/L)
1	14.7	14.0	13.7
2	15.2	14.6	14.0
3	13.9	13.2	12.8
4	15.2	14.5	14.0
5	14.0	13.6	13.0
6	12.0	11.4	10.9
7	11.7	11.0	10.7
8	14.8	14.2	13.7
9	14.7	13.7	13.0
10	15.3	14.4	14.0
11	15.0	14.5	14.0
12	14.7	14.0	13.8
13	12.8	12.1	11.6
14	11.0	10.7	10.2

En segundo lugar, al igual que se ha estudiado el consumo energético de las simulaciones se va a estudiar la concentración de nitrógeno en cada una de las simulaciones y se procede a compararlas. A continuación se muestra una tabla que recoge los valores de dichas simulaciones:

En la tabla 15 se muestra la concentración de nitrógeno en los escenarios de simulación descritos anteriormente. Como se puede apreciar la concentración de nitrógeno en el sistema sin control de oxígeno es mucho mayor que cuando se aplica cualquier tipo de controlador. A continuación se muestran unos gráficos para ver su comparación:

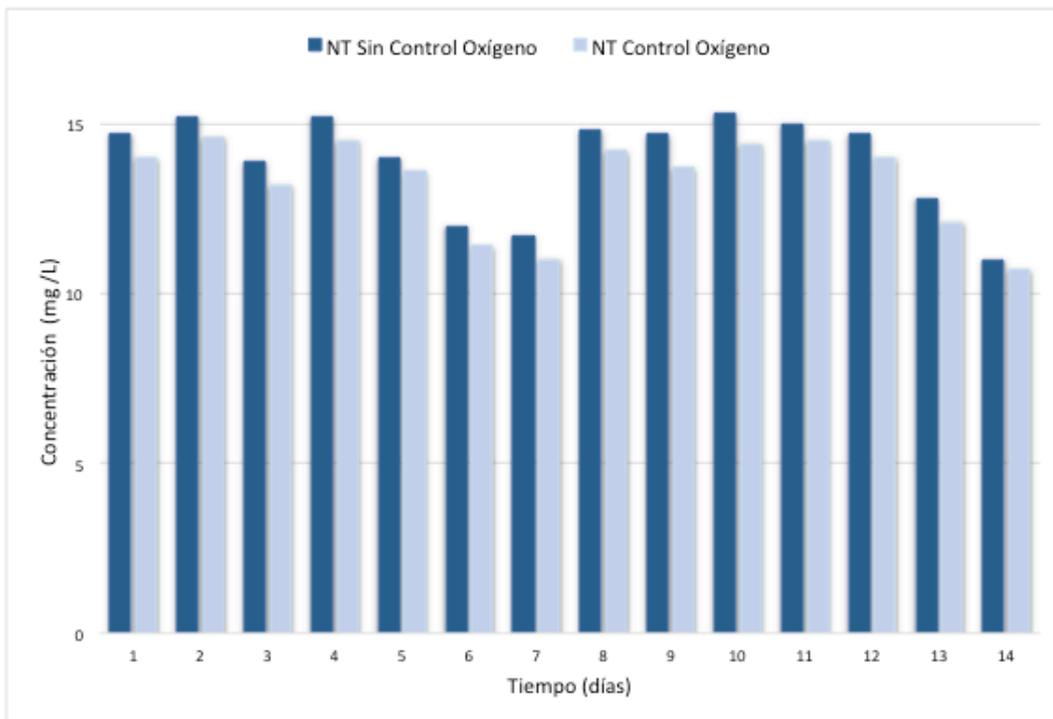


Gráfico 11: Concentración de nitrógeno total en el efluente comparando el sistema sin control oxígeno y el sistema de control de oxígeno.

En el gráfico 13 se observa como la concentración de nitrógeno total de la simulación del sistema sin control de oxígeno es mayor que la simulación del sistema con control de oxígeno. El valor de concentración máxima para la simulación sin control de oxígeno es de 15,3 mg/L (línea azul oscuro), sin embargo el valor de concentración máxima para la simulación con control de oxígeno es de 14,6 mg/L (línea azul claro), lo que supone que en el sistema de control de oxígeno se produce una eliminación de nitrógeno mayor que en el sistema sin control de oxígeno. Es por esta razón, que implantar un sistema de control siempre va a ser mas beneficioso a la hora de eliminar nutrientes y materia orgánica.

