



Universidad de Matanzas "Camilo Cienfuegos"
Facultad de Ingenierías Química y Mecánica
Departamento de Química e Ingeniería Química

Trabajo de Diploma

Implementación en ASCEND IV del modelo ASM 1 para el proceso de lodos activados

Trabajo de diploma presentado como requisito parcial para optar por el título de
Ingeniero Químico.

Autor: Dailys Arias Ramos

Tutor: Ing. Agustín Benítez Hernández, Dr.

Matanzas. julio 2009

“La ciencia no es... ni misterio de iniciados, ni privilegio de los aristócratas de la mente, sino el único medio que tiene el hombre de explicarse las leyes de la vida.”

José Martí

Dedicatoria:

A ellos que fueron, son y serán el baluarte infranqueable de esta revolución y creyeron que el porvenir está en manos de los que luchan por una causa justa.

A la razón de mi vida, la que con infinito amor y cariño confió en mí y me guiado por el camino correcto, mi madre.

A los que me criaron cuando apenas era una semillita y me ayudaron a germinar y convertirme en una flor, mis abuelos.

A los que tuvieron esa paciencia admirable, esa estirpe envidiable de confiar en mí y saber que no los iba a defraudar, mi familia.

A los que me guiaron, me enseñaron y me dijeron que el camino no era largo, que solo los cobardes no prueban el sabor del triunfo, mis profesores.

A ellas que serán el relevo del mañana, la astucia del presente y la perspicacia del futuro, mis amigas y compañeras.

A mí por ser quien soy, por ser como soy, por no rendirme jamás y por tener esa perseverancia y saber que solo los de corazón grande albergan bellas esperanzas.

Agradecimientos:

A la revolución por forjar cubanos y cubanas del estirpe de Maceo y la perseverancia del generalísimo.

A mi gran profesor y tutor, Agustín, que gracias a él unos de mis sueños se hará realidad, porque él fue el eslabón impulsor de esta tarea.

A mi madre Olga L por estar siempre presente cuando más la necesitaba, por ser mi máxima inspiración y saber que sin la fe de ella esto no hubiera sido posible.

A mis abuelos que consagraron parte de su vida para criarme y educarme y lograr mis objetivos en la vida.

A mis tías, Dulia, Mariela, Caridad y Doris que fueron y son el ejemplo digno de seguir y mis tíos que me apoyaron siempre confiando en mi Orlando, Felipe y Carlos.

A mi hermano Darién y mis primos Marisleydys, Raidel y Lázaro ellos fueron y serán un apoyo para mí.

A la que estuvo conmigo en las buenas y las malas, me apoyo y me inculco que siendo bueno era el único modo de ser dichosa, mi gran amiga Caridad.

A Dianett mi compañera y amiga de estudio que cuando mas, la necesitaba me brindaba su apoyo y fraternidad.

A ellas que en un principio no conocía y lograron hacerme pasar esos momentos de alegría que jamás olvidare, las chicas que han convivido conmigo todo un año y se supieron ganar mi cariño y amistad ,las quiero y admiro a todas por ser quienes son :Yoslaine, Yaneysy, Ilismay, Ledys, Yanett, Ana Diana y Jennifer gracias por todo.

A todos lo que de una forma u otra confiaron mí y me apoyaron para la realización de esta tesis, mis compañeros del grupo Q-51 que estuvieron conmigo desde comence la carrera y nos graduaremos juntos.

A todo el claustro de profesores de la carrera de ingeniería química que estuvo siempre conmigo desde que me inicie como universitaria.

NOTA DE ACEPTACIÓN

PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

TRIBUNAL

TRIBUNAL

FECHA

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Yo, Dailys Arias Ramos, me declaro como única autora de este trabajo realizado en la Universidad de Matanzas “Camilo Cienfuegos”, como requisito parcial para optar por el título de Ingeniero Químico y autorizo que el mismo sea utilizado por la misma.

Resumen:

La potencia de las computadoras permiten hoy en día realizar cálculos de gran envergadura y complejidad impensables en décadas atrás. La industria química aprovecha desde hace décadas las ventajas que ofrece el modelado matemático y las herramientas de simulación. El presente trabajo de diploma se realiza en la Planta de Lodos Activados del complejo turístico Sol Palmera, ubicada en Varadero, la cual vierte parte de su efluente hacia la Bahía de Cárdenas. El objetivo del trabajo está dirigido a la simulación del proceso de lodos activados a partir del modelo ASM 1 utilizando para ello el software ASCEND IV. Para la realización del mismo fue imprescindible realizar una breve descripción de las aguas residuales urbanas. Se realiza la comparación de la corriente de salida del sistema de tratamiento con los parámetros establecidos para el vertimiento establecido por la planta. También se realiza un análisis para conocer la adecuabilidad del modelo. La aplicación de la valoración económica permite reducir los gastos de la planta por concepto de ahorro de energía eléctrica.

Abstract:

Computing power now makes it possible to perform calculations for large and complex unthinkable decades ago. The chemical industry for decades exploited the advantages of mathematical modeling and simulation tools. This thesis takes place in activated sludge plant of the Sol Palmera resort, located in Varadero, which poured from their effluent into the Bahía de Cárdenas. The aim of this work is aimed at simulating the process of activated sludge from ASM 1 model using the software ASCEND IV. For the realization of this project was essential to make a brief description of urban wastewater. Is performed comparing the current output of the processing system with the parameters set for the discharge by the plant. It also performs analysis to determine the suitability of the model. The application of economic valuation can reduce the cost of the plant for saving electricity.

	Pág.
Introducción	1
Capitulo I Análisis Bibliográfico	3
1.1 Simulación de procesos	3
1.1.1 Características de la simulación de procesos	3
1.1.2 Ventajas y desventajas de la simulación	5
1.2 Simulación y modelación con ASCEND IV	8
1.2.1 Ejemplos de usos específicos de ASCEND IV	8
1.3 Caracterización de la aguas residuales	10
1.3.1 Tratamiento de las aguas residuales	10
1.4 Sistema de tratamiento por lodos activados	11
1.5 Modelos matemáticos para lodos activados	14
1.5.1 Modelo de Dold	14
1.5.2 Modelo de la Asociación Internacional	14
1.5.3 Modelo del grupo BioMath	15
1.5.4 Modelo de la Universidad de Uppula	16
1.5.5 Otros Modelos	16
1.6 Modelo ASM 1	17
1.7 Conclusiones derivadas del análisis Bibliográfico	19
Capitulo II Descripción física – matemática del proceso de lodos activados	20
2.1 Descripción física del proceso de lodos activados	20
2.2 Descripción matemática del modelo ASM 1 del proceso de lodos activados	26
2.2.1 Crecimiento celular	27
2.2.2 Utilización de sustrato	27
2.2.3 Metabolismo endógeno	28
2.3 Conclusiones parciales	29
Capitulo III simulación del proceso de lodos activados	30
3.1 Implementación en ASCEND de modelos activados	30
3.1.1 Biblioteca de corrientes	30
3.1.2 Biblioteca del mezclador de corrientes	31
3.1.3 Biblioteca del reactor de conversión	31
3.1.4 Biblioteca del divisor de corrientes	32
3.1.5 Biblioteca del separador de componentes	33
3.2 Implementación en ASCEND de modelos específicos de lodos activados	34
3.2.1 lodos activados cinéticos	34
3.2.2 Biblioteca del sedimentador	36
3.3 Ajuste del caso Base	37
3.4 Análisis de sensibilidad	41
3.4.1 Diseño experimental 3 ^k	41
3.4.2 Análisis d sensibilidad en Stat Graphics	42
3.5 Valoración económica	46
3.6 Conclusiones parciales del capitulo	48
Conclusiones	50
Recomendaciones	51
Bibliografía	52

Introducción

En la actualidad la actividad que realiza el hombre abarca gran extensión del planeta , pero a medida que se incrementa la actividad del hombre sobre la naturaleza ,aumenta el peligro de su influencia incontrolada sobre los medios naturales tal como es la contaminación del aire, el suelo y el agua.

En Cuba la depuración mediante lodos activados es una actividad importante, y más aún porque permite la limpieza y el saneamiento de la diferentes aguas residuales de nuestro país. Este desarrollo se ha producido para satisfacer la demanda creciente de los diferentes tratamientos por lodos activados creados con el objetivo de que haya menos contaminación ambiental en nuestro país. Sin embargo, los sistemas de tratamiento por lodos activados son instalaciones tecnológicas complejas, que requieren ser controladas y optimizadas. La IAWQ (International Association of Water Quality) ha desarrollado diferentes modelos matemáticos, conocidos como ASM (Activated Sludge Models) para describir el funcionamiento de estos sistemas. Aunque los modelos ASM son muy rigurosos, la mayoría de los simuladores industriales (ASPEN-HYSYS, CHEMCAD, DESIGN II, SuperPro Designer, PRO/II, etc.) no los tienen implementados. Este trabajo se enmarca dentro de nuestros esfuerzos por desarrollar herramientas para la toma de decisiones asistidas por computación en el área de la ingeniería de procesos.

El presente trabajo se realiza en la Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDARs) ubicada frente al Hotel Sol Palmeras y que vierte entre el 40 y el 60 % de su efluente hacia la Bahía de Cárdenas.

Los modelos de lodos activados, son modelos rigurosas que han sido implementado en otros simuladores existentes , pero no en ASCEND IV pero sin embargo el uso de este software ha sido empleado en otros trabajos

Esta situación permite declarar como **Problema** a resolver el siguiente:

No se posee una herramienta de análisis de procesos que permita tomar decisiones en el empleo eficiente de los recursos instalados en el proceso de lodos activados.

La presente propuesta tiene como **Hipótesis:**

Si se utiliza un ambiente abierto de simulación se puede implementar el modelo matemático riguroso ASM de la IAWQ para el análisis del proceso de lodos activados.

Objetivo General.

Simular mediante ASCEND IV el proceso de lodos activados usando el modelo ASM de la IAWQ.

Tareas de investigación:

1.Desarrollar de un análisis bibliográfico que contenga los siguientes aspectos:

- Simulación matemática de procesos.
- Caracterización de aguas residuales.
- Descripción del sistema de tratamiento por lodos activados.
- Caracterización de los modelos matemáticos para lodos activados.
- Caracterización del modelo ASM 1

2.Obtener el modelo de simulación que represente el sistema de lodos activados usando el simulador ASCEND IV.

3. Validar el modelo evaluando la confiabilidad de los resultados obtenidos.

4.Realizar el estudio experimental simulado del proceso.

Capítulo 1 Análisis Bibliográfico

En este capítulo se desarrollaran aspectos que son de vital importancia para la simulación de los modelos ASM del proceso de lodos activados ya que estos son una descripción matemática de una serie de procesos que ocurren en un espacio delimitado, por tanto esta debe ser una herramienta básica dentro de la organización integrada en el cómputo de la gestión empresarial y suponiendo una pieza primordial en el concesión de la calidad total y final del proceso.

Se puede nombrar su flexibilidad para definir el circuito que se desea simular y establecer las variables que se desean calcular y fijar, y la posibilidad de modificar el modelo utilizado a las necesidades o condiciones de cada planta en particular.

1.1 Simulación de procesos

En los últimos años la simulación de procesos ha cambiado de automatizar los cálculos de diseño a ser el centro de procesos integrado de trabajo ingeniería, por lo que las técnicas de modelación se han establecido, como los componentes críticos de muchas tareas de específicas: control, simulación y los modelos de programación lineal (Alfaro, 2007)

La simulación de procesos mediante la aparición de las computadoras ha provocado una verdadera revolución en el mundo cultural de nuestra época. En pocos años y en función de los aportes producidos por la informática han surgido nuevos conocimientos, nuevas tecnologías y, por ende, nuevas posibilidades en el tratamiento de problemas principalmente los problemas relacionados con el medio ambiente por lo que la simulación de procesos se encuentra entre estas nuevas posibilidades de tratamiento de un problema, ya que resulta una herramienta importante a la hora de resolver cuestiones complejas para las cuales los métodos cuantitativos no son eficaces o no pueden aplicarse (Feliú, 2005)

1.1.1 Características de la simulación de procesos

El concepto de modelo matemático de un proceso real debe entenderse como una formulación por medio de relaciones matemáticas, a partir de un grupo de variables, del comportamiento de los procesos químico, físico o biológico que conforman el sistema

en el rango que se necesite. Por lo general los modelos matemáticos de las operaciones unitarias de procesos se conforman por las ecuaciones que se obtienen a partir del balance de materia y energía en el sistema, las ecuaciones de diseño, las ecuaciones cinéticas y las que permiten realizar la estimación de propiedades, aunque existen casos en que al modelar un sistema poco conocido se hace necesario utilizar ecuaciones empíricas y hasta probabilísticas en algunas ocasiones. (Domínguez, 2000)

La simulación es un procedimiento para la realización de experimentos por medio de la computadora digital y con la ayuda de modelos matemáticos, con el fin de obtener información sobre el comportamiento del sistema real (Vangheluwe, 2001; Finlayson et al., 1999; Himmelblau, 1997).

Hoy en día un problema de simulación puede resolverse a través del uso de (Domínguez, 2000; Seider et al, 1998; Himmelblau, 1997):

- Lenguaje de programación general.
- Hojas de cálculo electrónico.
- Programas matemáticos.
- Simuladores de procesos industriales.

El proceso de simulación deberá responder al diagrama de flujo mostrado en la figura 1.1.

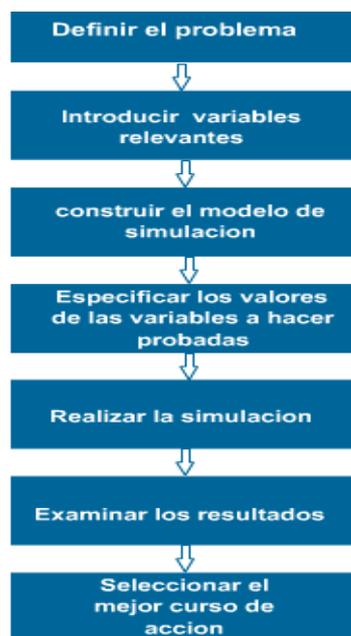


Figura 1.1 Proceso de simulación

1.1.2 Ventajas y desventajas de la simulación

El uso de la simulación, como todo programa, tiene sus ventajas y desventajas porque es una herramienta universalmente aceptada por diversas razones, lo cual permite que en algunos casos sea utilizada o no según la conveniencia a continuación se expondrá algunas de las ventajas y desventajas del uso de la misma:

VENTAJAS:

1. Es un proceso relativamente eficiente y flexible.
2. En algunos casos la simulación es el único método disponible.
3. La simulación no interfiere en sistemas del mundo real.

DESVANTAJAS:

1. La simulación no genera soluciones óptimas a problemas de análisis cuantitativos, en técnicas como cantidad económica de pedido, programación lineal o PERT (*Program Evaluation and Review Technique*).
2. El modelo de simulación no produce respuestas por si mismo.
3. Siempre quedarán variables por fuera y esas pueden alterar los resultados en la vida real que la simulación no previó. En ingeniería se "minimizan riesgos, no se evitan" (Alfaro, 2007).

Para la modelación y posterior simulación de sistemas de tratamiento biológico de aguas residuales existen en el mercado varios softwares, tales como WEST, desarrollado por la Universidad de Ghent (Vanrolleghem y Gillot, 2000), DESSAS: Diseño y simulación de plantas de fangos activados, desarrollado por el Grupo CalAgua que integra a especialistas de la Universidad de Valencia y de la Universidad Politécnica de Valencia (CALAGUA, 2004), España y BioWin 2.1, desarrollado por la

firma canadiense EnviroSim Associates LTD (EnviroSim, 2004). Todos estos softwares tienen en común la utilización de los modelos cinéticos desarrollados por la Internacional Water Association (IWA) para el estudio dinámico de los sistemas de lodos activados. El Departamento de Automatización e Ingeniería de Sistemas de la Universidad Técnica de Ilmenau, Alemania desarrolló la librería WasteWater para la modelación y simulación de plantas de tratamiento de residuales en el lenguaje de programación Modelica (Reichl, 2003), esta aplicación incluye tres modelos cinéticos de lodos activados, ASM1, ASM2d y ASM3 y cinco modelos para el sedimentador secundario. En todos los casos se trata de softwares propietarios comerciales que no están disponibles en Cuba.

