

**UNIVERSIDAD DE MATANZAS**

**CAMILO CIENFUEGOS**



**FACULTAD DE INGENIERÍAS QUÍMICA – MECÁNICA**

**TÍTULO:** La forma de enseñanza taller en la asignatura Tratamiento de aguas y residuales del currículo del ingeniero químico.

**TRABAJO DE DIPLOMA**

**Autor:** Ilismay Bahamonde Cabrera

**Tutor:** Dr. C Juana Zoila Junco Horta

**Matanzas. Cuba**

**2009**

**Nota de Aceptación.**

---

---

---

---

---

---

---

---

---

Jefe del Tribunal

---

Fecha

---

Miembro del Tribunal

---

Fecha

---

Miembro del Tribunal

---

Fecha

Provincia \_\_\_\_\_ Fecha \_\_\_\_\_ Calificación \_\_\_\_\_

**Declaración de Autoridad.**

Declaro que soy la única autora de este Trabajo de Diploma realizado en la Universidad de Matanzas " Camilo Cienfuegos ", como parte final de los estudios en la especialidad de Ingeniería Química, por lo que autorizo que el mismo sea utilizado en la institución con la finalidad que estima conveniente.

Ilismay Bahamonde Cabrera.

**Dedicatoria.**

A mi madre

## **Agradecimiento.**

A mi tutora la Dr Juana Zoila Junco por toda su dedicación.

Al colectivo de profesores de mi carrera que de una forma u otra me han apoyado y se han esforzado para brindarme todos sus conocimientos.

A mi familia que en todo momento ha estado presente, en especial a mí querida madre que es lo más importante que tengo en mi vida.

A mi novio Alexander Albear Góngora por estar siempre a mi lado y brindarme toda su comprensión.

.A todos mis compañeros de aula y de año en especial a Dailys Arias Ramos.

**Resumen.**

Se desarrolla una actividad docente en la forma de enseñanza de taller, que integra los contenidos abordados en distintas asignaturas y disciplinas del currículo del ingeniero químico con acción preponderante del tema tratamientos biológicos que se aborda en la asignatura Tratamiento de aguas y residuales y temas de reactores biológicos que trata la asignatura Reactores heterogéneos. La actividad presenta un sustento teórico, metodológico y práctico que tributa al desarrollo de valores y habilidades en el estudiante. Se presentan numerosos ejemplos de aplicación en la práctica social de la teoría de referencia, a partir de la cual el estudiante puede constatar la aplicabilidad de los contenidos teóricos en la actividad industrial. El taller incluye la utilización de horas curriculares y actividad independiente (extracurricular), la autopreparación e interacción con el profesor para evaluar los ejercicios desarrollados a través de la plataforma MOODLE. La actividad contribuirá considerablemente al desarrollo independiente de los estudiantes.

## Tabla de Contenido.

|                                                        | Páginas |
|--------------------------------------------------------|---------|
| Introducción.                                          | 1       |
| Capítulo                                               |         |
| 1.                                                     | 3       |
| Plan de Estudio D del currículo del ingeniero químico. |         |
| 1.1                                                    | 3       |
| 1.1.1                                                  | 3       |
| 1.1.2                                                  | 4       |
| 1.1.3                                                  | 6       |
| 1.1.4                                                  | 6       |
| 1.1.5                                                  | 9       |
| 1.2                                                    | 12      |
| 1.2.1                                                  | 14      |
| 1.2.2                                                  | 13      |
| 1.3                                                    | 14      |
| 1.3.1                                                  | 14      |
| 1.4                                                    | 16      |
| 1.4.1                                                  | 16      |
| 1.4.2                                                  | 18      |
| 1.4.3                                                  | 18      |
| 1.4.3.1                                                | 19      |
| 1.4.4                                                  | 20      |
| 1.4.4.1                                                | 21      |
| 1.4.4.2                                                | 22      |
| 1.4.4.3                                                | 22      |
| 1.4.4.4                                                | 23      |
| 1.4.4.5                                                | 24      |
| 1.4.4.6                                                | 26      |
| 1.4.4.7                                                | 28      |
| 1.4.4.8                                                | 28      |
| Capítulo                                               |         |
| 2                                                      | 30      |
| Capítulo                                               |         |
| 3.                                                     | 35      |
| 3.1                                                    | 35      |
| 3.1.1                                                  | 35      |
| 3.1.2                                                  | 38      |

|     |                                                                                                      |    |
|-----|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.2 | Propuesta de conjuntos de ejercicios a incorporar como parte de la actividad de taller a establecer. | 42 |
|     | Conclusiones                                                                                         | 47 |
|     | Recomendaciones                                                                                      | 48 |
|     | Bibliografía                                                                                         | 49 |
|     | Anexos                                                                                               | 52 |

## **Introducción**

La formación del profesional en Cuba mantiene una constante actualización en función de los avances de la ciencia y la técnica en el mundo, y contempla los principales acontecimientos y problemáticas a las que debe dar solución, en función de la especialidad a la que se haga referencia.

El ingeniero químico a través de la historia ha tenido una actividad preponderante en el desarrollo social, y los planes de estudio han transitado en función de los aspectos de mayor relevancia que se han presentado en diferentes etapas. En la actualidad se preparan las condiciones para el desarrollo del plan D, que concibe como facetas diferenciadas, lograr una mayor independencia del estudiante en su formación, por lo que se programan actividades de autogestión como una vía para el desarrollo de esas habilidades.

El tema ambiental cada día cobra mayor importancia y trascendencia para la subsistencia del planeta, y todas las especialidades de la vida profesional tienen incidencias y deben contemplarse en todos los currículos universitarios. La estrategia curricular ambiental es la responsable de lograr la formación integral del profesional, con la cultura ambiental que requiere el momento.