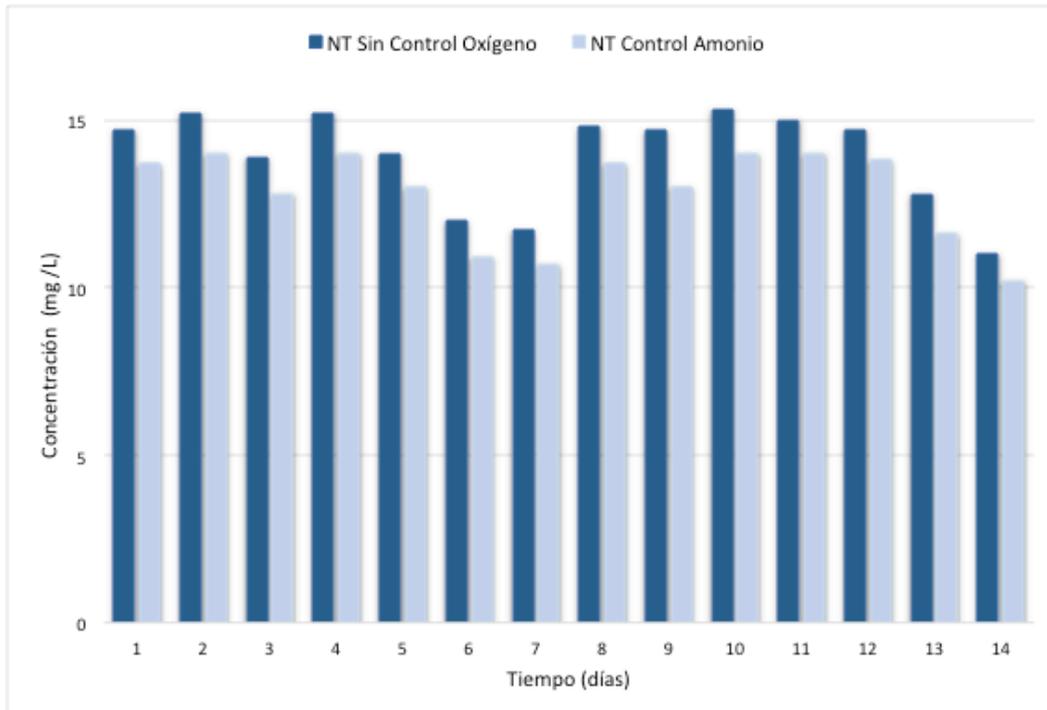


Gráfico 12: Concentración de nitrógeno total en el efluente comparando el sistema sin control oxígeno y el sistema de control de amonio.

De igual forma sucede con el gráfico 14, la concentración de nitrógeno de la simulación sin control de oxígeno es mayor que la simulación con control de amonio. El valor de la concentración de nitrógeno máximo para la simulación sin control de oxígeno es de 15,3 mg/L (línea azul oscuro), sin embargo el valor de concentración de nitrógeno máximo para la simulación de control de amonio es de 14mg/L (línea azul claro), lo que supone que en el sistema de control de amonio se produce una eliminación de nitrógeno mayor que en el sistema sin control de amonio. Es por esta razón, que la implantación de un sistema de control de amonio va a ser más beneficioso incluso que el sistema de control de oxígeno a la hora de reducir la concentración de nitrógeno total.