Existen otros simuladores en el mundo de la computación y algunos se desarrollan especialmente para ingenieros químicos, estos poseen diferentes ventajas las mismas son capaces de conferirle las características de cada software en particular, existen los de plataforma abierta y los de plataforma cerrada

Los de plataforma cerrada son de gran utilidad e incluso son importantísimos debido a las características que poseen, pero sin embargo crean monopolios y son por lo particular relativamente más costosos. Todos estos programas son capaces de resolver cualquier problema de simulación en plantas. Entre ellos se pueden citar:

- **Design II:** [WinSim Inc.] (López, 2007). Este software fue desarrollado para aplicaciones en las industrias químicas, petroquímicas y refinerías. Permite realizar los balances de materia y energía para gran variedad de procesos incluyendo operaciones unitarias tales como reactores, intercambiadores de calor, quemadores y hornos, bombas, compresores y turbinas. La base de datos y las correlaciones para determinar las propiedades termodinámicas están fundamentalmente enfocadas a aplicaciones con hidrocarburos y plantas químicas.
- **ASPENPLUS** [Aspen Technology, Inc.] Este es un simulador enfocado principalmente para la industria química y petroquímica. Incluye además, el análisis de costos e inversiones de los procesos y unidades. (López, 2007)
- **ChemCAD III** [Chemstations, Inc.] Es un simulador de procesos para uso general. Su biblioteca de equipos incluye intercambiadores, bombas, compresores,

turbinas y otros módulos. Además, el usuario puede configurar su propio módulo. Incluye módulos específicos para el diseño y la evaluación de intercambiadores de calor, columnas de destilación y sistemas de tuberías. (López, 2007)

- **HYSYS** [Aspen Technology, Inc.] Este paquete permite la simulación dinámica y en estado estacionario a través de interfase gráfica. Su mejor aplicación es para la industria petroquímica. Ofrece una optimización de multivariantes para el diseño de procesos de modelación dinámica integrada para el desarrollo de estrategias de control de procesos e interfase gráfica con software de control digital. (López, 2007)

Los de plataforma abierta son menos costosos que los antes mencionados, son de gran uso, reúnen todas las herramientas dispersas, además permiten interoperabilidad transparente de múltiples herramientas de modelación y generan libre competencia y verdadera neutralidad tecnológica. Entre estos se pueden nombrar:

ASPEN IP.21: Este software es uno de los más importantes para la simulación y el trabajo con modelos matemáticos, es desarrollado especialmente por grandes compañías de trabajo.

Programas matemáticos: Cuentan con librerías que permiten el uso de los modelos matemáticos en menor cuantía que los antes expuestos.

ASCEND IV: El programa posee gran flexibilidad debido a que funciona a partir de la programación de modelos matemáticos implementados en las denominadas librerías, que pueden utilizarse de múltiples maneras dependiendo de los parámetros considerados y las variables a calcular. Además ASCEND cuenta con varios resolvers que se pueden seleccionar y que incluyen una rutina de optimización utilizable en diferentes tipos de modelos. (Ascend, 2007)

El Ascend es un simulador de plataforma abierta, es el más idóneo para la implementación de los modelos de la ASM, del proceso de lodos activados. La interoperabilidad transparente de múltiples herramientas de modelación ofrece una alternativa gratuita y de una calidad igual o superior a sus equivalentes. Con este

software se añade valor al trabajo de ingeniería, pueden hacerse accesible a la totalidad de las compañías con la creación de una plataforma de modelación y simulación más configurable, escalable y pensada en lo productos, basada en estándares abierto (Ascend, 2007).

1.2 Simulación y modelación con ASCEND

Mediante el uso de los simuladores se puede realizar el análisis de diferentes problemas de gran envergadura que no pueden resolverse de forma convencional por lo que se recurre a una forma eficiente, como es el uso de un ambiente abierto de simulación, para ello se utiliza el ASCEND IV (Advanced System for Computations in ENgineering Design, Sistema Avanzado para Cálculos en Diseño de Ingeniería)

Dentro de los trabajos que se han realizado utilizando la herramienta ASCEN IV se destaca la utilización de este software en el desarrollo de una librería para estudiar los procesos de extracción de metales por la vía hidrometalúrgica. (Cisterna, 2007).

Esta librería es útil para la simulación, modelación y optimización de estos procesos y fenómenos, con el fin de estudiar el comportamiento de las variables involucradas y obtener resultados aplicables en la industria.

1.2.1 Ejemplos de usos específicos de ASCEND IV:

- Realización de balances de materiales y energía mediante cálculos rigurosos de las propiedades físicas en una miniplanta de hidrogeno.
- Optimización de un sistema de columnas de destilación azeotrópica para separar mezclas.
- Solución de problemas de tareas para cursos de ingeniería química.
- El análisis de los procesos de destilación por lotes.

ASCEND IV no puede:

- Llevar a cabo manipulaciones simbólicas.
- Cálculo de valores propios y vectores propios.

- Resolver problemas de optimización de programación con enteros y programación lineal (requiere el solver).
- Resolver directamente ecuaciones de orden superior (se necesita reducir el orden manualmente).

El ASCEND IV es tanto un entorno de modelación matemática a gran escala, orientando objetos, con un potente lenguaje de modelación matemático. Aunque principalmente ha sido desarrollado por Ingenieros Químicos, se ha puesto gran cuidado en asegurar que su dominio sea independiente (ASCEND, 2007). Es así como ASCEND puede apoyar actividades de modelación en campos desde Arquitectura hasta Zoología (computacional).

Además ASCEND cuenta con varios revolvedores que se pueden seleccionar y que incluyen una rutina de optimización utilizable en diferentes tipos de modelos. Si bien programa no es amigable, una de las grandes ventajas que presenta es la transparencia puesto que, en los modelos, es posible ver el código y modificarlo con libertad. Otra ventaja es que los modelos disponibles pasan a formar parte de la librería del programa, las que pueden reutilizarse según necesidad. Estas librerías pueden usarse para el cálculo de múltiples variables en distintos casos de estudio, los que pueden guardarse como un macro, que graba todos los procedimientos realizados por el programa para efectuar el cálculo específico, y que permite ser, posteriormente, reutilizado, de esta forma, se puede contar con diferentes macros o script con una misma librería. Las librerías desarrollada con este programa, a partir de los modelos implementados, permiten realizar la simulación del proceso para analizar variables de estudio, pudiendo incluso mejorar el proceso a través de la herramienta de optimización que ASCEND ofrece. (ASCEND, 2007)

El ASCEND IV es un software que es utilizado en la resolución de diferentes problemas entre ellos los problemas ambientales por lo que se utiliza para implementar el modelo de la ASM relacionado con el sistema de tratamiento por lodos activados.

1.3 Caracterización de aguas residuales

Las aguas residuales son el resultado de la utilización del agua para distintos fines. Como consecuencia de este uso, el agua recoge materias en suspensión y disueltas que alteran sus propiedades. Dependiendo del tipo de utilización, las aguas residuales presentan características muy diferentes, en especial entre las aguas residuales urbanas o domésticas, originadas por el uso del agua en las casas, y las aguas residuales industriales, provenientes de instalaciones fabriles. Entre estas últimas la diversidad es muy acusada, ya que la alteración de propiedades del agua resultante del uso industrial puede variar entre contaminación puramente física, como ocurre en la contaminación térmica que presentan las aguas de refrigeración; hasta contaminación bioquímica de gran complejidad en aguas que reciben efluentes de industrias farmacéuticas químicas (Theodore y Buonicore, 1997).

1.3.1 Tratamiento de aguas residuales

El fundamento de los sistemas de tratamiento de aguas residuales radica en un conjunto de operaciones donde predominan los fenómenos físicos y procesos basados en reacciones químicas y bioquímicas que se agrupan en pretratamiento y tratamientos primarios, secundarios y terciarios. El pretratamiento y el tratamiento primario poseen como principal finalidad la adecuación del residual para las siguientes etapas de tratamiento y contempla el uso de operaciones físicas tales como la ecualización, las rejillas para retener sólidos grandes, las trampas para grasa, los separadores de arena, entre otros (Theodore y Buonicore, 1997). Gernaey y Petersen (2000) y Kops (2000) consideran que estas etapas no presentan ningún interés especial desde el punto de vista de la simulación, mientras que Gillot y Clercq (1999) solo tienen en cuenta la operación de ecualización en la simulación. Este autor es del criterio de que la ecualización, aún siendo la operación más importante de etapa de pretratamiento, solo representa una estabilización del afluente y no brinda aportes al modelo de dinámica de sistemas.

El tratamiento secundario es la etapa principal de una EDAR y por consiguiente la que requiere modelos matemáticos más rigurosos (VanRolleghem, 2001b). Esta etapa consiste en la reducción o eliminación de los principales contaminantes presentes en el agua materia orgánica y nutriente mediante procesos químicos y biológicos, aunque al

tratar residuos de origen urbano generalmente el tratamiento se limita a los procesos biológicos.

Son los procesos biológicos de esta etapa los que dan nombre a las diferentes tecnologías de tratamiento utilizadas. Según Qasim (1994) estos se clasifican como se indica a continuación: Proceso aerobio de cultivo suspendido: El medio posee aireación natural o artificial y los microorganismos responsables de la conversión de la materia orgánica se mantienen en suspensión dentro del seno del líquido, como ocurre en los lodos activados y lagunas de oxidación. Proceso aerobio de cultivo fijo: El medio posee aireación natural o artificial y los microorganismos están fijados a un medio sólido (piedras o materiales cerámicos y plásticos), por ejemplo: filtros percoladores y discos biológicos rotatorios. Proceso anaerobio: El medio se encuentra en condiciones de anaerobiosis de forma natural o artificial, por ejemplo: digestores anaerobios, lagunas profundas y humedales artificiales.

Dada las marcadas diferencias cinéticas encontradas por los autores consultados (Bungay y Humphrey, 1997; Kuba, 1997; Grijspeerdt y Vanrolleghem, 1999) entre los sistemas anaerobios y aerobios; así como las diferencias tecnológicas entre los procesos aerobios de cultivo fijo y de cultivo suspendido (Ramalho, 1996) y teniendo en cuenta que el 98% de las EDARs de nuestro país poseen tecnologías basadas en procesos aerobios de cultivo suspendido (CITMA, 1995) y que, en particular, en la provincia de Matanzas existen ochenta y tres EDARs de cultivo suspendido (Junco et al., 2002); en el presente trabajo solo se analizarán los sistemas de tratamiento por lodos activados, cuya tecnología se describe a continuación.

1.4 - Sistema de tratamiento por lodos activados

El lodo activado es un proceso de tratamiento por el cual el agua residual y el lodo biológico (microorganismos) son mezclados y aireados en un tanque denominado reactor. Los flóculos biológicos formados en este proceso se sedimentan en un tanque de sedimentación, lugar del cual son recirculados nuevamente al tanque aireador o reactor. En el proceso de lodos activados los microorganismos son completamente mezclados con la materia orgánica en el agua residual de manera que ésta les sirve de sustrato alimenticio. Es importante indicar que la mezcla o agitación se efectúa por

medios mecánicos superficiales o sopladores sumergidos, los cuales tiene doble función 1) producir mezcla completa y 2) agregar oxígeno al medio para que el proceso se desarrolle. (Soluciones ambientales, 2007)

El proceso de lodos activados debe su nombre de la formación de flóculos de una biomasa activa que tiene lugar producto del crecimiento de microorganismos a expensas de la degradación de la materia orgánica. Este proceso se lleva a cabo en el reactor biológico del sistema, el cual consiste en un recipiente con alto grado de oxigenación; siendo los sistemas de aireación más utilizados: la aireación difusa y la mecánica; la primera se realiza a través de difusores porosos sumergidos en el fondo del reactor, mientras que la segunda se lleva a cabo por medio de agitadores mecánicos en la superficie o de turbinas sumergidas (Qasim, 1994).

El proceso de lodos activados fue aplicado por vez primera en Manchester, en Inglaterra 1914, un proceso de lodos activados se caracteriza por los aspectos que se enumeran.

- La aireación de residual por un periodo de tiempo significativo
- La separación de los sólidos suspendidos del residual líquido al finalizar la etapa de aeración.
- La descarga de la fracción líquida como efluente del sistema.
- la circulación de parte de todos los sólidos separados al tanque de aereación donde se mezclan con el afluente.

El proceso de lodos activados es muy similar a un proceso fermentativo, sin embargo se diferencia del mismo en que los microorganismos no se encuentran dispersos en el medio, sino que forman agrupaciones (flóculos), lo que les permite una vez metabolizados los compuestos disueltos sedimentar fácilmente.

Las Operaciones básicas del proceso de lodos activados son:

- Pre-tratamiento/ajuste de aguas residuales

- Remoción de DBO en un Tanque de Aireación.
- Separación sólido - líquido en el Tanque de Sedimentación

Existe coincidencia entre los autores que han reportado estudios simulados (Gernaey y Petersen, 2000 y Gernaey y Petersen, 2001) y resultados experimentales (González y Moreno, 1998; Gernaey, 2001; Carvalho y Novais; 2002) que las tres variables más importantes a controlar en un sistema por lodos activados son:

1. Oxígeno disuelto: Se controla a través del flujo de aire que usualmente se mantiene en valores mucho más elevados que los requerido estequiométricamente por el proceso, de forma que nunca resulte la sustancia limitante. Metcalf & Eddy (1996) proponen valores del 3 orden de los 8 m de aire por metro cúbico de agua residual.

2. La edad del lodo no es más que el tiempo que permanecen los microorganismos en el sistema y se determina como la masa de microorganismos en el reactor expresada como el producto del volumen del reactor por la concentración másica de microorganismos en seno del líquido dividida por el caudal másico de microorganismos purgados del sistema expresado como el producto del caudal de lodos purgados de la corriente de fondo del clarificador por la concentración de microorganismos en esta corriente.

Es la fracción (R) establecida entre el caudal de lodos purgados de la corriente de fondo del clarificador y el caudal alimentado al reactor : La relación de reciclo de lodos puede ser controlada manejando el caudal de lodos purgados, para mantener una relación favorable alimento – sustrato en el reactor.

Tanto la edad del lodo como la relación de reciclo dependen directamente del caudal de lodos purgados.

En trabajos previos (Benítez, Martínez y Junco, 1997, Benítez y Martínez, 2000 y Benítez y Martínez, 2001) se ha comprobado que el principal parámetro de operación, desde el punto de vista de control del proceso, es el caudal de lodos que se extrae de la

corriente de recirculación; mientras que el oxígeno disuelto no representa un problema ya que generalmente es fácil garantizar niveles elevados.

Existen otros factores que influyen sobre la intensidad de la depuración, los principales son: la temperatura, la duración de la aireación, actividad de los lodos y concentración del afluente. (Seoánez, 1999). En los sistemas convencionales de lodos activados el agua residual es aireada de 4 a 8 horas según Metcalf & Eddy (1996).

1.5.- Modelos matemáticos para lodos activados.

El modelo analítico tradicional en estado estacionario, cuando se utiliza para simular un reactor simple o un sistema de reactores en serie bajo condiciones de carga y flujo cíclicos, generalmente brinda resultados que se alejan considerablemente de los valores observados experimentalmente.

1.5.1.- Modelo de Dold.

En 1980 el equipo de trabajo del Dr. P. L. Dold desarrollo un modelo analítico dinámico que incorporaba las ecuaciones cinéticas de la eliminación de materia orgánica y de la nitrificación, con lo que se lograron excelentes resultados (Dold y Ekama, 1980). Sin embargo, este modelo no consideraba la respiración endógena y en su lugar suponía la volatilización de la biomasa.

1.5.2.- Modelos de la Asociación Internacional del Agua (IWA).

En 1982 la *International Association on Water Pollution Research and Control* – IAWPRC (después llamada *International Association for Water Quality* – IAWQ hasta el 2000 en que pasó a ser llamada *International Water Association* – IWA) creó el grupo de trabajo para la modelación matemática de la depuración biológica de aguas residuales (*Task Group on Mathematical Modelling for Design and Operation of Biological Wastewater Treatment Processes*), el cual desde entonces ha venido desarrollando un conjunto de modelos que son considerados, a criterio de un gran número de especialistas (Henze, 1995; Fronteau, 1997; Jeppsson, 1999; Baetens, 2000 y Vanwelden, 2000) y que el autor comparte, los más generales, completos y complejos

para el tratamiento de aguas residuales por medio de lodos activados. Los modelos presentados hasta la fecha son cuatro y todos se basan en la notación matricial introducida por Petersen en 1965 para describir reacciones químicas (Baetens, 2000):

- **ASM1** (*Activated Sludge Model No. 1*) fue creado en 1987 para describir los procesos de eliminación de materia orgánica y de nitrificación – denitrificación. Se trata de un modelo que utiliza diecinueve parámetros, cinco estequiométricos y el resto cinéticos, para representar ocho procesos que describen el comportamiento de trece especies diferentes (Gernaey y Petersen, 2000).
- **ASM2** (*Activated Sludge Model No. 2*) se presentó en 1994 como una modificación del modelo ASM1 en el que se incluyeron los procesos de eliminación biológica de fósforo, se simplificaron algunos procesos del modelo anterior y se aumentaron hasta diecinueve los procesos y las especies descritas (Henze, 1995).
- **ASM2d** (*Activated Sludge Model No. 2d*) fue presentado a principios de 1999 y es básicamente el mismo modelo ASM2, con la adición del proceso de denitrificación por medio de las bacterias eliminadoras de fósforo (Baetens, 2000).
- **ASM3** (*Activated Sludge Model No. 3*) se presentó a finales de 1999 y es, hasta la fecha, el último de los modelos de la IWA. La novedad del modelo consiste en incorporar los nuevos conocimientos que se tienen sobre el mecanismo de acumulación de fósforo en el interior de las células (Baetens, 2000).