El proceso de enseñanza-aprendizaje, a tenor de la Revolución Científico-Técnica y de sus vínculos con los problemas globales y las tendencias del desarrollo contemporáneo, precisa de nuevos enfoques, signados por la dinámica acelerada de la producción de saber, y consecuentemente, por la creación constante de nuevos campos de la ciencia y la tecnología, y los correspondientes vínculos sistémicos que se producen entre los mismos. (Hassan, 2009).

La estructuración de las formas de enseñanza para el desarrollo de los programas de las diferentes asignaturas, tienen un fin específico para la formación integral del profesional, sin embargo existen contenidos que se abordan en etapas intermedias de la carrera, que requieren una mayor profundidad para la total comprensión por parte del educando. La asignatura Tratamiento de aguas y residuales es un ejemplo de ello.

### **Se declara como problema científico:**

La asignatura Tratamiento de aguas y residuales aborda contenidos que no pueden desarrollarse profundamente, porque los fundamentos teóricos que lo rigen se imparten en asignaturas correspondientes a los semestres finales del currículo.

**Hipótesis.**

Sí se utiliza las potencialidades que ofrece el plan D de adquisición de conocimientos por sí mismo en la forma de enseñanza taller, podrá profundizarse en los contenidos que aborda la asignatura Tratamiento de aguas y residuales desde la etapa en que está programada su impartición.

**Objetivo.**

Estructurar una actividad docente en la forma de enseñanza taller, que propicie la interrelación de contenidos de la asignatura Tratamiento de aguas y residuales con asignaturas que se imparten en los semestres finales del currículo.

**Objetivos específicos.**

Estudiar la fundamentación de las características del plan D, con énfasis en lo referente al desarrollo de habilidades, valores y objetivos del currículo del ingeniero químico en la forma de enseñanza taller.

Estudiar los programas de asignaturas que se imparten en los semestres finales del currículo que sean afines a los contenidos que aborda la asignatura Tratamiento de aguas y residuales.

Actualizar el estado del arte referido a los contenidos que aborda la asignatura Tratamiento de aguas y residuales, para su empleo como ejemplos de aplicación práctica de la teoría que fundamenta dicha asignatura.

## **Capítulo 1. Estudio bibliográfico.**

### **1.1 Plan de Estudio D del currículo del ingeniero químico.**

#### **1.1.1 Contenidos de las disciplinas.**

- Disciplina de Operaciones y Procesos Unitarios. Incluye entre sus contenidos lo referente a medidores de caudal, operaciones de separación mecánica por filtración y por sedimentación, a las operaciones de transferencia de calor mediante intercambiadores de calor, condensadores y evaporadores, operaciones de transferencia de masa: humidificación, absorción gaseosa, y secado de sólidos húmedos. Reactores químicos homogéneos y heterogéneos. Métodos y tecnologías para el tratamiento de agua de uso industrial y de residuales de la industria química constituyen tópicos a tratar dentro de los contenidos de la disciplina de Operaciones y Procesos Unitarios. La asignatura Tratamiento de Agua y Residuales está dedicada al estudio de Temas Medioambientales. Así, las actividades prácticas referentes a los contenidos de tratamiento de aguas industriales y residuales se deben concebir, fundamentalmente, como trabajos en clases prácticas, en el laboratorio químico, o de ingeniería en trabajos de curso que conduzcan al estudiante a la discusión y selección de variantes de tratamiento y operación. (Garcell, s.a.).
- Disciplina Fundamentos de Automatización. Incluye entre sus contenidos los métodos y normas de instalación y mantenimiento de la instrumentación. Función que realiza cada instrumento instalado. (J' de Disciplina FAU. s.a.).
- Disciplina Fundamentos Químicos y Biológicos. Incluye entre sus contenidos las biomoléculas e integridad del metabolismo. Características estructurales, propiedades físicas y químicas. Fundamentos del metabolismo: síntesis y degradación. Crecimiento y nutrición de los microorganismos. Microbiología ambiental y aplicada. (Moro, s.a.).
- Disciplina Ingeniería de Procesos. Incluye entre sus contenidos las causas de anomalías en operaciones: en procesos de combustión, en torres de enfriamiento de agua, en operaciones de rectificación y en reactores químicos. Procedimiento de detección. Causas de anomalías en procesos específicos. (Viera, s.a.).
- Disciplina Preparación para la Defensa. Trata los aspectos concernientes a la clasificación y características de los desastres: tecnológicos, naturales y sanitarios; las medidas para su

- prevención, enfrentamiento, respuestas y rehabilitación. Causas que originan los desastres sanitarios y medidas a adoptar. Etapas y secuencia del manejo de los desastres. Fases que se establecen. Principales medidas de protección para contrarrestarlos. Objetivo Económico con Peligro Químico (OEPQ). Su clasificación y principales características. Plan de reducción de desastres. Metodología de su elaboración. Fuerzas y medios que existen en el sistema defensivo territorial para combatir los desastres. (Programa de la disciplina).
- Disciplina de Principios de Ingeniería Química. Incluye dentro de sus contenidos la expresión general del balance de masa, la metodología general para resolver problemas de balances de masa en procesos estacionarios, balances de masa en procesos sin y con reacciones químicas, balances de energía en procesos sin y con reacciones químicas, balances de masa y de energía en procesos no estacionarios y el equilibrio en las reacciones químicas simples homogéneas y heterogéneas entre otras. (Pons, s.a.).