Finalmente se muestra el gráfico 15 en el que se comparan ambos sistemas de aireación con el fin de estudiar cual es más eficaz, en relación a la reducción de la concentración de nitrógeno:

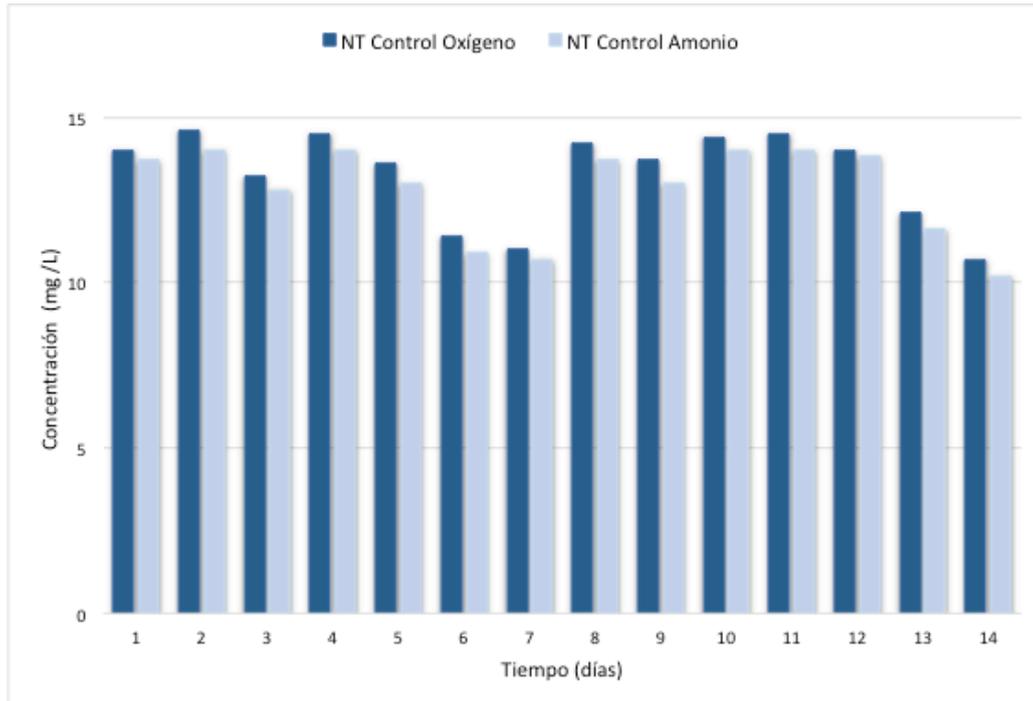


Gráfico 13: Concentración de nitrógeno total en el efluente comparando el sistema de control oxígeno y el sistema de control de amonio.

Como se parecía en el gráfico anterior, se muestra la diferencia de concentración de nitrógeno total en relación a ambos sistemas de control, es decir, el sistema de control de oxígeno y el sistema de control de amonio. Se detecta que entre ambos hay una leve diferencia, y el sistema de control de amonio muestra una mejora frente al sistema de control de oxígeno. En este caso el valor de concentración de nitrógeno máximo para el sistema de control de oxígeno es de 14,6 mg/L y el valor de concentración de nitrógeno máximo para el sistema de control de amonio es de 14 mg/L. En este caso se podría asumir que el sistema de control de amonio es más beneficioso, ya que la reducción de nitrógeno es un poco mayor.

V. CONCLUSIONES

V. CONCLUSIONES

Las conclusiones más relevantes que se pueden extraer del presente trabajo fin de máster son las siguientes:

Los resultados de simulación obtenidos mediante el modelo BNRM2 en estado estacionario se han ajustado adecuadamente a los resultados proporcionados para el caso de estudio.

Los resultados de la simulación obtenidos mediante el modelo BNRM2 en estado dinámico se han ajustado adecuadamente a los resultados proporcionados para el caso de estudio, además se ha podido observar la evolución de los parámetros a lo largo del sistema.

El valor experimental de tiempo de retención celular ha debido ser reajustado con el fin de conseguir una mejor representación de la EDAR evaluada en DESASS. En este caso, con la reducción del tiempo de retención celular ha sido posible ajustar las características del efluente.

DESASS ha permitido la correcta implementación del sistema de control evaluado mediante el software de Control LoDif BioControl, conectando ambas plataformas a través de conexión OPC.

El controlador de aireación implementado ha proporcionado resultados de operación satisfactorios, es decir, ha permitido controlar las consignas de OD en torno a las consignas establecidas y además se han cumplido los límites de vertido establecidos por la legislación vigente.