Si bien el primer modelo (ASM1) incluía la descripción dinámica de los lodos activados, su principal objetivo era el estado estacionario. A partir del segundo modelo (ASM2) se ha orientado la modelación fundamentalmente hacia la eliminación de nutrientes y en especial a la eliminación del fósforo, por lo que ha sido necesario mejorar el tratamiento dinámico de estos modelos. Sin embargo, la modelación de los procesos de eliminación de fósforo es mucho más compleja y ha hecho que estos modelos se conviertan en herramientas muy difíciles de manejar por personas que no sean expertas en modelación y simulación.

1.5.3.- Modelos del Grupo *BioMath*.

Otro de los grupos de trabajo con resultados relevantes a nivel mundial en el desarrollo de modelos dinámicos para el tratamiento biológico de aguas residuales es el

Departamento de Matemática Aplicada, Biométrica y Control de Procesos (*BioMath*), perteneciente a la Facultad de Agricultura y Ciencias Biológicas Aplicadas de la Universidad de Gent, Bélgica. Este grupo, encabezado por el Dr. Peter Vanrolleghem, ha trabajado fundamentalmente en el desarrollo de modelos dinámicos que describan el proceso de eliminación de fósforo en lodos activados mediante microorganismos acumuladores (PAO). Generalmente se trata de modelos específicos que surgen como modificaciones de los desarrollados por la IWA, en particular el ASM3, (Vanrolleghem, 2001b) y que han sido reformulados como modelos fenomenológicos en lugar de la descripción matricial original.

1.5.4.- Modelos de la Universidad de Uppsala.

El Grupo de Sistemas y Control de Universidad de Uppsala en Suecia cuenta con una línea de investigación, dirigida por el Dr. Bengt Carlsson, encaminada al desarrollo de modelos matemáticos que describan el funcionamiento dinámico de los sistemas de tratamiento de aguas residuales por lodos activados con el objetivo de su posterior control automático. Estos modelos se basan en el ASM2 de la IWA, con la adición de las ecuaciones de los controladores PID y PI (Lindberg, 1997). Estos modelos fueron descritos utilizando la nomenclatura empleada en el control automático.

1.5.5.- Otros Modelos.

El grupo de trabajo dirigido por la Dra. Aurora Seco de la Facultad de Química en la Universidad de Valencia, España, ha obtenido importantes resultados en la adecuación de los modelos dinámicos de la IWA a esquemas de procesos específicos de eliminación de nutrientes (A/O, Wuhrman, UCT, Ludzack-Ettinger, BARDENPHO, entre otros) en sistemas de lodos activados. Otro grupo de investigación español que ha obtenido resultados importantes en la modelación del proceso de lodos activados es el perteneciente al Departamento de Física, Química y Expresión Gráfica de la Universidad de León, bajo la tutela del Dr. Antonio Morán.

En nuestro país los principales resultados en esta rama se han obtenido por el Centro de Estudio de Ingeniería de Procesos (*CIPRO*) que pertenece a la Facultad de Ingeniería Química del Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría” (ISPJAE) bajo la dirección del Dr. Carlos Menéndez (Díaz, 1997). Sin embargo, los principales aportes

de *CIPRO* a la modelación matemática y simulación de depuradoras han estado orientados a los sistemas naturales, fundamentalmente a las lagunas de estabilización. Por otro lado el Centro de Tecnología Apropriada en Saneamiento (*SANITEC*), fundado en 1996 en la ciudad de Guantánamo por el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos de Cuba, tiene entre sus líneas de trabajo el desarrollo de modelos matemáticos de procesos de depuración, aunque su principal actividad ha estado encaminada a los humedales artificiales y al agua de consumo.

1.6- Modelo ASM 1.

Entre los modelos de la ASM encuentra el modelo ASM1 fue creado en 1987 para describir los procesos de eliminación de materia orgánica y de nitrificación – denitrificación.

En 1976 Marais y Ekama propusieron un modelo en estado estacionario para sistemas de lodos activados con reactores mezcla completa, simples y en serie bajo condiciones de flujo y carga constante con el fin de modelar la degradación de la materia orgánica, fundamentalmente carbono. Además propusieron que el nitrógeno en el efluente puede dividirse en cuatro fracciones y desarrollaron las ecuaciones en estado estacionario para la utilización del amonio para la síntesis de masa celular activa, la liberación de nitrógeno orgánico debido a la respiración endógena, la conversión del nitrógeno orgánico biodegradable a amonio, la incorporación del nitrógeno no biodegradable al material inerte y la conversión del amonio a nitrato como función de la edad del lodo (Wentzel, 1992)

Este modelo en estado estacionario no explicaba las observaciones realizadas por estos mismos autores en investigaciones experimentales efectuadas en 1979. Para explicar estas observaciones, Dold et al (1980) propuso que la materia orgánica biodegradable en el afluente podía dividirse en dos fracciones, la fácilmente biodegradable y la lentamente biodegradable, e incorporó estos conceptos al modelo cinético de lodos activados aerobios con nitrificación, con lo que se obtuvo un modelo dinámico para estos sistemas. Van Haandel et al (1981) incorporaron la desnitrificación al modelo aerobio de Dold et al, para obtener un modelo cinético general de lodos activados con nitrificación – desnitrificación. Ellos encontraron que la cinética de la desnitrificación

podía modelarse en términos de materia orgánica fácilmente biodegradable y lentamente biodegradable, al igual que lo propuesto por Dold et al bajo condiciones aerobias, pero que la relación entre la velocidad de hidrólisis de la materia lentamente biodegradable y su utilización bajo condiciones anóxicas debía reducirse a un 1/3 en relación con la que se obtiene bajo condiciones aerobias. A partir de esta fecha comienzan a desarrollarse un gran número de investigaciones para explicar el mecanismo de eliminación biológica de fósforo, así como las características microbiológicas y bioquímicas de los organismos acumuladores de fósforo. (Wentzel,1992). Los primeros modelos fueron principalmente de tipo mecanísticos y no es hasta 1986 que el primer modelo matemático basado en los aspectos bioquímicos fue desarrollado por Wentzel (1992) y Baetens (2000).

El modelo de lodos activados No 1 presenta un modelo para la eliminación biológica de nitrógeno y carbono simultánea.

El modelo presentado aquí es una herramienta para:

- La investigación (los resultados de las pruebas, la selección y optimización de experimentos).
- La optimización de procesos y solución de problemas a escala completa en las plantas de tratamiento de residuales.

Se ha hecho un intento de limitar el número de procesos utilizados en el modelo. El objetivo, sin embargo, ha sido producir un modelo que razonablemente describa las diferentes configuraciones del sistema de lodos activados que se utilizan para la eliminación biológica de fósforo y nitrógeno. Esto ha dado lugar a un nivel de complejidad.

La cinética y estequiometría utilizada para describir los procesos que han sido elegidos de la forma más simple, están basados principalmente en la cinética de Monod lo que permite las transiciones suaves de los procesos, como la experiencia ha demostrado la cinética y estequiometría están presentes utilizando la notación matricial, que se ha introducido, es un método eficaz a la vista general del complejo de transformaciones y los componentes de la matriz de notación también permite el control de la conservación de los componente de la estequiometría de los coeficientes y, por tanto, garantiza que los balances de masa en los cálculos se lleven correctamente.

El modelo ASM 1 se basa en la utilización de la DBO para todas las partículas de materia orgánica, así como la concentración total de los lodos activados.

1.7 Conclusiones derivadas del análisis bibliográfico

1. La caracterización del agua residual es un factor importante en el proceso de lodos activados.
2. El modelo que más se ajusta es el ASM 1 cuando no resulta de interés la descripción matemática de la remoción de fósforo.
3. Las variables y factores más importantes a controlar en el modelo ASM 1 es el carbono y nitrógeno simultáneamente.
4. ASCEND IV, debido a las facilidades que ofrece como plataforma abierta, resulta muy adecuado para la simulación del modelo de ASM 1 del proceso de lodos.

Capítulo II Descripción físico- matemática del proceso de lodos activados

En este capítulo se hará una descripción física y matemática del proceso de lodos activados llevado a cabo en el complejo turístico de Sol Palmera, destacando la importancia que tiene consigo el uso de un tratamiento de aguas residuales por lodos activados.

2.1 Descripción física del proceso de lodos activados.

Para la calibración y puesta a punto del modelo se utilizaron los datos experimentales provenientes de la Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR) por lodos activados aledaña al Complejo Turístico “Sol Palmeras”, perteneciente a la empresa Aguas Varadero S.A. Esta depuradora se encuentra ubicada en el balneario de Varadero, en la Península de Hicacos, al norte de la provincia de Matanzas (figura 2.1) y vierte su efluente hacia la Bahía de Cárdenas.



**Fig. 2.1 Ubicación geográfica de la EDAR “Sol Palmera”
en Varadero, provincia de Matanzas**

La Península de Hicacos es una lengua de tierra rodeada por mar, de unos de 22 km de largo y una anchura promedio de 700 m. Es el punto más septentrional de Cuba y su extremo roza el Trópico de Cáncer. Toda la costa norte es una excelente playa que se extiende de manera ininterrumpida por 22,6 km, lo que la convierte en el principal polo turístico del país. En la actualidad existen 13000 capacidades hoteleras y antes del año 2005 crecerán en otras 5000, con una producción total de aguas residuales estimada en los 7000 m³ diarios, los cuales deben ser depurados antes de verterlos o reutilizarlos. La EDAR “Sol Palmeras” se encuentra a la derecha de la Autopista Sur, en el kilómetro 15 (figura 4.2) y brinda servicios a los hoteles “Sol Palmeras” (607 habitaciones), “Meliá Varadero”(490 habitaciones) y “Meliá Las Américas” (340 habitaciones) y al Centro Internacional de Convenciones “Plaza América”. El caudal de agua residual que producen estas instalaciones puede alcanzar, en temporada de alta turística, 1000 m³/día; lo cual no sobrepasa la capacidad de diseño del sistema.



Fig. 2.2 Detalle de la localización de la EDAR “Sol Palmera” dentro de balneario de Varadero.

El diagrama de flujo de esta EDAR se muestra en la figura 2.3. El sistema comienza con la operación de desbaste, donde ocurre la separación de los sólidos por medio un tamiz continuo de malla de acero inoxidable de 2 mm de diámetro. El agua libre de sólidos gruesos se somete a la operación de desgrase por flotación mediante una trampa provista de un tabique deflector para la colección de las grasas en la superficie

del líquido. Como se planteó , estas etapas son de elevada eficiencia y no influye significativamente en la calidad del efluente final.

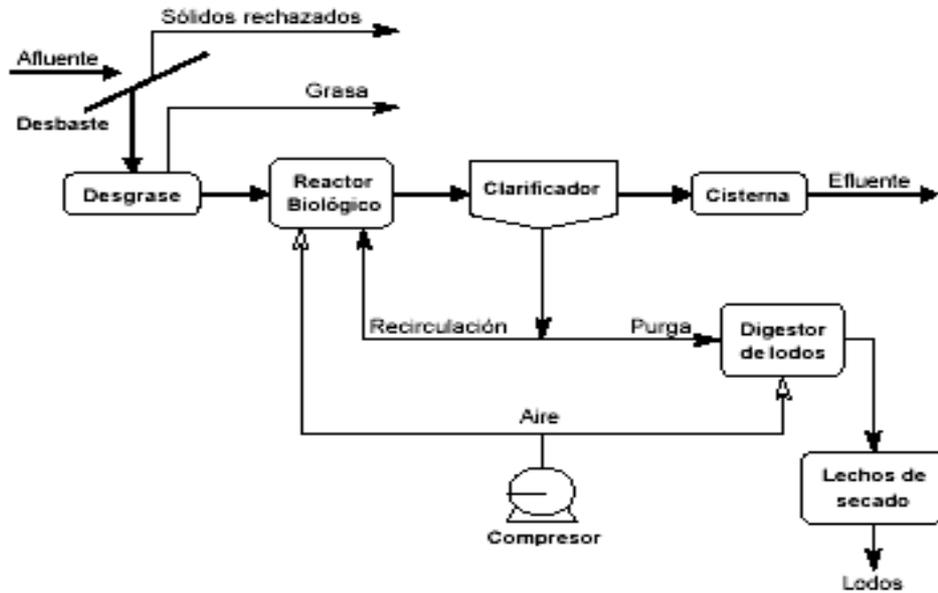


Fig. 2.3 Diagrama de flujo de la EDAR "Sol Palmera"

Como sistema de tratamiento secundario la planta dispone de un proceso de lodo activado el cual está compuesto de un reactor biológico aireado y de un clarificador. La eficiencia de toda la planta depende casi en un cien por cien de esta etapa.



Fig.2.4 Imagen de dos de las tres secciones del reactor biológico

En el diagrama de la figura 2.5 se describen los detalles de este proceso. El agua proveniente de la operación de desgrase se une con una corriente de lodos que se recircula y pasan al reactor biológico donde se crean las condiciones de oxigenación necesarias para que los microorganismos del lodo oxiden la materia orgánica y la transformen en nuevas células.

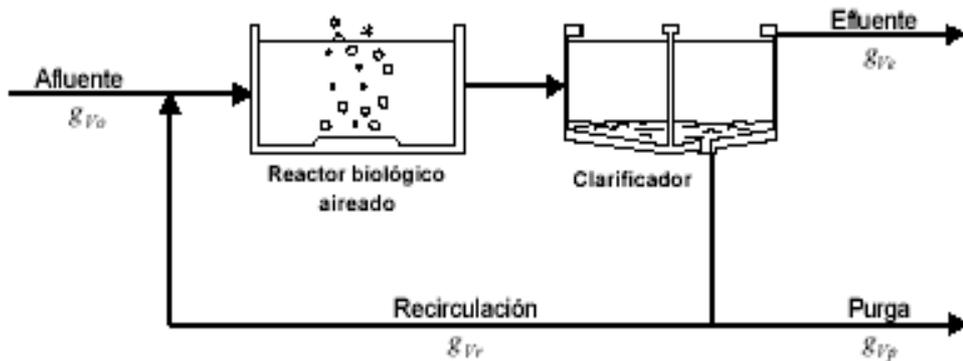
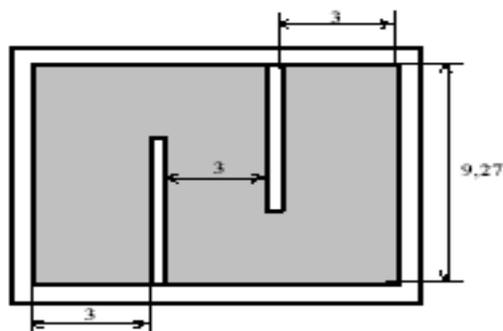


Fig. 2.5 Esquema del sistema de tratamiento secundario por lodos activados.

El reactor biológico posee una capacidad efectiva de 350 m³ y está compuesto de tres secciones de 9,25 m de largo y 4,00 m de profundidad. El reactor está dividido por dos tabiques interiores que delimitan las tres secciones de 3 m de ancho cada una (figura 2.6).



**Fig. 2.6 Vista superior del reactor biológico de la EDAR
(dimensiones expresadas en metro)**

El sistema de aireación del reactor biológico es por el fondo, como se ilustra en la figura 2.7. La red de aire está distribuida equitativamente en cada sección, con un total de 252 difusores, los cuales son de cerámica porosa, del tipo Norton en forma de domos de 0,2 m de diámetro, asentados sobre una parrilla de tubos de PVC de 0,11 m de diámetro. El aire se suministra a razón de 900 000 m³/h, por dos compresores de pistón los cuales garantizan la demanda de aire de toda la planta.



Fig.2.7 Red de tubería y difusores del sistema de aireación del reactor biológico.

En el borde superior opuesto a la entrada de caudal se encuentra un canal de reboso que conduce el agua rica en lodos a la operación de sedimentación, la cual ocurre en un clarificador rectangular aledaño al reactor. El clarificador termina en tres secciones troncos piramidales de 3 m de largo, 4 m de ancho y 4 m de profundidad (figura 2.8). El tiempo de retención hidráulico en el tratamiento secundario oscila alrededor de las 10 horas y de aquí el agua clarificada es almacenada en una cisterna y posteriormente pasa al tratamiento terciario consistente en una filtración con zeolita.