### **1.1.2 Sistema de habilidades.**

- Disciplina de Operaciones y Procesos Unitarios. Declara como habilidades a lograr: que el estudiante sea capaz de seleccionar, calcular y evaluar los métodos, tecnologías y tratamientos para la purificación de aguas de uso industrial y de residuales líquidos y gaseosos con vistas a la minimización de desechos, y de prevención de contaminación ambiental. Interpretar el efecto de las variables de operación sobre la velocidad global de reacción y sobre el comportamiento de los reactores. (Garcell, s.a.).
- Disciplina Fundamentos de Automatización. Define dentro de las habilidades a lograr: que el estudiante sea capaz de plantear alternativas de esquemas de control y proponer las más convenientes. Confeccionar el esquema de instrumentación y control de procesos. Utilizar a un nivel productivo los principios fundamentales de la automatización. Determinar las condiciones de medición necesarias para realizar balances de masa y energía en plantas existentes. Establecer las condiciones necesarias de control de un proceso tecnológico. (Garcell, s.a.).
- Disciplina de Fundamentos Químicos y Biológicos. Declara como habilidades a lograr: que el estudiante sea capaz de determinar las composiciones de equilibrio de reacciones homogéneas gaseosas, líquidas y en reacciones heterogéneas gas-sólido, constante de

velocidad y órdenes de reacción, así como cuantificar los procesos electroquímicos y los parámetros característicos de la adsorción y la catálisis. Determinar el comportamiento de los microorganismos en procesos biotecnológicos y de la industria alimentaria a partir de leyes que rigen su crecimiento y metabolismo. Determinar la dirección, extensión y velocidad de las reacciones químicas en sistemas homogéneos en fase gaseosa, fase líquida y en sistemas heterogéneos. Predecir la estructura, propiedades físico-químicas y los métodos más generales de síntesis de los compuestos químicos orgánicos. Inferir el comportamiento de las biomoléculas en procesos biosintéticos aplicando los conceptos del metabolismo y los principios de la enzimología y la bioenergética. Determinar la concentración de componentes en una muestra dada, haciendo uso de métodos de análisis químico e instrumental. (Moro, s.a.).

- **Disciplina Ingeniería de Procesos.** Define dentro de las habilidades a lograr: que el estudiante sea capaz de describir los rasgos esenciales de los productos, las materias primas, y los residuales de las plantas. Describir las principales normas de protección e higiene y de protección contra incendios. Identificar los fenómenos químicos accesibles a su conocimiento que están involucrados en las operaciones del proceso. Explicar cualitativamente su comportamiento ante los cambios de las variables de operación. Determinar los requerimientos materiales y energéticos de cada una de las operaciones componentes. Determinar si los equipos y aparatos principales de las operaciones accesibles a su conocimiento, poseen las dimensiones requeridas para realizar el trabajo establecido o el que se establezca como condición a analizar. Analizar si los materiales utilizados en los aparatos principales han sido adecuadamente seleccionados, atendiendo a sus propiedades mecánicas y si su resistencia a la corrosión o el sistema de protección anticorrosiva son satisfactorios. (Viera, s.a.).
- **Disciplina Preparación para la Defensa.** Define dentro de las habilidades a lograr: que el estudiante sea capaz de ver en qué consiste la contaminación ambiental principales contaminantes y medidas para evitarlas. El plan de medidas contra catástrofe, las consecuencias de los principales tipos de desastres y las medidas de Defensa Civil que deben adoptarse ante esta situación. (Programa de la disciplina).
- **Disciplina Principio de Ingeniería Química.** Define dentro de las habilidades a lograr: que el estudiante sea capaz de aplicar una metodología general para la resolución de problemas

de balances de masa, utilizar los principios estequiométricos en la resolución de problemas de balances de masa donde ocurren reacciones químicas, resolver balances de masa en situaciones donde existan corrientes recirculadas, evaluar un sistema de generación de vapor, evaluar el equilibrio químico para reacciones gaseosas simples, para una simple reacción química heterogénea y reacciones químicas en fase líquida que forman soluciones ideales. (Pons, s.a.).

- Disciplina de Ingeniería de los Materiales. Declara como habilidades a lograr: que el estudiante sea capaz de seleccionar los métodos adecuados de protección y control de la corrosión, incluyendo, la selección de los materiales de construcción, teniendo en cuenta los criterios técnico -económicos, comprobando experimentalmente el funcionamiento de algunos de ellos. (Hing, s.a.).

### **1.1.3 Sistema de valores.**

- Disciplina de Operaciones y Procesos Unitarios. Propone como valores desarrollar: la capacidad de adquirir conocimientos por sí mismo expresado en la independencia mostrada al analizar situaciones que requieren el empleo de conocimientos provenientes de las diferentes partes de la asignatura , y de integrarlos de manera que contribuyan al logro de un objetivo único. (Garcell, s.a.).
- Disciplina Fundamentos Químicos y Biológicos. Propone como valores desarrollar: que los estudiantes se comprometan con el cuidado del medio ambiente y la propiedad social, de percibir valores estéticos y valores éticos en su conducta habitual. (Moro, s.a.).
- Disciplina Ingeniería de Procesos. Propone como valores desarrollar: la capacidad del estudiante de para educarse por sí mismo, percibir la necesidad de proteger la naturaleza y el medio ambiente, mediante la ejecución de trabajos técnicos realizados con esa finalidad. (Viera, s.a.).