El controlador de nutrientes implementado, en este caso para el amonio, a proporcionado resultados de operación satisfactorios, es decir, en valores promedio la concentración de amonio se ha mantenido en torno a la consigna establecida, aunque dicha variable ha mostrado oscilaciones en el tiempo.

El controlador de aireación ha permitido reducir el consumo energético de la EDAR desde 0,141 hasta 0,114 kW/m³, correspondiente a un ahorro energético del 19%.

El controlador de aireación ha mejorado el grado de eliminación de nitrógeno, reduciendo la concentración de nitrógeno de 15,2 mg/L aproximadamente a 14,6 mg/L. Por lo cual se puede deducir que la eliminar de nitrógeno se ha visto favorecida al implantar dicho sistema de control.

El controlador de nutrientes ha permitido reducir el consumo energético de la EDAR desde 0,141 hasta 0,109kWh/m³, correspondiente a un ahorro energético del 22%.

El controlador de nutrientes ha mejorado el grado de eliminación de nitrógeno, reduciendo la concentración de nitrógeno de 15,2 mg/L aproximadamente a 14,0 mg/L. Por lo cual se puede deducir que la eliminar de nitrógeno se ha visto favorecida al implantar dicho sistema de control.

VI. BIBLIOGRAFÍA

VI. BIBLIOGRAFIA

- **A**lex, J., Benedetti, L., Copp, J., Gernaey, K., Jeppsson, U., Nopens, I., Pons, M.N., Rieger, L., Rosen, C., Steyer, J., Vanrolleghem, P., and Winkler, S. (2008). "Benchmark simulation model no. 1 (BSM1)". Technical report, Industrial Electrical Engineering and Automation, Lund University.
- Alleman J. E., Prakasam T. B. S. (1983) Reflections on seven decades of activated sludge history. *J. Water Pollut. Control Fed* 55 (5), 436-443.
- Arvin E. (1983). "Observations supporting phosphate removal by biologically mediated chemical precipitation". *Water Science and Technology*. vol.15, pp. 43-63.
- **B**arker P. S. and Dold P. L. (1997). "General model for biological nutrient removal activated-sludge systems: Model presentation". *Water Environmental Research*. 69(5), 969–984.
- **D**IRECTIVA 91/271/CEE sobre tratamiento de las aguas residuales urbanas.
- **E**urope. Council Directive 91/271/ECC concerning urban waste water treatment. 21 May 1991.
- **F**itzgerald, K.S. (2008). "Membrane Bioreactors". Gainesville: TSG Technologies, Inc.
- **G**arcía y Fernández- Polanco et al., (1996) Denitrification with biosorbed organic matter in a SBR system, First IAWQ Specialized Conference on Sequencing Batch Reactor Techno.
- Gee, C. S., and Kim, J. S. (2004). "Nitrite accumulation followed by denitrification using sequencing batch reactor". *Water Science and Technology*. 49(5-6), 47-55.
- Gujer W., Henze M., Mino T. and van Loosdrecht M. C. M. (1999). "Activated Sludge model No. 3". *Water Science and Technology*. 39(1), 183–193.
- Gujer, W. (2006). "Activated sludge modelling: past, present and future". *Wat. Sci. Tech.*, 53(3), 111–119.
- **H**enze, M., Gujer, W., Mino, T., van Loosdrecht, M. (2002). "Activated sludge models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3 IWA Task Group on Mathematical Modelling for Design and Operation of Biological Wastewater Treatment". London, IWA Publishing.
- Henze M., Grady C. P. L., Jr., Gujer W., Marais G. v. R. and Matsuo T. (1987). "Activated Sludge Model No. 1". IAWPRC Scientific and Technical Report No. 1, IAWPRC, London, UK.