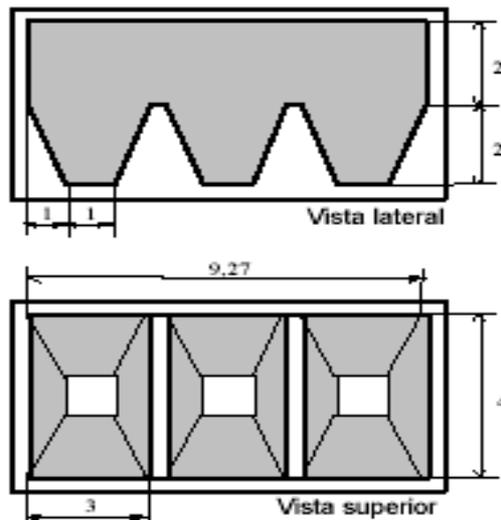


Fig.2.8 Vista lateral y superior del clarificador de la EDAR (dimensiones expresadas en metros)

Los lodos purgados del clarificador pasan a un digestor aerobio con una capacidad de 140 kg/día y un tiempo de retención hidráulico de 2,17 días y finalmente son bombeados a un lecho de secado solar (figura 4.9) formados por áridos de diferente granulometría cubiertos de ladrillo de junta abierta.



Fig.2.9 Lechos de lodos de secado

Todo el tratamiento secundario de la EDAR de “Sol Palmeras” se encuentra bajo techo. Esto repercute de manera muy favorable en la puesta a punto de modelos matemáticos, ya que se elimina el efecto de variables meteorológicas tales como radiación solar, viento, lluvia, entre otras. Otro aspecto que favorece la calibración de modelos

matemáticos en esta estación es la gran disponibilidad de datos que existen de la misma. Durante más de una década diferentes investigadores han realizado la caracterización exhaustiva tanto del afluente como del efluente (Thabet, 1998; Martínez, 1998 y 2002; Martínez, Benítez y Domínguez, 2002; Benítez y Martínez, 2002c). En el año 1996 se realizó un scale down del tratamiento secundario y a partir de este se construyó el sistema reactor biológico – clarificador a escala piloto, lo cual permitió realizar un estudio cinético del proceso biológico que concluyó con la determinación de los coeficientes (Martínez y Berrios, 1996).

2.2 Descripción matemática del modelo ASM1 del proceso de lodos activados.

Los modelos matemáticos son una descripción matemática de un determinado proceso, que se puede acercar en mayor o menor grado a la idealidad, ellos son representaciones teóricas del comportamiento cinético real como se expuso en el capítulo anterior.

Henze (1995), Metcalf y Eddy (1996) y Morgenroth y Arvin (2002) coinciden en afirmar que la modelación matemática rigurosa de cada una de las operaciones y procesos unitarios que se verifican en una EDAR puede lograrse por la adecuación de la ecuación del balance de masa a nivel macroscópico, en correspondencia a lo planteado por la dinámica de sistemas:

$$\frac{dm_i}{dt} = -\Delta qm_i + qm_i^{(m)} + r_i$$

La misma indica, para un componente i o para todos los componentes que forman la corriente que la variación temporal neta de la masa en el sistema $[dm_i / dt]$ es la suma del gasto con el exterior $[\Delta qm]$, el gasto másico a través de la interfase con otros componentes $(qm^{(m)})$ siguiendo los mecanismos de la transferencia de masa y el gasto másico de producción o consumo debido a reacciones químicas o bioquímicas $[r_i]$.

2.2.1.- Crecimiento celular.

La velocidad de producción de células microbianas a expensas del consumo de un sustrato limitante es función de las concentraciones máximas de estos dos componentes ρ_x y ρ_y en cada instante de tiempo:

$$\frac{d\rho_x}{dt} = f(\rho_x, \rho_s)$$

Monod, en un estudio de cultivo continuo, logró desarrollar una ecuación semiempírica que describe, de manera muy adecuada, este comportamiento:

$$\frac{d\rho_x}{dt} = \mu_{\max} \frac{\rho_s \rho_x}{K_s + \rho_s}$$

Esta función, llamada ecuación de Monod, ha sido la mejor representación del modelo cinético del crecimiento de microorganismos en ausencia de sustancias inhibitoras y este es un criterio compartido por la mayoría de los autores que han estudiado la cinética microbiana (Fronteau, 1997; Kuba, 1997; Grijspeerdt y Vanrolleghem, 1999; Petersen y Gernaey, 1999 y Carlsson, 2000^a y Henze, 1992).

La velocidad máxima de crecimiento (μ_{\max}) representa la velocidad de crecimiento cuando el sustrato no es limitante, y la constante de saturación (K_s) es la concentración de sustrato para la cual la velocidad de crecimiento es la mitad de su valor máximo ($1/2 \mu_{\max}$).

2.2.2 Utilización del sustrato.

Por otra parte, la producción de células microbianas ocurre a expensas del consumo de sustrato siguiendo una relación estequiométrica específica. McCarty logró determinar una fórmula teórica que representa la composición química de la biomasa: $C_5 H_7 O_2 N$ (citada por Gernaey y Petersen, 2001). Usando esta fórmula pueden ser balanceadas estequiométricamente las diferentes biorreacciones para cada sustrato en particular. Sin embargo, muchos especialistas (Metcalf y Eddy, 1996; Bungay y Humphrey, 1997;

Deme y Vanderhaegen, 2001 y Henze, 1992) prefieren hacer uso de un coeficiente empírico (Y) equivalente a la conversión másica de sustrato en biomasa:

$$Y = \frac{\rho_x \rho_{Xa}}{\rho_{sa} \rho_s}$$

quedando relacionadas así las velocidades de producción de biomasa y de consumo de sustrato:

$$\frac{d\rho_x}{dt_R} = -Y \frac{d\rho_s}{dt_R}$$

de donde resulta finalmente:

$$\frac{d\rho_s}{dt_R} = -\frac{\mu_{max}}{Y} \frac{\rho_s^* \rho_x}{K_s + \rho_s}$$

Metcalf y Eddy (1996) y Henze, 1992 prefieren sustituir la relación μ_{max}/Y por el término k , que representa la tasa máxima de utilización del sustrato por unidad de microorganismos:

$$\frac{d\rho_s}{dt_R} = -k \frac{\rho_s^* \rho_x}{K_s + \rho_s}$$

2.2.3 Metabolismo endógeno.

En los procesos biológicos no todas las células están en fase de crecimiento, algunas se encuentran en fase de retardo inicial y otras en fase de muerte, por lo que la velocidad de producción de biomasa debe ser corregida para tener en cuenta estos factores. Generalmente todos estos factores se engloban en un solo término, la descomposición endógena (k_d), y se supone que la disminución de la biomasa por esta causa es proporcional a la concentración de microorganismos presentes (Metcalf y Eddy, 1996; Theodore y Buonicore, 1997; Meirlaen y Vanassel, 2002 y Henze, 1992).

Incorporando este término en la expresión para determinar la velocidad de producción de biomasa resulta:

$$\frac{d\rho_x}{dt} = \mu_{\max} \frac{\rho_s * \rho_x}{K_s + \rho_s} - k_s * \rho_x$$

2.3 Conclusiones parciales del capítulo

El proceso de lodos activados es un proceso importante en el tratamiento de las aguas residuales al igual que toda la materia orgánica que participa en el. Los parámetros de mayor importancia en la descripción de los modelos matemáticos son:

- Crecimiento celular.
- Utilización del sustrato
- Metabolismo endógeno.

Nomenclatura usada en el capítulo:

μ_{\max}	Velocidad máxima de crecimiento
Δq_{m1}	Flujos de entrada y salida
ρ_x	Concentración másica de biomasa
ρ_s	Concentración másica de sustrato
K_s	Constante de saturación
t	Tiempo
Y	Conversión másica de sustrato en biomasa
k	Tasa máxima de utilización del sustrato por unidad de microorganismos
k_d	Constante de muerto

Capítulo III: Simulación del proceso de lodos activados.

En este capítulo se presentan resultados obtenidos al aplicar la simulación en el proceso de lodos activados para la obtención y validación del modelo ASM 1.

Existen varios simuladores profesionales que son capaces de realizar la solución de un problema de simulación, se escogió en este caso ASCEN IV debido a las facilidades que ofrece el mismo y a su flexibilidad, así como la disponibilidad de este software.

3.1- Implementación en ASCEND de modelos elementales

3.1.1- Biblioteca de corrientes.

Los parámetros que se tuvieron en cuenta para las corrientes fueron: flujo total, nombre de los componentes, flujo por componentes y/o composición de la corriente. No se tuvo en cuenta la T y P ya que en el proceso de depuración estos se mantienen a las condiciones ambientales y, en este rango, no tienen una influencia significativa en el proceso de oxidación de la materia orgánica.

El modelo matemático que describe la restricción en la composición es:

$$\sum_{i=1}^{comp} y_i = 1,0 \quad (1)$$

es decir, la composición total de la corriente tiene que ser el 100%. Este modelo le permite a la biblioteca de corrientes comprobar los datos de composiciones cuando el usuario los entra todos o normalizarlos cuando el usuario omite una de las composiciones.

El otro modelo matemático para corrientes es el correspondiente al balance por componentes:

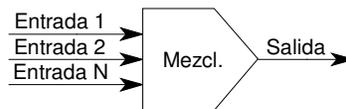
$$f_i = f_{tot} \cdot y_i \quad \text{para todo } i = 1 \dots comp$$
$$f_{tot} = \sum_{i=1}^{comp} f_i \quad (2)$$

Con este modelo y utilizando los parámetros flujo total, flujos por componentes y composiciones; la biblioteca de corrientes puede calcular uno de ellos, utilizando los dos

restantes; según los datos entrados inicialmente. Este modelo puede observarse en los Anexos 1 y 2

3.1.2 Biblioteca del mezclador de corrientes.

Este equipo es el encargado de mezclar las diferentes corrientes que intervienen en el proceso de lodos activados. Tiene N corrientes de entrada y una corriente de salida:



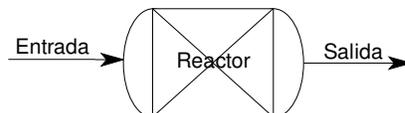
Este módulo calcula el flujo por componentes a la salida de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$salida_f_i = \sum_{j=1}^N entrada_j_f_i \quad \text{para todo } i = 1 \dots comp \quad (3)$$

y los parámetros flujo total y composiciones son calculados por la biblioteca de corrientes según la ecuación 2. Este modelo puede observarse en el Anexo 3

3.1.3 Biblioteca del reactor de conversión.

En este módulo se pueden especificar un amplio número de reacciones a partir de los datos de estequiometría y conversión. Las reacciones pueden ocurrir de forma secuencial o de forma paralela. Este equipo presenta una corriente de entrada y una de salida, según muestra el esquema:



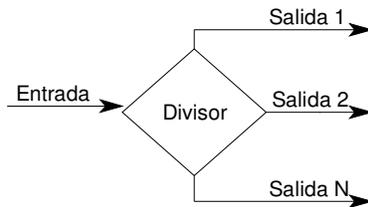
A su vez este modelo matemático tiene en cuenta para el cálculo del flujo por componentes a la salida: la conversión, los coeficientes estequiométricos y la composición de referencia de la sustancia limitante:

$$salida_f_i = entrada_f_i + esteq_i \cdot entrada_f_{limitante} \cdot conv \quad \text{para todo } i = 1 \dots comp \quad (4)$$

De manera similar al mezclador, los parámetros flujo total y composiciones son calculados por la biblioteca de corrientes según la ecuación 2. El modelo perteneciente al reactor puede observarse en el Anexo 6.

3.1.4 Biblioteca del divisor de corriente.

Este modulo se encarga de dividir una corriente de entrada en N corrientes de salida, involucrando el siguiente diagrama de flujo:



Donde la composición de cada componente en las corrientes de salida es igual a la de entrada:

$$salida_j_y_i = entrada_y_i \quad \text{para todo } i = 1 \dots comp \text{ y } j = 1 \dots N \quad (5)$$

Mientras que el flujo total de cada corriente de salida se calcula mediante una fracción de división correspondiente:

$$salida_j_f_{tot} = entrada_f_{tot} \cdot div_j \quad \text{para todo } j = 1 \dots N \quad (6)$$

Las fracciones de división están restringidas por el modelo matemático:

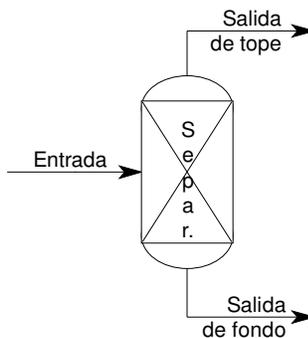
$$\sum_{j=1}^N div_j = 1,0 \quad (7)$$

Esto le permite a la biblioteca del divisor de corrientes comprobar los datos de fracción de división o normalizarlos en dependencia de si fueron entrados todos o si se omitió uno, respectivamente.

Los restantes parámetros de cada corriente son calculados por la biblioteca de corrientes según la ecuación 2. El modelo concerniente al divisor de corriente puede observarse en el anexo 5.

3.1.5 Biblioteca del separador de componentes.

Este módulo se encarga de separar los componentes de una corriente, dando como resultado dos corrientes de composiciones diferentes, una por el tope y otra por el fondo. Mediante esta biblioteca pueden simularse, de manera elemental, todas las operaciones que impliquen separación. Por ejemplo sedimentación, flasheo, filtración, centrifugación, destilación, tamizado, venteo, entre otras:



Como criterio de separación se utilizó la fracción, con respecto a la corriente de entrada, de cada componente en la corriente de tope. El modelo matemático para esta corriente es:

$$salida_{Tope} - f_i = entrada - f_i \cdot fracc_tope_i \quad \text{para todo } i = 1 \dots comp \quad (8)$$

La corriente de fondo es calculada por un balance de componentes:

$$salida_{Fondo} - f_i = entrada - f_i - salida_{Tope} - f_i \quad \text{para todo } i = 1 \dots comp \quad (9)$$

Y los restantes parámetros de cada corriente son calculados por la biblioteca de corrientes según la ecuación 2. El modelo concerniente al divisor de corriente puede observarse en el anexo 4.

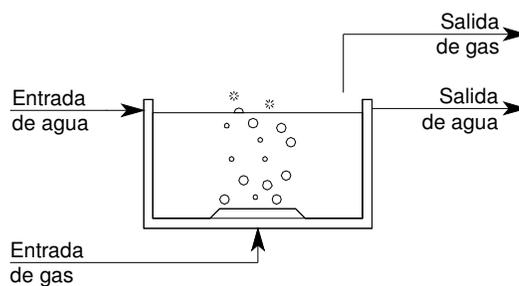
3.2 Implementación en ASCEND de modelos específicos de lodos activados.

3.2.1 Lodo activado cinético:

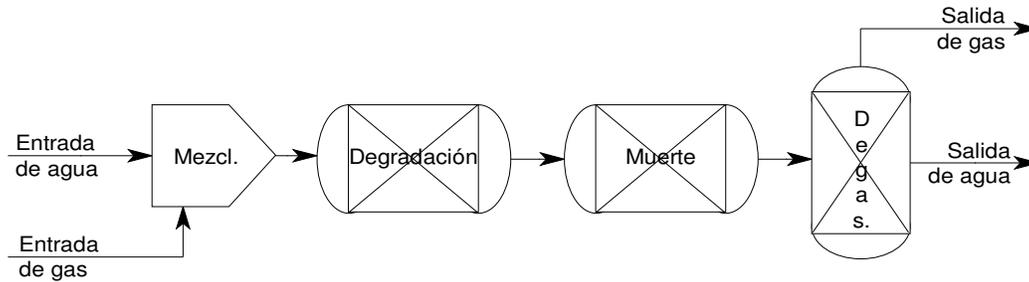
Este modelo es un sub diagrama de flujos, que incluye un mezclador para adicionar la corriente de aire, dos reactores en serie: un para la oxidación de la materia orgánica y otro para la degradación de la biomasa, y finalmente un separador de componentes para extraer los gases residuales.

Esta operación es más compleja por que tiene involucrada varios compartimientos para el procesamiento del lodo activado y las reacciones se presentan en forma cinética. Esta operación representa a un reactor aerobio de tipo mezcla completa. Este módulo simula las transformaciones (bio-oxidación, oxidación química y muerte celular) de compuestos orgánicos y otros compuestos presentes en un reactor mezcla completa bajo condiciones aerobias.