### **1.1.4 Objetivos educativos e instructivos.**

- Disciplina Operaciones y Procesos Unitarios. Percibe como objetivos: vincular diferentes leyes, fenómenos, modos de operar y el impacto ambiental que provocan, como elementos

- determinantes del comportamiento de estas, y en las que se analice de qué forma los cambios en uno cualquiera de dichos elementos que influyen sobre los otros y sobre el comportamiento global de las mismas, y sobre el entorno. Análisis de problemas simples típicos de la profesión. Evaluación del comportamiento de las estaciones de las aguas de abasto a la industria de procesos, y de los sistemas tecnológicos para el tratamiento, reutilización y vertimiento de los residuales industriales, teniendo en cuenta su impacto ambiental y el uso racional de los recursos naturales y energéticos. Diseño y análisis del comportamiento de reactores químicos homogéneos y heterogéneos en distintas condiciones de operaciones típicas de los procesos químicos. (Garcell, s.a.).
- Disciplina Fundamentos de Automatización. Incluye como objetivo: formar ingenieros químicos conscientes de que la capacidad para adquirir conocimientos por sí mismo, constituyendo uno de los rasgos más definatorios de la calidad de toda educación de nivel superior. Desarrollar la constancia del hábito de producir reflexivamente y evaluar críticamente los resultados de su trabajo. (Garcell, s.a.).
  - Disciplina Fundamentos Químicos y Biológicos. Incluye como objetivo: consolidar en los estudiantes una concepción científica del mundo y su formación ética, estética, política y moral, a través de una correcta interpretación de los principios básicos de la Química, Química Física, Bioquímica y Microbiología para su aplicación práctica a nivel productivo, desarrollando hábitos y habilidades que le permitan la educación por sí mismo. Determinar el comportamiento de las biomoléculas en procesos biosintéticos, aplicando los conceptos de metabolismo sobre la base de la enzimología y la bioenergética. Determinar el comportamiento de los microorganismos en un proceso biotecnológico y de la industria alimentaria a partir de las leyes que rigen su crecimiento. (Moro, s.a.).
  - Disciplina de Ingeniería de Procesos. Incluye como objetivo, la capacidad para educarse por sí mismo y educar a otros, a través de: el desarrollo de la capacidad para orientarse y utilizar el sistema de información científico-técnica, el análisis de la estructura científica de la profesión, su campo de acción y los objetivos esenciales del profesional, el empleo sistemático de conocimientos y habilidades lógicas, el análisis de problemas no estructurados que requieran el dominio parcial de contenidos no desarrollados en clases y con actividades de todo tipo desarrolladas con un alto grado de independencia, el reconocimiento de la actuación del hombre sobre el medio circundante como el agente

decisivo en la formación de su personalidad, el análisis de la relación entre los procesos productivos, las necesidades sociales, el análisis y empleo de las medidas de protección física y ambiental como medios para la protección del hombre y del medio ambiente, la solución de tareas técnicas propias del ejercicio de la profesión, desarrolladas a través del vínculo laboral - investigativo, cuya estructura fenomenológica responda a la naturaleza real de los problemas y no a las características de una disciplina en particular, el reconocimiento en los problemas profesionales de elementos técnicos y de factores de índole social, y que por tanto su solución exige una formación técnica específica, unida al dominio de factores jurídicos y a rasgos personales determinantes de una postura activa ante la vida, llevar a la práctica la esencia de las estrategias curriculares como una consecuencia natural del desarrollo de actividades propias del ejercicio de la profesión, desarrollar los elementos imprescindibles para ejercitar conscientemente la capacidad de educarse por sí mismos, integrar los conceptos fundamentales (más que las disciplinas), en un modo de actuar que utilice a todos cuanto se precisen simultáneamente. (Viera, s.a.).

- Disciplina Principio de Ingeniería Química. Incluye como objetivo: integrar los conocimientos y habilidades adquiridas en las disciplinas precedentes y paralelas como fundamentación para la resolución de balances de masa y de energía, ampliar el campo de aplicaciones de los balances de energía y generalizar los tratamientos cuantitativos sobre equilibrio físico y químico a situaciones reales de ingeniería; realizar, a nivel productivo, análisis termodinámicos a diferentes sistemas reales tales como hornos, generadores de vapor, turbinas, compresores, equipos de transferencia de calor, ciclos de potencia y de refrigeración, columnas de destilación, reactores químicos, entre otros; por separados o integrados en diferentes combinaciones. (Pons, s.a.).
- Disciplina Ingeniería de los Materiales. Incluye como objetivo: desarrollar en los estudiantes la conciencia de que han de enfrentar los problemas de diseño y/o modificaciones de equipos con la convicción de que deben resolver los mismos a través de un análisis que parta de las propiedades y características del material, propiedades mecánicas y anticorrosivas, tomando decisiones que conlleven al ahorro de materiales y energía; aplicar, a nivel productivo, los principios y leyes referentes a los distintos tipos de corrosión y métodos de prevención y control que se pueden presentar en equipos e instalaciones industriales, sometidos a diferentes ambientes agresivos teniendo en cuenta

los criterios económicos, con el fin de minimizar las pérdidas que la corrosión produce. (Hing, s.a.).

- La disciplina Análisis de Procesos percibe como objetivo: aplicar, a nivel productivo, los principios y leyes referentes a los distintos tipos de corrosión y métodos de prevención y control que se pueden presentar en equipos e instalaciones industriales sometidos a diferentes ambientes agresivos teniendo en cuenta los criterios económicos, con el fin de minimizar las pérdidas que la corrosión produce. (Díaz, s.a).