- Henze, M., Gujer, W., Mino, T., Matsuo, T., Wentzel, M.C. and Marais, G.v.R. (1995). "Activated Sludge Model No. 2". IAWQ Scientific and Technical Report No. 3. London: IAWQ.
- Henze M., Gujer W., Mino T., Matsuo T., Wentzel M.C., Marais G. v. R. and van Loosdrecht.
- Henze et al. (1987) Activated Sludge Model No.1. IAWPRC Scientific and Technical Report No.1. IAWPRC, London. ISSN 1010-707X.
- H. Hauduc, L. Rieger, I. Takács, A. Héduit, P. A. Vanrolleghem and S. Gillot (2010) A systematic approach for model verification: application on seven published activated sludge models. *Water Sci. Technol.* 61 (4), 825-839.
- Hruschka H. (1980). "Waste treatment by precipitation with lime - a cost and efficiency analysis". *Program Water Technol.* vol.12, (5), pp. 383-393.
- Irvine et al., (1989) The loss of submerged plants with eutrophication I. Experimental design, water chemistry, aquatic plant and phytoplankton biomass in experiments carried out in ponds in the Norfolk Broadland. *Freshwater Biol* 22 (1): 71-87.
- J. Ferrer, A. Seco, J. Serralta, J. Ribes, J. Manga, E. Asensi, J.J. Morenilla, F. Llavador (2008) DESSAS: A software tool for designing, simulating and optimising WWTPs. *Environmental Modelling & Software*. 23(1), 19–26
- J. Ribes, J. Serralta, A. Seco, J. Ferrer, R. Lloret, I. Bernácer, J.J. Morenilla (2007) Implementation of a supervisory fuzzy logic based control system in the Denia WWTP. In *Proceedings of the 10th IWA Specialised Conference on Design, Operation and Economics of Large Wastewater treatment Plants, Viena (Austria)*.
- Johansson P. (1994). "SIPHOR a kinetic model for simulation of biological phosphate removal". Doctor thesis published in the Department of Water and Environmental Engineering.
- Jones, M. and Stephenson, T. (1996). "The effect of temperature on enhanced biological phosphate removal". *Environmental Technology*. 17, 965-976.
- Lotfy A. Zadeh (1965). Fuzzy sets.
- M.V. Ruano, A. Robles, T. Gómez-Gil, E. Olivas, P. Hermosilla, J.A. Basiero, J. Serralta, J. Ribes, A. Seco, J. Ferrer (2014) LoDif BioControl: Plataforma para facilitar la implementación de algoritmos de control y optimización de procesos en las EDAR. *Futureenviro*. Junio 2014, 59 – 62.

- M.V. Ruano, J. Ribes, A. Seco, J. Ferrer (2011) DSC: software tool for simulation based design of control strategies applied to WWTPs. *Wat. Sci. Tech.* 63(4), 796–803.
- M.V. Ruano, J. Ribes, E. Olivas, M. García, J.A. Basiero, A. Seco, J. Ferrer (2014). Validación de un sistema de control del nitrógeno basado en sondas de bajo coste en la EDAR de Almassora. XI Reunión de la Mesa Española de Tratamiento de Aguas (META 2014). Alicante (España).
- M.V. Ruano, J. Ribes, J. Serralta, A. Seco, J. Ferrer (2011) Assessment of DO set points of the Denia WWTP aeration control system for achieving nitrogen removal under the minimum energy consumption. In *Proceedings of 8th IWA Symposium on Systems Analysis and Integrated Assessment*, Bilbao (España).
- M.V. Ruano, J. Serralta, J. Ribes, A. Seco, J. Ferrer (2013) Combination of cascade fuzzy controllers with a supervisory expert system for controlling aeration in WWTPs. Application to several WWTPs. 11th IWA conference on instrumentation control and automation. *Proceedings book*. Narbonne (Francia).
- Manual LODIFBIOCONTROL 1.0.
- Martorell, J. (2016) Trabajo Final de Máster. Estudio técnico – económico de diferentes estrategias de control para la optimización de la eliminación biológica de nutrientes en EDAR. Aplicación a reactores de flujo en pistón.
- Meijer S. C. F. (2004). "Theoretical and Practical Aspects of Modelling Activated Sludge Processes". PhD Thesis. Delft University of Technology, The Netherlands.
- Metcalf and Eddy (1997). "Tratamiento y depuración de las aguas residuales". Editorial Labor S.A. Spain.
- Ministerio de Industria turismo y comercio and Instituto para la diversificación y ahorro de la energía (IDEA) (2010). "Consumo energético en el sector del agua".
- R. Barat et al., (2012) Biological Nutrient Removal Model No 2 (BNRM2): A general model for Wastewater Treatment Plants. In *Proceedings of 3rd IWA/WEF Wastewater Treatment Modelling Seminar*, Quebec (Canada), WWTmod 2012.
- R. Barat; J. Serralta; M.V. Ruano; E. Jiménez; J. Ribes; A. Seco; J. Ferrer (2013). "Biological Nutrient Removal Model No. 2 (BNRM2): a general model for wastewater treatment plants". *Water Science and Technology*, 67 (7), 1481-1489 ISSN: 0273-1223.
- Randall et al., (1992), *Design and retrofit of wastewater treatment plants for biological nutrient removal*, Technomic Publishing Co., Inc., vol. 5.