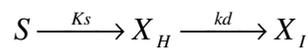
La biblioteca cuenta con dos entradas una de agua y otra de aire, a su vez presenta dos salidas una para el agua tratada y la otra para el gas de venteo, según muestra el esquema:



Este proceso puede ser simulado mediante un sub-diagrama de flujo que involucra varias bibliotecas elementales, utilizando el siguiente esquema:



Las corrientes de aire y agua residual que entran son mezcladas para obtener una corriente de agua aireada que será sometida al proceso de biooxidación mediante la reacción en serie:



donde el sustrato se degrada en presencia de una biomasa de microorganismos heterótrofos para incrementar la población de esta y a su vez los microorganismos heterótrofos mueren para producir una biomasa inerte.

Aunque físicamente ambas reacciones ocurren en el mismo reactor, pueden ser simuladas como dos reacciones independientes en serie. Primero en un reactor de conversión, donde ocurre la degradación de la materia orgánica y a continuación en otro reactor de conversión donde ocurre la muerte de la biomasa. A la corriente resultante se le realiza un venteo para separar el gas.

La reacción de degradación de la materia orgánica puede ser simulada cinéticamente mediante la ecuación de Monod:

$$\mu = \mu_{\max} \frac{S \cdot X}{K_S + S} \quad (10)$$

conociendo las concentraciones de sustrato y de biomasa en la corriente:

$$S = \frac{\text{entrada} - f_{\text{sustrato}}}{\text{entrada} - f_{\text{tot}}} \cdot \rho_{\text{tot}} \quad (11)$$

$$X = \frac{\text{entrada} - f_{\text{biomasa}}}{\text{entrada} - f_{\text{tot}}} \cdot \rho_{\text{tot}} \quad (12)$$

La conversión es calculada a partir de la cantidad de sustrato degradado durante el tiempo de reacción:

$$S_{degrad} = \mu \cdot \theta \quad (13)$$

$$conv_S = \begin{cases} \frac{S_{degrad}}{S} & \text{si } S_{degrad} < S \\ 1 & \text{si } S_{degrad} \geq S \end{cases} \quad (14)$$

Es importante limitar la conversión a 1 cuando todo el sustrato a sido consumido (ec. 14), pues, aunque físicamente es obvio, matemáticamente pueden obtenerse conversiones superiores a 1 si el tiempo de reacción es prolongado.

La reacción de muerte de biomasa, de manera análoga a la de degradación de biomasa, es también una reacción cinética y puede ser modelada por la ecuación de descomposición endógena:

$$\mu_d = kd \cdot X \quad (15)$$

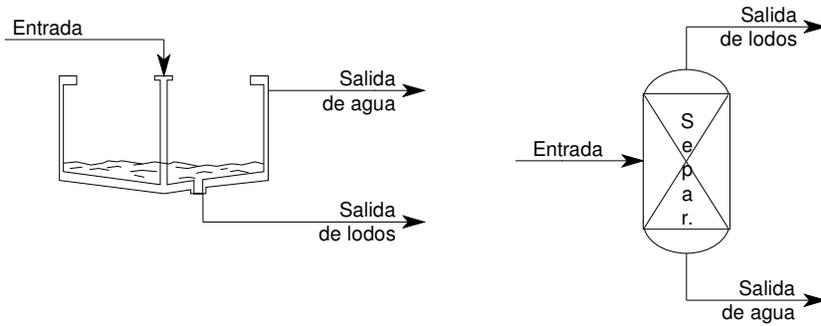
$$X_{muerto} = \mu_d \cdot \theta \quad (16)$$

$$conv_X = \begin{cases} \frac{X_{muerto}}{X} & \text{si } X_{muerto} < X \\ 1 & \text{si } X_{muerto} \geq X \end{cases} \quad (17)$$

El modelo concerniente al lodo activado puede observarse en el anexo 8

3.2.2 Biblioteca del sedimentador.

La biblioteca de esta operación unitaria simula un clarificador para remover lodos, así como otras partículas presentes en el agua de salida. Este equipo consta de una entrada y dos salidas donde por el tope sale el agua clara y por el fondo el concentrado de lodos. Esta biblioteca puede ser simulada mediante un separador de componentes invertido:



es decir, el componente de interés (sedimento) se extrae por la corriente de tope para poder indicar la fracción de separación de los sólidos.

La fracción de separación de líquidos en el tope está en función de la concentración de sólidos en la corriente de lodos. Esta fracción se calcula como:

$$lodo_f_{sólidos} = \sum_{i=1}^{comp} entra_f_i \cdot fracc_sedim_i \quad (18)$$

$$lodo_f_{tot} = \frac{lodo_f_{sólidos}}{conc_lodos} \cdot \rho_{tot} \quad (19)$$

$$fracc_líq = 1 - \frac{lodo_f_{sólidos}}{lodo_f_{tot}} \quad (20)$$

En la fracción de sedimentación solo se tiene en cuenta la fracción de separación de sólidos sedimentables. Los componentes no sedimentables se indican con cero. A partir de esto la fracción de tope del separador se determina:

$$fracc_tope_i = \begin{cases} fracc_sedim_i & \text{si } fracc_sedim_i \neq 0 \\ fracc_líq & \text{si } fracc_sedim_i = 0 \end{cases} \quad (21)$$

El modelo correspondiente al sedimentador se encuentra en el anexo 7.

3.3 Ajuste del caso base

Para la comprobación de que el modelo obtenido se adecua a la realidad es necesario realizar simulaciones del proceso partiendo de datos reales del afluente de la planta, disponibles en la instalación. Esto se realiza mediante el análisis comparativo de los

resultados experimentales contra los simulados, usando como criterio de comparación las siguientes variables:

- Demanda Biológica de Oxígeno (DBO₅)
- Dióxido de carbono (CO₂)
- Agua (H₂O)
- Amoníaco (NH₃)
- Sólidos disueltos totales (SDT)
- Sólidos suspendidos fijos (SSF)
- Sólidos suspendidos volátiles heterogéneos (SSVH)
- Sólidos suspendidos volátiles inertes (SSVI)

Para ello se realiza un análisis tabulado de los datos simulados en el software ASCEND y datos reales del proceso de lodos activados, como se muestra en las tablas 3.1 a 3.4.

Tabla 3.1 Salida del mezclador de corrientes

Componentes	Datos simulados	Datos reales	% Error
DBO5	8,00	8,00	0,000
CO2	2,76	2,35	0,170
H2 O	63701,61	63918,22	0,017
NH3	1,62	1,61	0,001
SDT	53,31	53,49	0,003
SSF	38,22	38,22	0,000
SSVH	162,19	164,07	0,011
SSVI	3,72	32,31	0,013
F tot	64000,40	64218,29	0,339

El análisis realizado entre los datos reales y el simulado representan adecuadamente el proceso ya que los errores están por debajo del 1%, estos valores obtenidos mediante la simulación con el software ASCEND, no muestran diferencias de los datos reales.

En el sedimentador se realiza una comparación de los datos simulados que salen por el tope y el fondo con los reales del proceso, como lo muestra la tabla que se expone a continuación

Tabla 3.2 Salidas del Sedimentador

Comp.	Corriente de tope			Corriente de fondo		
	Datos simulados	Datos reales	% Error	Datos simulados	Datos reales	% Error
DBO5	$1,66 \cdot 10^{-30}$	0,000	0,00	$1,66 \cdot 10^{-30}$	0,000	0,00
CO2	0,3550	0,39795	0,10	0,6567	0,2310	0,34
H2O	40455,1	40443,39	0,00	23253,7	23481,959	0,0097
NH3	0,6575	0,6472	0,74	0,3779	0,3758	0,0057
SDT	33,8541	33,8442	0,72	19,4595	19,6505	0,012
SSF	0,38223	0,3822	0,98	37,8408	37,8407	0,00
SSVH	0,8315	0,8414	0,99	165,471	167,4486	0,011
SSVI	0,8343	0,8232	0,97	32,5407	32,1067	0,014
F tot	40491,6	40480,33	0,03	23510	23739,61	0,967

Al igual que en los de más equipos que se muestran que componen la planta para llevar a cabo el proceso de lodos activados se realiza una comparación de los datos simulados que son expulsados por la corriente 1 y 2 con reales como lo muestra la siguiente tabla :

Tabla 3.3 Salidas del separador de corrientes

Comp.	Corriente 1			Corriente 2		
	Datos simulados	Datos reales	% Error	Datos simulados	Datos reales	% Error
DBO5	$1,44 \cdot 10^{-20}$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CO2	0,6239	0,2195	0,64	0,03283	0,01155	0,66
H2O	22091	22307,641	0,0097	1162,69	1174,08641	0,0097
NH3	0,3590	0,35700	0,0058	0,018898	0,01879	0,0057

SDT	18,4865	18,6677	0,0097	0,9729	0,9825	0,0099
SSF	35,9488	35,9487	0,00	1,89204	1,8920	0,0097
SSVH	157,198	159,0755	0,012	8,2736	8,3724	0,012
SSVI	30,9137	30,4998	0,014	1,6270	1,6052	0,013
F tot	22334,5	22552,4	0,966	1175,5	1186,969	0,885

Tabla 3.4 Salida del Reactor Biológico

Componentes	Datos simulados	Datos reales	% Error
DBO5	0,00	0,00	0,00
CO2	0,656	0,629	0,04
H2 O	63708,800	63925,350	0,0033
NH3	1,035	1,023	0,011
SDT	53,313	53,434	0,0022
SSF	38,223	38,222	0,00
SSVH	166,304	168,290	0,011
SSVI	33,375	32,920	0,015
F tot	64001,700	64219,949	0,0033

En estas tablas se puede observar que no hay cambio significativo de los datos simulados y los datos reales del proceso ya que el error que se puede observar está por debajo del 1%.

El análisis de las tablas anteriores permite corroborar de que el modelo matemático representa adecuadamente el proceso de lodos activados de la planta depuradora en estudio ya que existe similitud entre los resultados obtenidos con el modelo y el obtenido experimentalmente, esto es indicativo de que se ha logrado una adecuada representación matemática del sistema investigado. De forma general se tiene que para la mayoría de las variables y en ellas, la mayoría de las corridas se observan errores inferiores a un 1% entre el valor real y el valor obtenido a través de la simulación, además es un

comportamiento típico que en la medida que los valores de las variables en el afluente se alejen de los valores promedios, los errores obtenidos sean mayores.

3.1 Análisis de sensibilidad

Este análisis es fundamental en la validación de un modelo y se realiza con el objetivo de conocer la sensibilidad de la respuesta del modelo a los cambios de los parámetros que conforman el mismo. Para ello se varían los parámetros dentro del intervalo de interés, se observa la respuesta del modelo y a partir de esto se obtiene información acerca de la representación que realiza el mismo del fenómeno real y /o sobre la interacción de los factores en el sistema.

Para el análisis de sensibilidad del modelo se seleccionaron los siguientes parámetros en el flujo de agua clarificada a la salida de la planta:

- Demanda Biológica de Oxígeno (DBO₅)
- Agua (H₂O)
- Amoníaco (NH₃)
- Sólidos disueltos totales (SDT)
- Sólidos suspendidos fijos (SSF)
- Sólidos suspendidos volátiles heterogéneos (SSVH)
- Sólidos suspendidos volátiles inertes (SSVI)

Se seleccionan estas variables por ser las que más informaciones brindan para cumplimentar los objetivos propuestos.

3.4.1 Diseño experimental 3^k

Para describir el comportamiento de estos parámetros se propone un diseño experimental de optimización, del tipo *factorial completo a 3 niveles*. Este diseño garantiza, mediante un modelo cuadrático, el posible efecto de curvatura que puedan tener estos parámetros en la región estudiada.

Se seleccionaron, como los factores que más pueden influir sobre los parámetros de respuesta, la **DBO₅ en la corriente de entrada** y la **fracción de purga de lodos** a la salida del sedimentador (k=2). Este criterio está sustentado en los resultados de trabajos precedentes (Martínez y Berrios, 1996; Benítez, Martínez y Junco, 1997; Benítez y Martínez, 2000; Martínez, 2002). Igualmente se reporta en estos estudios el intervalo común en que pueden variar estos factores:

DBO5 entrada entre: 6 y 10 kg / h

Fracción de purga: entre 0.03 y 0.07

Tabla 3.5 Diseño experimental para el análisis de sensibilidad

DBO5	6.0	8.0	10.0	6.0	8.0	10.0	6.0	8.0	10.0
Purga	0.03	0.03	0.03	0.05	0.05	0.05	0.07	0.07	0.07
DBO5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
H2O	40910,8	40912,6	40914,3	40453,4	40455,1	40456,7	40006,2	40007	40009,4
NH3	0,907	0,753	0,592	0,822	0,657	0,493	0,772	0,603	0,433
SDT	34,236	34,236	34,236	33,854	33,854	33,854	33,480	33,480	33,480
SSF	0,527	0,527	0,527	0,382	0,382	0,382	0,286	0,286	0,286
SSVH	1,006	1,171	1,335	0,714	0,831	0,947	0,553	0,644	0,734
SSVI	1,198	1,257	1,317	0,803	0,834	0,865	0,601	0,620	0,639

3.4.2 Análisis de sensibilidad en StatGraphics:

Después de realizar las simulaciones correspondientes a cada experimento se obtuvieron los siguientes resultados.

Sólidos suspendidos volátiles heterótrofos (biomasa activa):

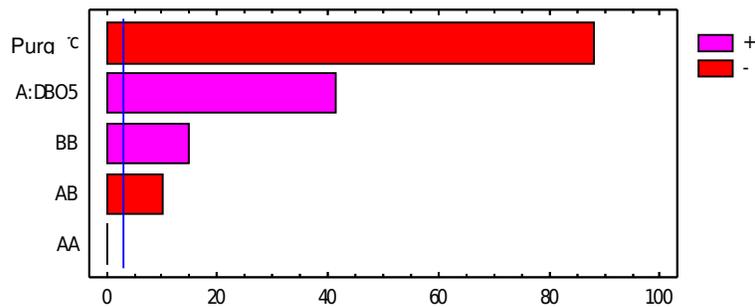


Fig. 3.1 Diagrama de Pareto para SSVH

Como se observa en la figura 3.1, la biomasa activa se ve afectada significativamente por ambos factores. Cuando ocurre un aumento de la DBO5 en la entrada, aumenta la disponibilidad de alimento y con ello aumenta la biomasa. Esta biomasa está formada por sólidos en suspensión, que sedimentan el clarificador. Un aumento en la purga de lodos trae consigo una disminución de todos los sólidos en la salida clarificada del sedimentador. Esto puede observarse en el anexo 14.

Sólidos suspendidos volátiles inertes (biomasa inerte):

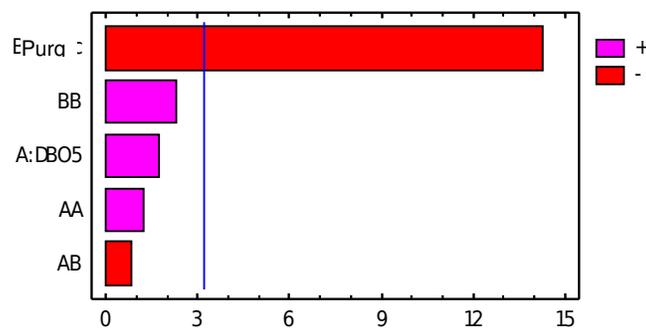


Fig 3.2 Diagrama de Pareto para SSVI

La figura 3.2 muestra como la biomasa de inertes solo se ve disminuida significativamente por un aumento en la purga de lodos, como se prevé que debe ocurrir en el sedimentador. La constante de muerte endógena es mucho menor que la de

crecimiento de la biomasa y por tanto el aumento de la DBO5 en la entrada no produce un aumento significativo en la biomasa inerte. Esto puede observarse en el anexo 9.