### **1.1.5 Indicaciones metodológicas y de organización.**

- Disciplina de Operaciones y Procesos Unitarios. Precisan que debe lograrse que el estudiante desarrolle habilidades suficientes en la solución de problemas de análisis, selección y proyecto de operaciones y procesos unitarios, tanto considerados aisladamente, como vinculados a una tecnología determinada, debe dársele la debida importancia, durante la actividades prácticas, a la consideración de variantes de operación y diseño de procesos tecnológicos, al análisis de anomalías de funcionamiento y otros problemas comunes en la operación de plantas. Debe lograrse que el estudiante desarrolle habilidades suficientes en la solución de problemas de análisis, selección y proyecto de operaciones y procesos unitarios, tanto considerados aisladamente, como vinculados a una tecnología determinada. Debe dársele la debida importancia, durante las actividades prácticas, a la consideración de variantes de operación y diseño de procesos tecnológicos, al análisis de anomalías de funcionamiento y otros problemas comunes en la operación de plantas. En los talleres que se logre la vinculación de un tema principal abordado con otros complementarios propio de la disciplina o perteneciente a otras disciplinas. Integrar los conocimientos recibidos en la disciplina. Los talleres han de contribuir a elevar la eficacia del trabajo independiente de los estudiantes, además, en las clases y talleres, se deben introducir elementos de análisis económico de los procesos y operaciones estudiado. Se recomienda impartir algunas conferencias, clases prácticas y talleres con la modalidad no presencial del profesor (en las asignaturas OPU-2, OPU-3, OPU-5, OPU-6, OPU-7 y OPU-8) como vía de estimular el autodesarrollo en los estudiantes de manera que éstos adquieran una mayor independencia, así como hábitos y habilidades de interpretación y adquisición de conocimientos por sí mismos. (Garcell, s.a.).

- Disciplina Fundamentos de Automatización. Precisan que deben utilizarse aquellos métodos de enseñanza que obliguen al estudiante a participar de una forma activa en ellos, de tal forma que logre crear el hábito de aprender por sí mismo. (Garcell, s.a.).
- Disciplina Fundamentos Químicos y Biológicos. Precisan que en el proceso de enseñanza-aprendizaje en la disciplina deben ser consideradas dos partes esenciales, el profesor como guía para la acción, y el estudiante como centro del proceso, educándose por sí mismo, constituyendo factores claves, los objetivos como categoría rectora del proceso, los objetivos de las asignaturas deben elaborarse derivados de los objetivos de la disciplina, y a partir de éstos los de las asignaturas, los objetivos de las clases y de las evaluaciones. En éstos deben precisarse el nivel de asimilación, el conocimiento, la habilidad, y el nivel de profundidad.

En la sistematización de los contenidos de la enseñanza y el sistema de habilidades debe lograrse, la integración de los contenidos de la enseñanza, de manera tal que los estudiantes distingan lo esencial y se apropien de la habilidad.

El vínculo del estudio con el trabajo. Debe existir un nexo indisoluble entre el estudio con el trabajo, el estudiante aprende haciendo, ésta es la forma posible de lograr la apropiación de la habilidad.

Los estudiantes deben disponer de guías que orienten la preparación para la actividad.

Los seminarios, pueden estructurarse en dependencia del propósito que se persiga, ya sea unificador de un sistema de conocimientos dado que a su vez forma parte de uno o varios temas impartidos en las conferencias, y/o a través de la búsqueda de conocimientos nuevos no recibidos en las conferencias, y que en los dos casos involucren la búsqueda, análisis, síntesis y redacción de los contenidos.

Los laboratorios, deben contar con una guía orientadora a disposición de los estudiantes, que permita un mayor trabajo independiente y una preparación teórica profunda acorde con los objetivos propuestos; es indispensable la confección de un informe el cual refleje precisión en los contenidos, lenguaje químico adecuado, ortografía, redacción adecuada y calidad estética. Puede hacerse uso de plataformas interactivas que conduzcan a una mayor preparación y motivación de los estudiantes, así como el empleo de laboratorios virtuales en apoyo a la preparación de los estudiantes o sustitución de prácticas que no puedan realizarse

por carecer de la instalación experimental o peligrosidad de la misma. En esta forma de enseñanza debe ponerse énfasis en los aspectos sobre la preservación y cuidado del medio ambiente, así como los reglamentos, decreto-ley y demás disposiciones legales relacionados con el uso de sustancias químicas tóxicas, radioactivas y explosivas e instalaciones experimentales tributando a la estrategia de formación jurídica en los estudiantes.

Las formas organizativas y los métodos de enseñanza utilizados tienen que estar diseñados de manera tal que propicien la participación activa y consciente de los estudiantes desde el momento en que se desarrolla la conferencia.

Como elemento propiciador de la actividad independiente de los estudiantes, podrán realizarse actividades no presenciales, las cuales deben organizarse, los alumnos deben disponer de una adecuada orientación metodológica y el resultado alcanzado por los estudiantes debe ser controlado por el profesor. Las horas de actividades no presenciales deben incrementarse al transitar por la disciplina. (Moro, s.a.).

- Disciplina Ingeniería de Procesos. Precisan las actividades de taller, sea cual sea la modalidad que se utilice para su desarrollo, tienen como objetivo esencial elevar la eficacia del trabajo independiente del estudiante; por esta causa, no se reportan en los fondos de tiempos de las asignaturas, ni pueden contemplar la impartición de nuevos conocimientos, excepto cuando el dominio de estos al nivel de asimilación que se establezca, no requieran de un trabajo adicional fuera de estas actividades. (Viera, s.a.).
- Las indicaciones metodológicas para el desarrollo de la disciplina Preparación para la Defensa precisan que los contenidos de la disciplina deben desarrollarse empleando, convenientemente, los argumentos legales que están refrendados en la Constitución de la República y la Ley de Defensa Nacional, así como otros cuerpos legales complementarios relacionados con la preparación de la economía, la compatibilización, la protección del medio ambiente, sistemas de medidas de defensa civil, seguridad biológica y Ley sobre la inversión extranjera.