- Randall, A.A., Benefield, L.D. and Hill, W.E. (1994). "The effect of fermentation products on enhanced biological phosphorus removal, polyphosphate storage and microbial population dynamics". *Water Science and Technology*. 30(6), 213-219.
- Reddy, M. (1998). "Biological and chemical systems for nutrient removal". WEF, special publication.
- Rieger L., Koch G., Kühni M., Gujer W. and Siegrist H. (2001). "The eawag bio-P module for activated sludge model No.3". *Water Research*. 35(16), 3887–3903.
- **Salem, S., Berends, D.H.J.G., van Loosdrecht, M.C.M., Heijnen, J.J.** (2003). "Bio-Augmentation by nitrification with return sludge". *Water Research*. 37(8), 1794–1804.
- **M. C. M.** (1999). "Activated sludge model No. 2d, ASM2d". *Water Science and Technology*. 39(1), 165–182.
- Seco Torrecillas, A., Ferrer Polo, J. (2003). "Tratamientos biológicos de aguas residuales". Valencia: Universitat Politècnica de València.
- Seco et al. (2011). Diseño y simulación de edar mediante el software desass. Editorial Universitat Politècnica de València; Edición: 1
- Seco y J. Ferrer (2007). Tratamientos biológicos de aguas residuales. Editorial Universitat Politècnica de València.
- Seco y J. Ferrer (2011). Tratamientos físicos y químicos de aguas residuales. Editorial Universitat Politècnica de València.
- Seco, J. Ribes, J. Serralta, J. Ferrer (2004) Biological nutrient removal model No.1 (BNRM1). *Wat. Sci. Technol.* 50 (6), 69-78.
- Swinarski, M., Mąkinia, J., Czerwionka, K., Chrzanowska, M., Drewnowski, J. (2012). "Modeling external carbon addition in combined N-P activated sludge systems with an extension of the IWA activated sludge models". *Water Environment Research*, 84(8), 646-655 (10).
- **Teira, M. R.** (1996) Bases microbiológicas. Microorganismos nitrificantes, desnitrificantes y con capacidad para acumular fósforo, 2o Curso de Ingeniería Ambiental: Eliminación biológica de nutrientes en aguas residuales, Lleida, 28 a 30 de octubre de 1996, pp. 1-21.
- **Van Loosdrecht, M.C.M. and Salem, S.** (2006). "Biological treatment of sludge digester liquids". *Water Science and Technology*. 53 (12), 11-20.

- **Werle**, C.P., J.T. Novak, W.R. Knocke, and J.H. Sherrard. 1984. "Mixing intensity and polymer sludge conditioning". Journal Environmental Engineering Division of American Society of Civil Engineers. 110(5):191.
- Technical University of Delft. Lenntech. <<http://www.lenntech.es/>>. [04/2017].
- Aguasresiduales.info. <<http://www.aguasresiduales.info/>>. [04/2016].
- Europe. European Commission. <http://ec.europa.eu/environment/index_en.htm>. [05/2017].
- School of Chemistry in Veracruzana University. Bioingeniería. <<https://sites.google.com/site/bioingenieriauv15/home>>. [05/2017].
- Sustainable sanitation and water management (SSWM). <<http://www.sswm.info/home>>. [05/2016].
iagua. <<http://www.iagua.es>>. [04/2017].