Sólidos suspendidos fijos, sólidos disueltos totales y agua:

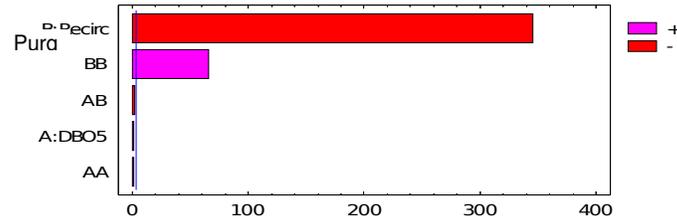


Fig. 3.3 Diagrama de Pareto para SSF

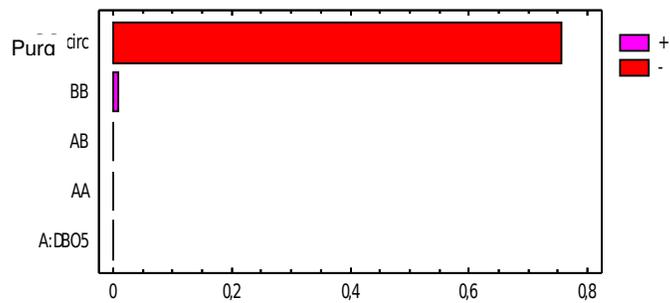


Fig. 3.4 Diagrama de Pareto para SDT

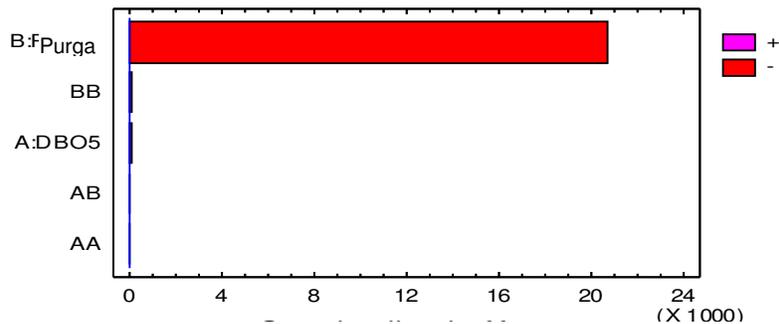


Fig. 3.5 Diagrama de Pareto para H2O

Tanto los sólidos suspendidos fijos (figura 3.3) como los disueltos totales (figura 3.4) son inertes en la reacción. El agua (figura 3.5), aunque se produce como resultado de la oxidación de la materia orgánica, es despreciable con respecto al gran volumen que contiene la corriente de entrada. Por tanto se puede considerar que ninguno de estos

parámetros depende de la concentración de DBO5 en la entrada. La fracción de purga de lodos si es un factor influyente tanto para los sólidos sedimentables como para el agua, con todas las sustancias que esta contenga en disolución. Esta información esta contenida en los anexos 10,11 y 13.

Nitrógeno amoniacal:

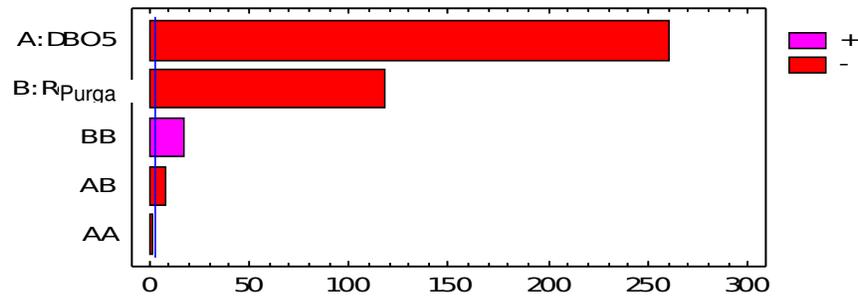


Fig. 3.6 Diagrama de Pareto para NH3

Se observa en la figura 3.6 como el nitrógeno amoniacal (NH_3 y NH_4^-) en la corriente de salida se ve disminuido significativamente por ambos factores. Cuando ocurre un aumento de la DBO5 en la entrada, aumenta la disponibilidad de alimento y con se favorece la reacción. El nitrógeno amoniacal es un reaccionante y por ello se consume en mayor cantidad.

El nitrógeno amoniacal se encuentra disuelto en el agua, por esta razón su comportamiento en el sedimentador debe ser similar al del agua y los sólidos disueltos totales. Es decir, un aumento en la fracción de purga de lodos disminuye la concentración de nitrógeno amoniacal en el agua de salida. Esto puede observarse en el anexo 12.

Demanda Biológica de Oxígeno (materia orgánica):

Como se observa en la tabla 3.5, la DBO5 en la corriente de salida es eliminada totalmente durante la reacción, para cualquier concentración de este componente en la corriente de entrada y para cualquier fracción de purga de lodos. Esto se debe al gran tiempo de residencia del agua dentro del reactor (aproximadamente 5 horas). Con un

tiempo de residencia de solo 20 minutos aproximadamente se logra el 100% de conversión. En la planta se utilizan tiempos de residencia mucho mayores para garantizar otras reacciones que no se tuvieron en cuenta en el modelo (nitrificación, remoción de fósforo, etc).

3.4 Valoración económica de los resultados

El análisis de sensibilidad realizado demuestra que la calidad del agua en la corriente de salida no se afecta cuando se aumenta la fracción de lodo purgado, pues en todos los casos un aumento del lodo purgado disminuye los índices de contaminación del agua (NH_3 , SSV, SSF, SDT) o no los varían (DBO_5).

Por otra parte en estudios anteriores (Díaz, 2008) ha sido determinado, de manera desglosada, el consumo de electricidad en la planta de tratamiento de agua de Sol Palmeras. En la tabla 3.6 y en el gráfico 3.8 se muestran estos resultados

Tabla 3.6 Desglose de los costos de energía eléctrica para la planta en estudio.

Equipos eléctricos	Cantidad	Consumo (kw/h)	Horas de operación	Energía consumida (kw/d)	Costo \$/año
Soplador1 del reactor	1	18	24	432	14191,200
Soplador2 del reactor	1	17,3	24	415.2	13639,320
Puente del sedimentador	1	0,22	24	5,28	173,448
Bomba de recirculación	2	1,5	24	72	2365,200
Puente espesador de lodos	1	0,63	24	15,12	496,692

Reproducido de Díaz (2008)

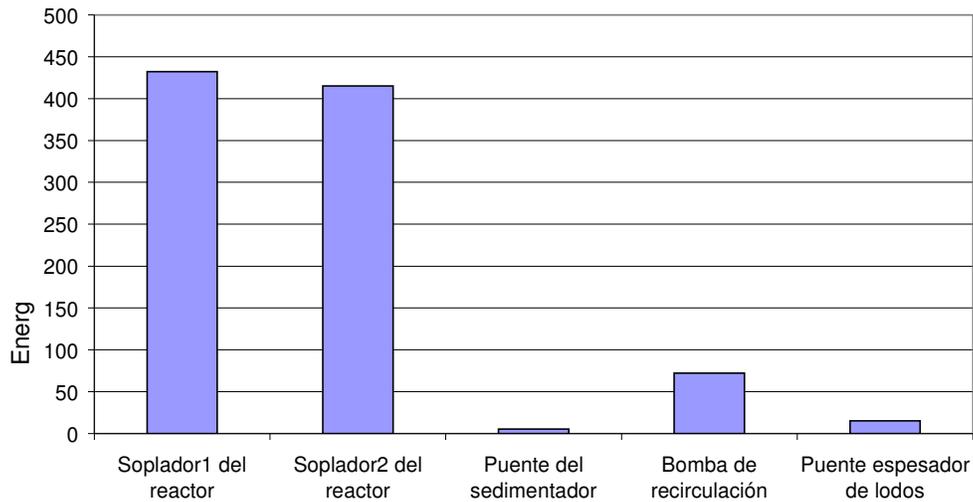


Figura 3.8 Índices de costos por concepto de energía eléctrica

De este estudio se puede concluir que la bomba de recirculación de lodos es el segundo equipo, después de los sopladores del biorreactor, que más energía eléctrica consume.

Actualmente la recirculación de lodos se realiza mediante dos bombas que operan simultáneamente. Sin embargo, cuando se realiza una purga de 7% el caudal de lodo a recircular puede ser operado con una sola de las bombas. En este caso el costo de bombeo se reduce a la mitad y se alarga la vida útil de las bombas, ya que mientras una opera, la otra permanece apagada o en mantenimiento.

Tabla 3.9 Análisis económico

Purga de lodos	Número de bombas	Consumo unitario (kW/h)	Consumo anual (kW/año)	Costo de operación (\$/año)	Vida útil (años)	Inversión inicial (\$)	Amort. (\$/año)	Costo total (\$/año)
3% - 5%	2	1,5	26280	2365,20	10	10000	1000,00	3365,20
7%	1	1,5	13140	1182,60	18	10000	555,55	1738,16

En la tabla 3.9 se resume el análisis económico realizado a los equipos de bombeo para la recirculación de lodos. La diferencia que existe al usar una bomba o dos respectivamente es \$1627. Este es el ahorro económico que implicaría aumentar la purga de lodos hasta un 7%.

Sin embargo, este ahorro es un valor preliminar, pues en este trabajo no se han tenido en cuenta otras implicaciones tecnológicas tales como la capacidad del digestor de lodo y de los lechos de secado; la eficiencia de los procesos de nitrificación y de remoción de fósforo; entre otros.

3.5 Conclusiones parciales del capítulo

1. Se obtuvo el modelo que describe el proceso de lodos activados de la Estación Depuradora de Aguas Residuales analizada.
2. Existe buena correspondencia entre los valores experimentales y los obtenidos por el modelo, así como una sensibilidad adecuada del modelo a los cambios realizados en las variables investigadas, por lo que puede establecerse que el modelo representa adecuadamente al proceso estudiado.
3. Al realizar la valoración económica arrojó como resultado que las bombas de la recirculación son los equipos que más consume energía eléctrica, después de los sopladores.

Nomenclatura:

μ_d	Velocidad de muerte endógena
f_i	Flujo de cada componente
X_H	Concentración de biomasa heterótrofa
X_I	Concentración de biomasa inerte

ρ_{TOT}	Densidad del lodo en el sedimentador
f_{tot}	Flujo total
X	Concentración másica de biomasa
S	Concentración másica de sustrato
f-lim	Flujo limitante
f_biomasa	Flujo de biomasa
f_sustrato	Flujo de sustrato
s_degrad	Sustrato degradado
x_muerto	Biomasa muerta
conv	Fracción de conversión
conv_X	Sustrato convertido a biomasa
f_solido	Flujo de sólidos
Θ	Tiempo de residencia
yi	Fracción de cada componente

Conclusiones

1. Se implementó el modelo ASM 1 de la IAWQ para el proceso de lodos activados Sol Palmera en el simulador ASCEND IV, con un error menor del 1% en las variables estudiadas para el caso base.
2. El análisis de sensibilidad demostró que la fracción de purga es el factor más significativo en el estudio simulado. Se comprobó que un aumento de este factor provoca una disminución en los parámetros que son índices de la contaminación del agua.
3. Durante el análisis de sensibilidad se comprobó que elevando la fracción de lodo purgado hasta un 7%, el reciclaje puede realizarse mediante el uso de una sola bomba; siendo esta la mejor alternativa y también la más factible, debido a que no involucra una inversión y conlleva a un menor consumo de electricidad.
4. El análisis económico demostró que el ahorro que se logra con el uso de una bomba en lugar de dos es aproximadamente de \$1600 al año.

Recomendaciones

1. Continuar desarrollando librerías específicas para ASCEND que permitan simular otros procesos de tratamiento de agua residuales.
2. Extender el estudio realizado al resto de las EDARs ubicada en el Polo Turístico de Varadero.

Bibliografía

1. ALFARO, W,1997.Simulación de procesos .[accedido:22-01-09] disponible en: www.imp.com, www.stmecnica.com
2. ASCEND wesity,2007,The Ascend Project at Carnegie Mellon University [accedido: 14-01-09].Disponible en : <http://ascend.cheme.cmu.edu>
3. BAETENS, D. 2001. Enhanced biological phosphorus removal: modelling and experimental design. Thesis for the degree of Doctor in Applied Biological Sciences [on-line].Ghent University, Belgium. 261 p. Disponible en el World Wide Web:<<http://biomath.rug.ac.be/> >.
4. BENITEZ, A. y MARTINEZ, Y. 2000. Descripción matemática y simulación de sistemas de lodos activados para el tratamiento de aguas residuales, Avanzada Científica [on-line], enero/abril del 2000, vol. 3, no. 1. Disponible en el World WideWeb:<http://www.atenas.inf.cu/publicaciones/avan_cientif/num7/artic_w95.html >. ISSN 1029-3450.
5. BENITEZ, A. y MARTINEZ, Y. 2001. Software para el diseño y evaluación de EDARs. En Memorias de COMAT-2001 [CD-ROM]. Universidad de Matanzas. ISBN 959-160098-4.
6. BENITEZ, A. y MARTINEZ, Y. 2002 (c). Valoración ecológica y económica de las aguas residuales procedentes del polo turístico de Varadero. En Memorias del V Taller Internacional Ecología y Desarrollo [CD-ROM]. Universidad de Matanzas. ISBN 959-16-0162-X.
7. BENITEZ, A., MARTINEZ, Y. y JUNCO, JZ. 1997. Fill: Un software a favor del medio ambiente. En Memorias de COMAT-97 [CD-ROM]. Universidad de Matanzas. ISBN 959-160097-6.
8. BUNGAY, HR. y HUMPHREY, AE. 1997. Biochemical Engineering. En PERRY, RH. GREEN, DW. y MALONEY, JO., Perry's Chemical Engineer's Handbook. 7ma ed .New York: McGraw-Hill. Sección 24. ISBN 0-07-049841-5.

9. CARVALHO, G. y NOVAIS JM. 2002. Optimal operation for timely adaptation of activated sludge plants to changes in the surfactant composition of wastewater. *Wat. Sci. Tech.*, (en prensa).
10. CITMA. 1995. Cuba: datos e informaciones sobre medio ambiente y desarrollo. La Habana: Agencia de Medio Ambiente. Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente. 20 p.
11. DIAZ, M. 1997. Tratamiento de residuales por sistemas naturales. En *Monografías para la Maestría de Ingeniería en Saneamiento Ambiental*. La Habana: ISPJAE-CIPRO. 30 p.
12. Díaz A ,2008 .Propuesta de alternativas operacionales para la eliminación biológica de nutrientes en la planta de lodos activados de Tryp Península. Trabajo de diploma presentado como requisito parcial para optar por el título de ingeniero químico.Matanzas.2008.129p.
13. DOLD, PL. y EKAMA, GA. 1980. A general model for the activated sludge process. *Prog. Wat. Tech.*, vol. 12, no. 6, p. 47-77.
14. EPPSSON, U. 1999. A general description of the IAWQ activated sludge model no.1.Lund Institute of Technology, Sweden.
15. FELIU, JA, 2005 .Ambientes integrados de simulación, *Ingeniería Química*, NUM 426, páginas 93-96.
16. FRONTEAU, C. 1997. Integrated modelling: comparison of state variables, processes and parameters in sewer and waste water treatment models. En: *Proceedings 2 IAWQ Conference on the Sewer as a physical, chemical and biological reactor*. Aalborg, Denmark, May 26-28 1997. p. 8.
17. GARCIA, J; ALONSO, V, CRUZ, L. 2000 *Metodología y técnicas para la investigación*.
18. GERNAEY, K. y PETERSEN, B. 2000. Application of dynamic models (ASM1) and simulation to minimize renovation costs of a municipal activated sludge wastewater treatments plant. En: *Proceedings 1 World Congress of the International Water Association*. Paris, France, July 3-7 2000.
19. GERNAEY, K. y PETERSEN, B. 2001. Model-based interpretation of titrimetric data to estimate aerobic carbon source degradation kinetics. En: *Proceedings 8 IFAC*

- Conference on Computer Applications in Biotechnology. Québec, Canada, June 24-27 2001. P.263-268.
20. GONZALEZ, A. y MORENO, G. 1998. Dinámica de poblaciones en un proceso de lodos activados durante la aclimatación a compuestos fenólicos. En Memorias del XXV Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental - AIDIS [CD-ROM]. Ciudad de México, 1998.
 21. GILLOT, S y CLERCQ, BD. 1999. Optimization of wastewater treatment plant design and nd operation using simulation and cost analysis. En: Proceedings 72 Annual WEF Conference and Exposition [CD-ROM]. New Orleans, USA, October 9-13 1999.
 22. GRIJSPEERDT, K. y VANROLLEGHEM, PA. 1999. Estimating the parameters of the Baranyi-model for bacterial growth. En: Proceedings 9 European Congress on Biotechnology. Brussels, Belgium, July 11-15 1999.
 23. HENZE, M. 1995. Activated sludge model no.2. En IAWQ scientific and technical reports no. 3. London.
 24. JUNCO, J.Z. 2002. Diagnósis ambiental y tratamiento de efluentes urbanos e industriales. Curso que aporta créditos al Doctorado Gestión Ambiental y Desarrollo Sostenible. Cuba: Universidad de Matanzas. Mayo, 13-17. 2002
 25. KOPS, S. 2000. The process of model building and simulation of ill-defined systems: application to wastewater treatment. Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems, vol. 5, p. 298-312.
 26. KUBA, T. 1997. Kinetics and stoichiometry in the biological phosphorus removal process with short cycle time, Wat. Res., vol. 31, no. 4, p. 918-928.
 27. MARTINEZ, Y. 1998. Caracterización físico - química del efluente de una EDAR por lodos activados. Tesis de Diplomado en Evaluación de Impacto Ambiental. ISPJAE, Ciudad de La Habana. 58 p.
 28. MARTINEZ, Y. y BERRIOS, F. 1996. Propuesta de sistema de tratamiento de aguas albañales para zonas turísticas. Trabajo de Diploma en Ingeniería Química. Universidad de Matanzas. 45 p.
 29. MARTINEZ, Y., BENITEZ, A. y DOMINGUEZ, F. 2002. Evaluación de una EDAR por lodos activados. En Memorias del V Taller Internacional Ecología y Desarrollo [CD-ROM]. Universidad de Matanzas. ISBN 959-16-0162-X.