Las formas de enseñanza que se proponen son: Conferencias, Clases Prácticas, Seminarios y Talleres. (Programa de la disciplina).

- Disciplina Principio de Ingeniería Química. Precisan que los balances de masa y de energía tienen la característica de integrar los conocimientos y además un carácter poco esquemático

se hace necesario que los estudiantes que los reciban hayan logrado desarrollar aceptablemente la capacidad de trabajo independiente.

El enfoque debe ser ingenieril al estudio cuantitativo del equilibrio químico de reacciones homogéneas y heterogéneas.

Se hace hincapié, sobre todo en algunas clases prácticas cuando el proceso simplificado sobre el cual se trabaja lo permite, en la necesidad de cuidar el medio ambiente con relación a los desechos materiales y energéticos vertidos. (Pons, s.a.).

- **Disciplina Ingeniería de los Materiales.** Precisan que las asignaturas que la conforman, presentan los diferentes tipos de formas de enseñanza tales como conferencias, clases prácticas, seminarios, laboratorios y talleres mediante los cuales, conjuntamente con los sistemas de evaluaciones y el estudio independiente de los estudiantes, se garantiza el cumplimiento de los objetivos y la adquisición de las habilidades planteadas anteriormente.

Es fundamental vincular el contenido de la disciplina con los aspectos prácticos del componente laboral investigativo.

Programa director del medio ambiente, el contenido de la disciplina se puede vincular al cuidado del medio ambiente, pues una buena selección de los materiales de construcción, así como un buen diseño y métodos de protección, promueven una larga duración de los equipos, evitando roturas y salideros que pueden contaminar el ecosistema. En estos mismos aspectos se debe incluir el criterio de calidad. (Hing, s.a.).

## **1.2 Reglamento docente metodológico.**

### **1.2.1 Modelo del profesional.**

El Modelo del profesional, como lo argumenta el artículo 66 del reglamento docente metodológico, es el documento principal del plan de estudio, que incluye una breve caracterización de la carrera con una síntesis de su desarrollo histórico en el país, su objeto de trabajo, los modos de actuación, los principales campos de acción y esferas de actuación; así como las funciones del profesional.

El Programa de la Disciplina es el documento que refleja las características más importantes de la misma, y constituye la descripción sistemática y jerárquica de los objetivos generales a lograr y de los contenidos esenciales a asimilar, artículo 68. (Ministerio de Justicia. 2007).

El modelo de formación de un profesional de la educación superior cubana es el de perfil amplio. Está dotado de una profunda formación básica, para dar una respuesta primaria en el eslabón de base de su profesión; al poder resolver, con independencia y creatividad, los problemas más generales y frecuentes que se presentan en su objeto de trabajo. (Horruitiner, 2008).

### **1.2.2 Planificación y organización del proceso docente educativo.**

En el artículo 77 del reglamento docente metodológico, se hace referencia a la importancia de la planificación y organización del proceso docente educativo, para garantizar la integración y sistematización eficiente de las actividades docentes que conduzcan al cumplimiento de los objetivos generales de la formación del profesional. En su artículo 102 precisa que la primera prioridad del trabajo docente es la correcta aplicación del enfoque Integral. (Ministerio de Justicia. 2007).

Las formas organizativas fundamentales del proceso docente-educativo en la educación superior como se describen en el artículo 104 son: la clase, la práctica de estudio, la práctica laboral, el trabajo investigativo de los estudiantes, la autopreparación de los estudiantes, la consulta, la tutoría.

Se pueden incluir otras formas organizativas en aquellas carreras cuyas particularidades lo justifiquen, las que deben estar previstas en el plan de estudio.

El taller es el tipo de clase que tiene como objetivo específico que los estudiantes apliquen los conocimientos adquiridos en las diferentes disciplinas para la resolución de problemas propios de la profesión, a partir del vínculo entre los componentes académico, investigativo y laboral.

El taller contribuye al desarrollo de habilidades para la solución integral de problemas profesionales en grupo, para el grupo y con la ayuda del grupo, donde primen las relaciones interdisciplinarias. Estos aspectos se abordan en el artículo 111 del referido Reglamento docente metodológico.

El trabajo investigativo de los estudiantes integra como un sistema las actividades académicas, laborales e investigativas; los contenidos que se desarrollan en las asignaturas, se aplican en la práctica laboral y se materializa en los trabajos de curso y de diploma que realizan los estudiantes. (Ministerio de Justicia. 2007).

### **1.3 Características fundamentales del modelo pedagógico cubano.**

#### **1.3.1 Aprendizaje desarrollador.**

Desarrollo de las habilidades y cualidades intrínsecas al pensamiento creador, como la flexibilidad, la originalidad, la fluidez, la elaboración, la curiosidad y la imaginación, el manejo de la novedad, de la complejidad, de la ambigüedad, la disposición a asumir riesgos, a jugar con lo posible, a anticipar, hipotetizar y otros. También se desarrollan las habilidades implicadas en el pensamiento crítico-reflexivo, como: reconocer contradicciones, distinguir lo observado de lo inferido, comprender e interpretar información, valorar su exactitud y confiabilidad, identificar supuestos y asunciones, razonar inductiva y deductivamente y juzgar la validez de las propias conclusiones, comparar, contrastar, y defender ideas y argumentos, entre otros. Sobre esta base, tiene también lugar el desarrollo de habilidades complejas y capacidades, como la solución de problemas y la toma de decisiones. (Hassan, 2009)

Aprendizaje desarrollador que apunta como objetivo, hacia la educación de aprendices que, más que consumir y acumular información, puedan buscarla y producirla, problematizarla, criticarla, transformarla, y utilizarla de manera consciente y creadora para tomar decisiones, resolver nuevos problemas y situaciones, y erigirla como base para los nuevos y constantes aprendizajes.