30. MARTINEZ, Y. 2002. Estudio de variantes operacionales para el mejoramiento de la calidad de efluentes de EDARs a través de la simulación matemática. Tesis en opción al título académico de “Máster en Control y Tratamiento de la Contaminación Ambiental”.Universidad de Matanzas, Cuba. 156 p.
31. METCALF & EDDY 1996. Ingeniería de aguas residuales: tratamiento, vertido y reutilización. 3ra ed. Madrid: McGraw-Hill. 1485 p. ISBN 84-481-1607-0.
32. QASIM, SR. 1994. Wastewater Treatment Plants: Planning, Design and Operation.Switzerland: Technomic Publishing, 725 p.
33. RAMALHO, RS. 1996. Tratamiento de aguas residuales. 2da ed. Barcelona : Reverté.705 p. ISBN 84-291-7975-5.
34. SEOANEZ, M. 1999. Aguas residuales urbanas: tratamientos naturales de bajo costo y aprovechamiento. 2da ed. Madrid: Mundi-Prensa. 368 p. ISBN 84-7114-798-X.
35. SOLUCIONES AMBIENTALES, 2007. Sistema d tratamiento de aguas residual es por lodos activados[accedido 4-02-09].disponible en : www.enziclean.com/articulos/
36. THABET, M. 1998. Evaluación de una planta de tratamiento de aguas residuales por lodos activados. Trabajo de Diploma en Ingeniería Química. Universidad de Matanzas. 47p.
37. THEODORE, L. y BUONICORE, AJ. 1997. Waste Management. . En PERRY, RH.GREEN, DW. y MALONEY, JO.,Perry's Chemical Engineer's Handbook. 7ma ed.New York : McGraw-Hill. Sección 25. ISB 0-07-049841-5.
38. VANROLLEGHEM, PA. 2000 (b). The use of models in advanced WWTP control. Not only model - based predictive control. In: Proceedings TI-KVIV Studiedag Geavanceerde Control etechnieken in de Waterzuivering. Gent, Belgium, October 25 2000. 25 p.
39. LINDBERG, CF. 1997. Control and estimation strategies applied to the activated sludge process. Thesis for the Degree of Doctor of Philosophy in Automatic Control [on-line]. Uppsala University, Sweden. 214 p. ISBN 91-506-1202-6. Disponible en el World Wide Web: <<http://www.syscon.uu.se/Staff/CFL/PhD.pdf>>.
40. VANWELDEN, DF. 2000. Induction of predictive models for dynamical systems via data mining. Thesis for the degree of Doctor in Applied Biological Sciences [on-line].Ghent University, Belgium. 271 p. Disponible en el World Wide Web: <<http://biomath.rug.ac.be/>>.

Anexo # 1: Modelo de composición

MODEL composition;

```
Components      IS_A set OF symbol_constant;  
  y [components]      IS_A fraction;  
  
  SUM[y[i] | i IN components] = 1.0;
```

METHODS

```
METHOD clear;  
  y[components].fixed := FALSE;  
END clear;  
  
METHOD specify;  
  y[components].fixed := TRUE;  
  y[CHOICE[components]].fixed := FALSE;  
END specify;  
  
METHOD reset;  
  RUN clear;  
  RUN specify;  
END reset;
```

END composition;

Anexos # 2: Modelo de corrientes

```
MODEL stream;
  components                IS_A set OF symbol_constant;
  state                    IS_A composition;
  Ftot,f[components]      IS_A mass_rate;

  Components, state. Components ARE_THE_SAME;
  FOR i IN components CREATE
    f[i] = Ftot * state.y[i];
  END FOR;
METHODS
  METHOD clear;
  RUN state.clear;
  Ftot.fixed                := FALSE;
  f[components].fixed      := FALSE;
  END clear;
METHOD seqmod;
  RUN state.specify;
  state.y [components].fixed := FALSE;
  END seqmod;
METHOD specify;
  RUN seqmod;
  f[components].fixed       := TRUE;
  END specify;
METHOD reset;
  RUN clear;
  RUN specify;
  END reset;
METHOD scale;
  FOR i IN components DO
    f[i].nominal := f[i] + 0.00001 {kg/hr};
  END FOR;
  Ftot.nominal := Ftot + 0.00001 {kg/hr};
  END scale;

END stream;
```

Anexo # 3 Modelo del mezclador de corrientes

```
MODEL mixer;
  n_inputs          IS_A  integer_constant;
  feed[1..n_inputs], out  IS_A  stream;

  feed[1..n_inputs].components, out.components  ARE_THE_SAME;

  FOR i IN out.components CREATE
    cmb[i]: out.f[i] = SUM[feed[1..n_inputs].f[i]];
  END FOR;

METHODS

METHOD clear;
  RUN feed[1..n_inputs].clear;
  RUN out.clear;
END clear;

METHOD seqmod;
END seqmod;

METHOD specify;
  RUN seqmod;
  RUN feed[1..n_inputs].specify;
END specify;

METHOD reset;
  RUN clear;
  RUN specify;
END reset;

METHOD scale;
  RUN feed[1..n_inputs].scale;
  RUN out. scale;
END scale;

END mixer;
```

Anexo # 4 Modelo del separador de componentes

```
MODEL separator;
```

```
    feed, out_top, out_bottom          IS_A  stream;
    top_fraction[feed.components]      IS_A  real_constant;

    feed.components,    out_top.components,    out_bottom.components
    ARE_THE_SAME;

    FOR i IN feed.components CREATE
        out_top.f[i] = feed.f[i] * top_fraction[i];
        out_bottom.f[i] = feed.f[i] - out_top.f[i];
    END FOR;
```

```
METHODS
```

```
    METHOD clear;
        RUN feed.clear;
        RUN out_top.clear;
        RUN out_bottom.clear;
        top_fraction [feed.components].fixed      :=    FALSE;
    END clear;
```

```
    METHOD seqmod;
        top_fraction[feed.components].fixed :=    TRUE;
    END seqmod;
```

```
    METHOD specify;
        RUN seqmod;
        RUN feed.specify;
    END specify;
```

```
    METHOD reset;
        RUN clear;
        RUN specify;
    END reset;
    METHOD scale;
```

```
RUN feed.scale;  
RUN out_top.scale;  
RUN out_bottom.scale;  
END scale;
```

```
END separator;
```

Anexo # 5 Modelo del divisor de corrientes.

```
MODEL splitter;
  n_outputs          IS_A integer_constant;
  feed, out[1..n_outputs] IS_A stream;
  split[1..n_outputs] IS_A real_constant;

  feed.components, out[1..n_outputs].components ARE_THE_SAME;
  feed.state,
  out[1..n_outputs].state ARE_THE_SAME;

  FOR i IN [1..n_outputs] CREATE
    out[i].Ftot = split[i] * feed.Ftot;
  END FOR;
METHODS
  METHOD clear;
    RUN feed.clear;
    RUN out[1..n_outputs].clear;
    split[1..n_outputs].fixed := FALSE;
  END clear;
  METHOD seqmod;
    split[1..n_outputs].fixed := TRUE;
  END seqmod;
  METHOD specify;
    RUN seqmod;
    RUN feed.specify;
  END specify;
  METHOD reset;
    RUN clear;
    RUN specify;
  END reset;
  METHOD scale;
    RUN feed.scale;
    RUN out[1..n_outputs].scale;
  END scale;
END splitter;
```

Anexo # 6 Modelo del reactor

```
MODEL reactor;
    feed, out                IS_A  stream;
    feed.components, out.components  ARE_THE_SAME;
    conversion                IS_A  fraction;
    stoich_coef[feed.components] IS_A  real_constant;
    reference_comp            IS_A  symbol_constant;
FOR i IN feed.components CREATE
    out.f[i]=feed.f[i]+feed.f[reference_comp]*stoich_coef[i]*conversion;
END FOR;
METHODS
METHOD clear;
    RUN feed.clear;
    RUN out.clear;
    conversion.fixed          :=    FALSE;
    stoich_coef[feed.components].fixed :=    FALSE;
    reference_comp.fixed      :=    FALSE;
END clear;
METHOD seqmod;
    stoich_coef[feed.components].fixed :=    TRUE;
    reference_comp.fixed              :=    TRUE;
END seqmod;
METHOD specify;
    RUN seqmod;
    RUN feed.specify;
END specify;
    METHOD reset;
    RUN clear;
    RUN specify;
END reset;

METHOD scale;
    RUN feed.scale;
    RUN out.scale;
    conversion.nominal := conversion.nominal + 0.00001;
END scale;
END reactor;
```

Anexo # 7: Modelo refinado para el sedimentador

(* modelo refinado para el espesador *)

MODEL sedimentator REFINES separator; END sedimentator;

MODEL thickener;

(* operaciones y procesos unitarios *)

```
z_sedimentator                IS_A    sedimentator;
feed, clear_out, sludge_out    IS_A    stream;
particle_removal[feed.components] IS_A    real_constant;

z_sedimentator.feed, feed      ARE_THE_SAME;
z_sedimentator.out_top, sludge_out ARE_THE_SAME;
z_sedimentator.out_bottom, clear_out ARE_THE_SAME;
```

```
FOR i IN water_feed.components CREATE
  z_biodgas.top_fraction[i], particle_removal[i] ARE_THE_SAME;
END FOR;
```

METHODS

```
METHOD clear;
  RUN z_biodgas.clear;
END clear;
METHOD seqmod;
  RUN z_biodgas.seqmod;
END seqmod;
METHOD specify;
  RUN seqmod;
END specify;
METHOD reset;
  RUN clear;
  RUN specify;
END reset;
METHOD scale;
  RUN z_biodgas.scale;
END scale;
```

END thickener;

Anexo # 8 Modelo refinado para lodos activados

(* modelos refinados para el lodo activado *)

```
MODEL biomix  REFINES mixer;    END biomix;
MODEL biodegrd REFINES reactor; END biodegrd;
MODEL biodecay REFINES reactor; END biodecay;
MODEL biodgas  REFINES separator; END biodgas;
```

MODEL aerobicssludge;

(*

```

* * * * *
*                                     *   gas_out
*                                     ----->
*   ---          -----          |   *
water_feed *   /   \   | biodegrd |   /   \   *
----->| mix |---->|   &   |---->|dgs| *
*   \   /   | biodecay |   \ /   *
*   ---          -----          |   *   water_out
*   ^                                     ----->
gas_feed  *   |                                     *
-----
*                                     *
* * * * *

```

*)

(* operaciones y procesos unitarios *)

```
z_biomix          IS_A biomix;
z_biomix.n_inputs := 2;
z_biodegrd        IS_A biodegrd;
z_biodecay        IS_A biodecay;
z_biodgas         IS_A  biodgas;
```

(* diagrama de flujo *)

```
z_biomix.out, z_biodegrd.feed      ARE_THE_SAME;
z_biodegrd.out, z_biodecay.feed    ARE_THE_SAME;
```

```

z_biodecay.out, z_biodgas.feed      ARE_THE_SAME;
  water_feed, water_out             IS_A  stream;
  gas_feed, gas_out                 IS_A  stream;
stoich_biodegrd[water_feed.components] IS_A  real_constant;
  stoich_biodecay[water_feed.components] IS_A  real_constant;
  substrate_comp, biomass_comp      IS_A  symbol_constant;
  emission[water_feed.components]  IS_A  real_constant;
S, X, Ks, S_conv, X_dec             IS_A  mass_density;
mu_max, kd                          IS_A  frequency;
residence_time                      IS_A  time;

z_biomix.feed[1], water_feed        ARE_THE_SAME;
z_biomix.feed[2], gas_feed          ARE_THE_SAME;
z_biodegrd.reference_comp, substrate_comp ARE_THE_SAME;
z_biodecay.reference_comp, biomass_comp ARE_THE_SAME;
z_biodgas.out_top, gas_out          ARE_THE_SAME;
z_biodgas.out_bottom, water_out     ARE_THE_SAME;

FOR i IN water_feed.components CREATE
  z_biodegrd.stoich_coef[i], stoich_biodegrd[i] ARE_THE_SAME;
  z_biodecay.stoich_coef[i], stoich_biodecay[i] ARE_THE_SAME;
  z_biodgas.top_fraction[i], emission[i]      ARE_THE_SAME;
END FOR;

S = (water_feed.f[substrate_comp] / water_feed.Ftot) * 1e3 {kg/m^3};
X = (water_feed.f[biomass_comp] / water_feed.Ftot) * 1e3 {kg/m^3};
S_conv = mu_max * S * X / (Ks + S) * residence_time;
X_dec = kd * X * residence_time;

degrd_calc: z_biodegrd.conversion = S_conv / S;
degrd_cons: z_biodegrd.conversion = 1;
bool1, bool2, bool3      IS_A  boolean_var;
CONDITIONAL
  cond1: S_conv >= S;
  cond2: S_conv <= 0;
  cond3: S <= 0;
END CONDITIONAL;
bool1 == SATISFIED(cond1, 1e-09{kg/m^3});
bool2 == SATISFIED(cond2, 1e-03{kg/m^3});
bool3 == SATISFIED(cond3, 1e-03{kg/m^3});

```

```

WHEN (bool1, bool2, bool3)
  CASE FALSE, FALSE, FALSE:
    USE degrd_calc;
  OTHERWISE:
    USE degrd_cons;
END WHEN;
z_biodecay.conversion = X_dec / X;
METHODS
  METHOD clear;
    Ks.fixed           := FALSE;
    mu_max.fixed       := FALSE;
    kd.fixed           := FALSE;
    residence_time.fixed := FALSE;
    RUN z_biomix.clear;
    RUN z_biodegrd.clear;
    RUN z_biodgas.clear;
  END clear;
  METHOD seqmod;
    Ks.fixed           := TRUE;
    mu_max.fixed       := TRUE;
    kd.fixed           := TRUE;
    residence_time.fixed := TRUE;
    RUN z_biomix.seqmod;
    RUN z_biodegrd.seqmod;
    RUN z_biodgas.seqmod;
  END seqmod;
  METHOD specify;
    RUN seqmod;
  END specify;
  METHOD reset;
    RUN clear;
    RUN specify;
  END reset;
  METHOD scale;
    RUN z_biomix.scale;
    RUN z_biodegrd.scale;
    RUN z_biodgas.scale;
  END scale;
END aerobic_sludge;

```

Anexo # 9 Análisis de la varianza para SSVI

Fuente	Suma de Cuadrados	GL	Cuadrado medio	F-Fisher	Valor P
A:DBO5	0.00770417	1	0.00770417	2.98	0.1828
B:Purga	0.525696	1	0.525696	203.32	0.0007
AA	0.00402006	1	0.00402006	1.55	0.3009
AB	0.00180625	1	0.00180625	0.70	0.4646
BB	0.0138889	1	0.0138889	5.37	0.1033
Error total	0.00775686	3	0.00258562		
<hr/>					
Total (corr.)			0.560872		8

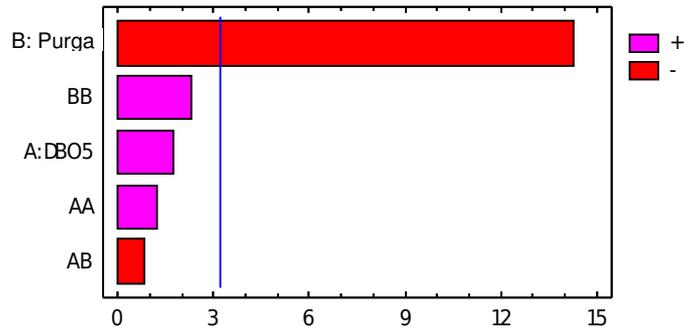
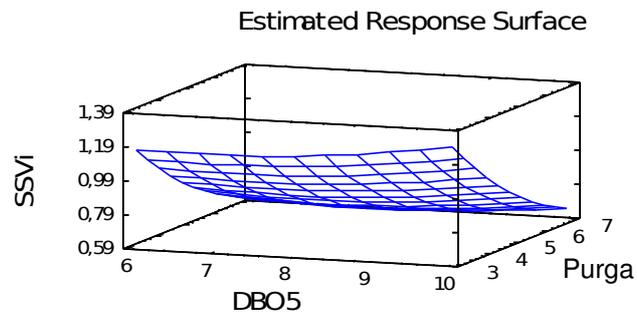
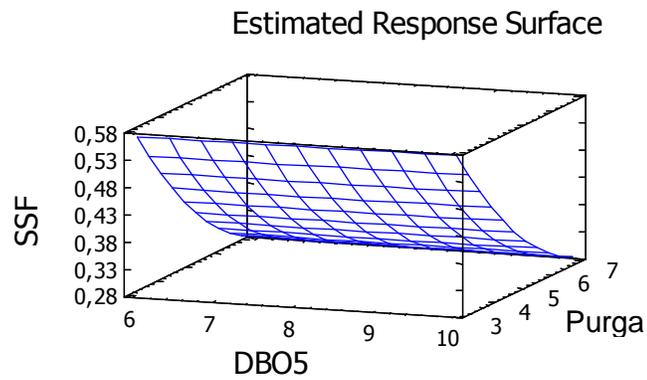
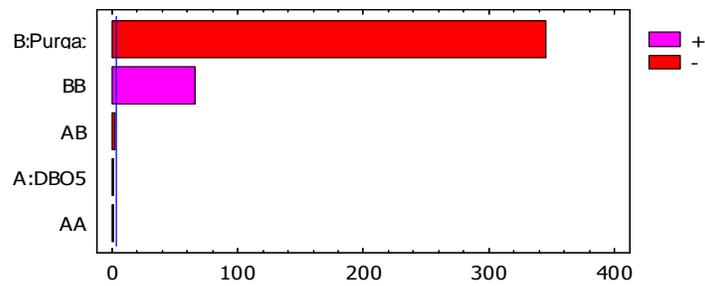