Engloba la influencia de una necesaria integración de los aspectos cognitivos y los aspectos afectivos y valorativos en cualquier aprendizaje desarrollador, y el impacto que este siempre tiene en la personalidad íntegra de los educandos.

Implicación en la formación de sentimientos, actitudes y valores

La comprensión del fenómeno de enseñanza-aprendizaje se hace cada vez más multidimensional, más rica, y sobre todo, se incrementan en cantidad y calidad los enfoques y modelos didácticos a partir de la revelación de nuevas dimensiones, aristas, características y relaciones del mismo. La visión del proceso de enseñanza-aprendizaje como un todo se hace más integral, y, en el plano curricular, esto se refleja en modelos y proyectos curriculares que son también más complejos y diversos.

Tendencia a la multidisciplinariedad en sus distintas manifestaciones (intradisciplinariedad, interdisciplinariedad, transdisciplinariedad), propia de esta producción acelerada del conocimiento,

que influye de manera muy significativa en el diseño y práctica de la enseñanza. Ella contribuye a dar sustento científico a las necesarias relaciones entre las diferentes formas de organización del contenido (asignatura, área, disciplina o módulo principalmente), en los distintos niveles de organización del proceso (nivel, grado, semestre y otras).

En el caso de las asignaturas, la cuestión de la multidisciplinariedad cobra aún mayor significado, por su contribución a las relaciones entre objetivo-contenido-método a partir de la estructura de las mismas, ya que propicia una mejor realización de las relaciones entre los conocimientos teóricos, los conocimientos prácticos o procedimentales, y los axiológicos, lo cual constituye un reto que la naturaleza integral del pensamiento y la personalidad del alumno impone al proceso de enseñanza-aprendizaje.

La enseñanza desarrolladora asumida como el proceso sistémico de transmisión de la cultura en la institución escolar en función del encargo social, se organiza a partir de los niveles de desarrollo actual y potencial de los estudiantes, y conduce el tránsito continuo hacia niveles superiores de desarrollo, con la finalidad de formar una personalidad integral y autodeterminada, capaz de transformarse y transformar la realidad en un contexto sociohistórico concreto.

Concepción del PEA con una visión integral, que reconoce no solamente sus componentes estructurales, sino también las relaciones que se establecen entre los mismos, y entre ellos y el propio proceso como un todo. Una comprensión más rica que incluye a protagonistas, niveles y relaciones como elementos integrantes de su estructura.

Reconocimiento de los niveles de organización del proceso, como manifestación de carácter sistémico. Sustentado en que sólo a partir de un sólido enfoque de sistema pueden integrarse los diferentes componentes de manera tal que conformen una totalidad con identidad propia, desarrolladora, y que a la vez, cada uno mantenga su identidad como parte en función de la identidad del sistema como una totalidad, o sea, en función de la contradicción o problema a resolver.

Reconocimiento del problema como manifestación de las contradicciones del proceso, como punto de partida de su diseño y ejecución, como expresión de la fuerza que mueve el proceso y de su por qué. (Hassan, 2009).

Horruitiner, 2008 plantea que el modelo pedagógico presenta cuatro características principales. Flexible, para poder adaptarse a diversas situaciones laborales, a particularidades territoriales y al ritmo individual de aprovechamiento académico del estudiante. Estructurado, para favorecer la organización y desarrollo del aprendizaje. Centrado en el estudiante, para que éste sea capaz de

asumir de modo activo su propio proceso de formación. Con actividades presenciales, que posibiliten una mayor atención de los profesores a los estudiantes, en función del tiempo disponible, propiciando con ello eliminar el desaliento y el fracaso.

#### **1.4 Temáticas de la literatura científica que guardan correspondencia con los contenidos de la asignatura Tratamiento de aguas y residuales.**

##### **1.4.1 Contaminación Ambiental.**

Se denomina contaminación ambiental a la presencia en el ambiente de cualquier agente (físico, químico o biológico) o bien de una combinación de varios agentes en lugares, formas y concentraciones tales que sean o puedan ser nocivos para la salud, la seguridad o para el bienestar de la población, o bien, que puedan ser perjudiciales para la vida vegetal o animal, o impidan el uso normal de las propiedades y lugares de recreación y goce de los mismos. La contaminación ambiental es también, la incorporación a los cuerpos receptores de sustancias sólidas, líquidas o gaseosas, o mezclas de ellas, siempre que alteren desfavorablemente las condiciones naturales del mismo, o que puedan afectar la salud, la higiene o el bienestar del público.

A medida que aumenta el poder del hombre sobre la naturaleza y aparecen nuevas necesidades como consecuencia de la vida en sociedad, el medio ambiente que lo rodea se deteriora cada vez más. El comportamiento social del hombre, que lo condujo a comunicarse por medio del lenguaje, que posteriormente formó la cultura humana, le permitió diferenciarse de los demás seres vivos. Pero mientras ellos se adaptan al medio ambiente para sobrevivir, el hombre adapta y modifica ese mismo medio según sus necesidades.