Diagrama de Pareto



ANEXOS # 10: Análisis de Varianza para SSF

Fuente	Suma de Cuadrados	GL	Cuadrado medio	F-Fisher	Valor P
A:DBO5	0,00000266667	1	0,00000266667	2,57	0,2071
B:Recirc	0,123841	1	0,123841	119417,79	0,0000
AA	8,88889E-7	1	8,88889E-7	0,86	0,4228
AB	0,000004	1	0,000004	3,86	0,1443
BB	0,00454422	1	0,00454422	4381,93	0,0000
Total error	0,00000311111	3	0,00000103704		
Total (corr.)	0,128396	8			



ANEXOS 11 : Análisis de varianza para SDT

Fuente	Suma de Cuadrados	GL	Cuadrado medio	F-Fisher	Valor P
A:DBO5	0,0	1	0,0		
B:Recirc	0,857304	1	0,857304		
AA	0,0	1	0,0		
AB	0,0	1	0,0		
BB	0,000032	1	0,000032		
Total error	0,0	3	0,0		
Total (corr.)	0,857336	8			

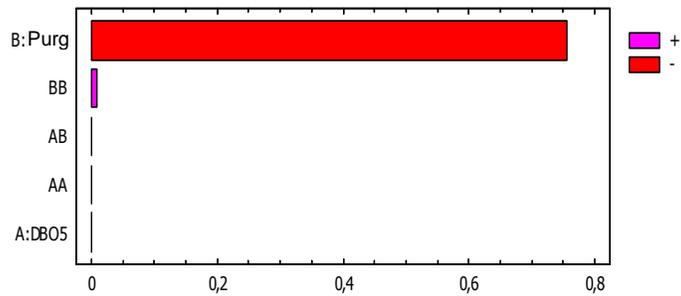
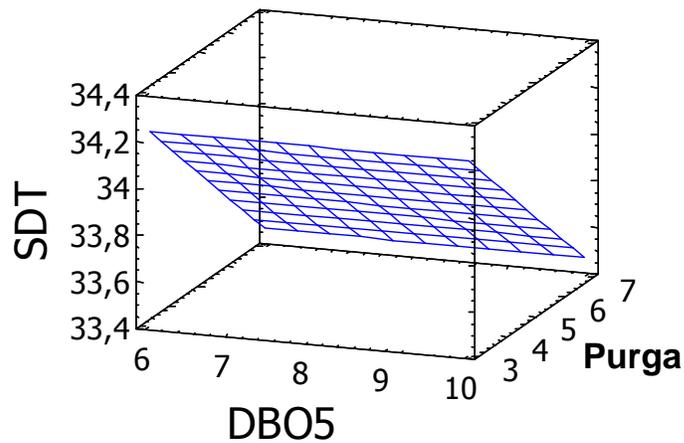


Diagrama de Pareto

Estimated Response Surface



ANEXOS 12: Análisis de la varianza NH3

Fuente	Suma de Cuadrados	GL	Cuadrado medio	F-Fisher	Valor P
A:DBO5	0,161048	1	0,161048	67942,20	0,0000
B:Recirc	0,032856	1	0,032856	13861,12	0,0000
AA	0,00000272222	1	0,00000272222	1,15	0,3624
AB	0,000144	1	0,000144	60,75	0,0044
BB	0,000747556	1	0,000747556	315,37	0,0004
Total error	0,00000711111	3	0,00000237037		

Total (corr.)	0,194806	8			

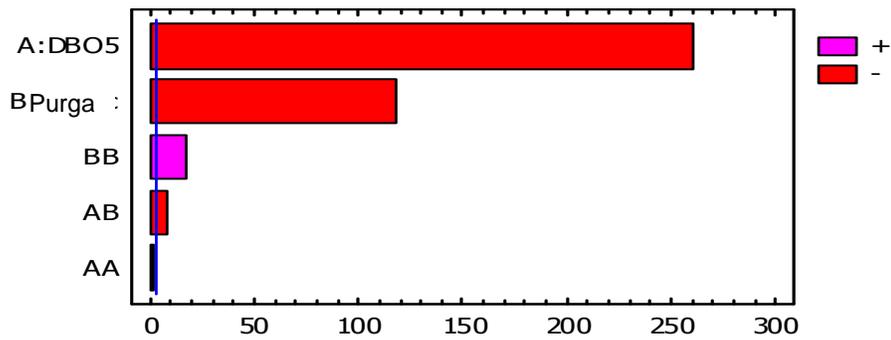
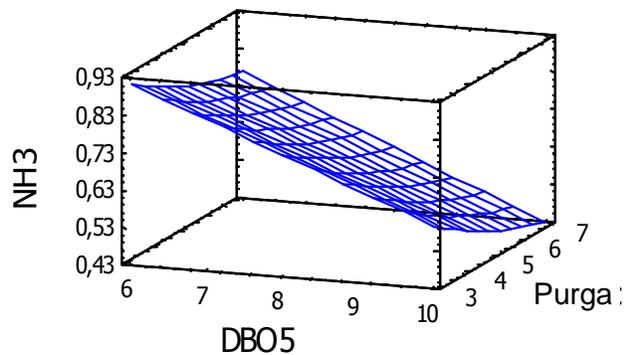


Diagrama de Pareto para NH3

Estimated Response Surface



ANEXOS 13 Análisis de la varianza para H2O

Fuente	Suma de Cuadrados	GL	Cuadrado medio	F-Fisher	Valor P
A:DBO5	16,6667	1	16,6667	5804,93	0,0000
B: purga	1,2279E6	1	1,2279E6	*****	0,0000
AA	0,00888889	1	0,00888889	3,10	0,1767
AB	0,0225	1	0,0225	7,84	0,0679
BB	51,6806	1	51,6806	18000,12	0,0000
Total error	0,00861337	3	0,00287112		

Total (corr.)	0.560872	8			

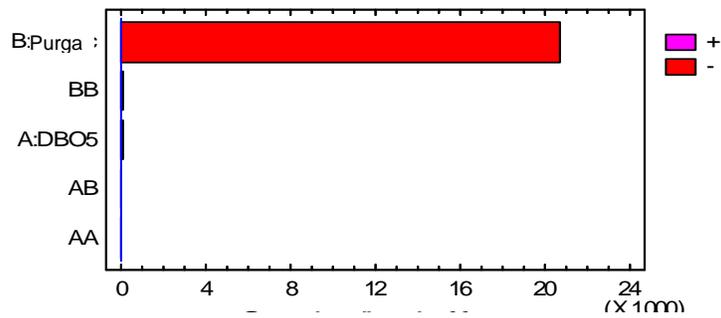
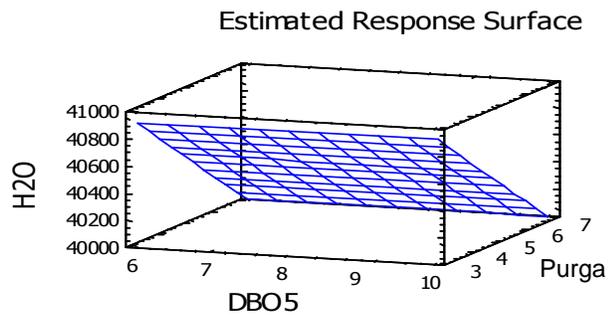


Diagrama de Pareto para H2O



ANEXO14: Análisis de varianza para SSVh

Fuente	Suma de Cuadrados	GL	Cuadrado medio	F-Fisher	Valor P
A:DBO5	0,0920082	1	0,0920082	1710,90	0,0000
B:purga	0,416594	1	0,416594	7746,57	0,0000
AA	5,E-7	1	5,E-7	0,01	0,9293
AB	0,005476	1	0,005476	101,83	0,0021
BB	0,0117045	1	0,0117045	217,65	0,0007
Total error	0,000161333	3	0,0000537778		
Total (corr.)	0,525944	8			

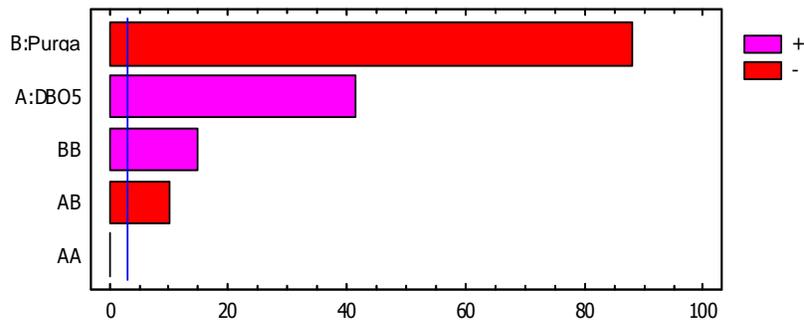
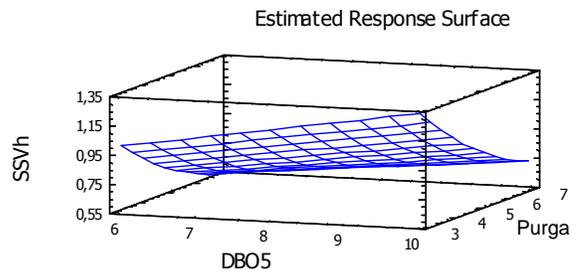


Diagrama de Pareto



(* diagrama de flujo *)

```
mezc.out, lodo.water_feed    ARE_THE_SAME;  
lodo.water_out, sedm.feed    ARE_THE_SAME;  
sedm.out_bottom, recl.feed  ARE_THE_SAME;  
recl.out[1], mezc.feed[2]   ARE_THE_SAME;
```

METHODS

```
METHOD clear;
```

```
  RUN mezc.clear;
```

```
  RUN lodo.clear;
```

```
  RUN dgas.clear;
```

```
  RUN sedm.clear;
```

```
  RUN recl.clear;
```

```
END clear;
```

```
METHOD seqmod;
```

```
  RUN mezc.seqmod;
```

```
  RUN lodo.seqmod;
```

```
  RUN dgas.seqmod;
```

```
  RUN sedm.seqmod;
```

```
  RUN recl.seqmod;
```

```
END seqmod;
```

```
METHOD specify;
```

```
  RUN seqmod;
```

```
  RUN mezc.feed[1].specify;
```

```
  RUN lodo.gas_feed.specify;
```

```
END specify;
```

```
METHOD reset;
```

```
  RUN clear;
```

```
  RUN specify;
```

```
END reset;
```

```
METHOD scale;
```

```
  RUN mezc.scale;
```

```
  RUN lodo.scale;
```

```
  RUN dgas.scale;
```

```
RUN sedm.scale;
RUN recl.scale;
END scale;
```

```
END flowsheet;
```

```
(* ***** *)
```

```
MODEL test_flowsheet REFINES flowsheet;
```

```
mezc.out.components      ::= ['NH3', 'CO2', 'DBO5', 'SSF',
                              'N2', 'O2', 'SDT', 'H2O',
                              'SSVH', 'SSVI'];
```

```
lodo.substrate_comp      ::= 'DBO5';
lodo.biomass_comp        ::= 'SSVH';
```

```
lodo.stoich_biodegrd['NH3']    ::= -0.1;
lodo.stoich_biodegrd['CO2']    ::= 0.9;
lodo.stoich_biodegrd ['DBO5']  ::= -1.0;
lodo.stoich_biodegrd['SSF']    ::= 0.0;
lodo.stoich_biodegrd['N2']    ::= 0.0;
lodo.stoich_biodegrd['O2']    ::= -1.4;
lodo.stoich_biodegrd['SDT']    ::= 0.0;
lodo.stoich_biodegrd['H2O']   ::= 0.8;
lodo.stoich_biodegrd['SSVH']   ::= 0.8;
lodo.stoich_biodegrd['SSVI']  ::= 0.0;
```

```
lodo.stoich_biodecay['NH3']    ::= 0.1;
lodo.stoich_biodecay['CO2']    ::= 1.45;
lodo.stoich_biodecay['DBO5']   ::= 0.0;
lodo.stoich_biodecay['SSF']    ::= 0.0;
lodo.stoich_biodecay['N2']    ::= 0.0;
lodo.stoich_biodecay['O2']    ::= -1.15;
lodo.stoich_biodecay['SDT']    ::= 0.0;
lodo.stoich_biodecay['H2O']   ::= 0.35;
lodo.stoich_biodecay['SSVH']   ::= -1.05;
lodo.stoich_biodecay['SSVI']  ::= 0.3;
```

```

lodo.emission['NH3']      ::= 0.0;
lodo.emission['CO2']      ::= 0.95;
lodo.emission['DBO5']     ::= 0.0;
lodo.emission['SSF']      ::= 0.0;
lodo.emission['N2']       ::= 1.0;
lodo.emission['O2']       ::= 1.0;
lodo.emission['SDT']      ::= 0.0;
lodo.emission['H2O']      ::= 0.0;
lodo.emission['SSVH']     ::= 0.0;
lodo.emission['SSVI']     ::= 0.0;

sedm.top_fraction['NH3']  ::= 0.635;
sedm.top_fraction['CO2']  ::= 0.0;
sedm.top_fraction['DBO5'] ::= 0.635;
sedm.top_fraction['SSF']  ::= 0.01;
sedm.top_fraction['N2']   ::= 0.0;
sedm.top_fraction['O2']   ::= 0.0;
sedm.top_fraction['SDT']  ::= 0.635;
sedm.top_fraction['H2O']  ::= 0.635;
sedm.top_fraction['SSVH'] ::= 0.005;
sedm.top_fraction ['SSVI'] ::= 0.025;

recl.split[1]             ::= 0.95;
recl.split[2]             ::= 0.05;

```

METHODS

METHOD values;

```

mezc.feed[1].f['NH3']    := 1.25793 {kg/hr};
mezc.feed[1].f['CO2']    := 2.13476 {kg/hr};
mezc.feed[1].f['DBO5']   := 8.00358 {kg/hr};
mezc.feed[1].f['SSF']    := 2.27427 {kg/hr};
mezc.feed[1].f['N2']     := 0.0 {kg/hr};
mezc.feed[1].f['O2']     := 0.0 {kg/hr};
mezc.feed[1].f['SDT']    := 34.82712 {kg/hr};
mezc.feed[1].f['H2O']    := 41610.58459 {kg/hr};
mezc.feed[1].f['SSVH']   := 5.00057 {kg/hr};
mezc.feed[1].f['SSVI']   := 1.80475 {kg/hr};

```

```
lodo.gas_feed.f['NH3'] := 0.0 {kg/hr};
lodo.gas_feed.f['CO2'] := 0.0 {kg/hr};
lodo.gas_feed.f['DBO5'] := 0.0 {kg/hr};
lodo.gas_feed.f['SSF'] := 0.0 {kg/hr};
lodo.gas_feed.f['N2'] := 555.93007 {kg/hr};
lodo.gas_feed.f['O2'] := 147.77888 {kg/hr};
lodo.gas_feed.f['SDT'] := 0.0 {kg/hr};
lodo.gas_feed.f['H2O'] := 0.0 {kg/hr};
lodo.gas_feed.f['SSVH'] := 0.0 {kg/hr};
lodo.gas_feed.f['SSVI'] := 0.0 {kg/hr};

lodo.Ks := 60 {mg/l};
lodo.mu_max := 0.208333 {1/hr};
lodo.kd := 0.0025 {1/hr};
lodo.residence_time := 5.193 {hr};
```

END values;

END test_flowsheet;