El progreso tecnológico, por una parte y el acelerado crecimiento demográfico, por la otra, producen la alteración del medio, llegando en algunos casos a atentar contra el equilibrio biológico de la Tierra. No es que exista una incompatibilidad absoluta entre el desarrollo tecnológico, el avance de la civilización y el mantenimiento del equilibrio ecológico, pero es importante que el hombre sepa armonizarlos. Para ello es necesario que proteja los recursos renovables y no renovables y que tome conciencia de que el saneamiento del ambiente es fundamental para la vida sobre el planeta.

La contaminación es uno de los problemas ambientales más importantes que afectan a nuestro mundo y surge cuando se produce un desequilibrio, como resultado de la adición de cualquier sustancia al medio ambiente, en cantidad tal, que cause efectos adversos en el hombre, en los animales, vegetales o materiales expuestos a dosis que sobrepasen los niveles aceptables en la naturaleza.

La contaminación puede surgir a partir de ciertas manifestaciones de la naturaleza (fuentes naturales) o bien debido a los diferentes procesos productivos del hombre (fuentes antropogénicas) que conforman las actividades de la vida diaria.

Las fuentes que generan contaminación de origen antropogénico más importantes son: industriales (frigoríficos, mataderos y curtiembres, actividad minera y petrolera), comerciales (envolturas y empaques), agrícolas (agroquímicos), domiciliarias (envases, pañales, restos de jardinería) y fuentes móviles (gases de combustión de vehículos). Como fuente de emisión se entiende el origen físico o geográfico donde se produce una liberación contaminante al ambiente, ya sea al aire, al agua o al suelo. Tradicionalmente el medio ambiente se ha dividido, para su estudio y su interpretación, en esos tres componentes que son: aire, agua y suelo; sin embargo, esta división es meramente teórica, ya que la mayoría de los contaminantes interactúan con más de uno de los elementos del ambiente. La contaminación del agua: es la incorporación al agua de materias extrañas, como microorganismos, productos químicos, residuos industriales, y de otros tipos o aguas residuales. Estas materias deterioran la calidad del agua y la hacen inútil para los usos pretendidos. Esta contaminación es provocada fundamentalmente por los desechos sólidos domésticos, desechos sólidos industriales, exceso de fertilizante y productos químicos, tala, quema, basura, el monóxido de carbono de los vehículos, desagües de aguas negras o contaminadas al mar o ríos. Para prevenir tales efectos el hombre no debe quemar ni talar plantas, controlar el uso de fertilizantes y pesticidas, no botar basura en lugares inapropiados, regular el servicio de aseo urbano, crear conciencia ciudadana, crear vías de desagües para las industrias que no lleguen a los mares ni ríos utilizados para el servicio o consumo del hombre ni animales, controlar los derramamientos accidentales de petróleo, controlar los relaves mineros.

### **1.4.2 Impacto ambiental.**

El déficit mundial del tratamiento. Visto de una perspectiva mundial, existe capacidad inadecuada del tratamiento de las aguas residuales, especialmente en países poco desarrollados. Esta circunstancia ha existido desde, por lo menos, los años 70 y es debido a la superpoblación, a la crisis del agua y al costo de construir sistemas de tratamiento de aguas residuales. El resultado del tratamiento inadecuado de las aguas residuales es aumentos significativos de la mortalidad (sobre todo) de enfermedades prevenibles; por otra parte, este impacto de la mortalidad es particularmente alto entre los infantes y otros niños en países subdesarrollados, particularmente en los continentes de África y de Asia. Particularmente, en el año 2000, las Naciones Unidas han establecido que 2.64 mil millones personas tenían el tratamiento y/o disposición de las aguas residuales inadecuado. Este valor representó a 44 por ciento de la población global, pero en África y Asia aproximadamente la mitad de la población no tenía ningún acceso cualesquiera a los servicios del tratamiento de aguas residuales, como se refiere el autor, (Tapia, 1995). Lastimosamente los empresarios y sus gobiernos no se consideran parte de la naturaleza ni del ambiente que le rodean, ni toman ninguna conciencia de los daños que hacen al planeta, e indirectamente a sí misma, al mismo ritmo con que los produce; salvo el retirar sus contaminantes de sus regiones, esto trae como consecuencia que se deteriora cada vez más nuestro planeta, atenta contra la vida de plantas, animales y personas, genera daños físicos en los individuos, convierte en un elemento no consumible al agua y en los suelos contaminados no es posible la siembra, como lo expresa el autor, (Mason, 1984).

### **1.4.3 Tratamiento de Aguas.**

El tratamiento de aguas residuales (o agua residual, doméstica o industrial, entre otros), es un proceso de tratamiento de aguas que a su vez incorpora procesos físicos, químicos y biológicos, los cuales tratan y remueven contaminantes físicos, químicos y biológicos del agua efluente del uso humano. El objetivo del tratamiento es producir agua ya limpia (o efluente tratado) o reutilizable en el ambiente y un residuo sólido o fango también convenientes para los futuros propósitos o recursos. Es muy común llamarlo depuración de aguas residuales para distinguirlo del tratamiento de aguas potables.

Las aguas residuales son generadas por residencias, instituciones y locales comerciales e industriales. Esto puede ser tratado dentro del sitio en el cual es generado (por ejemplo: tanques sépticos u otros medios de depuración) o recogido y llevado mediante una red de tuberías y eventualmente bombas a una planta de tratamiento municipal. Los esfuerzos para coleccionar y tratar las aguas residuales domésticas de la descarga están típicamente sujetas a regulaciones y estándares locales, estatales y federales (regulaciones y controles). Recursos industriales de aguas residuales, a menudo requieren procesos de tratamiento especializado.

Típicamente, el tratamiento de aguas residuales es alcanzado por la separación física inicial de sólidos de la corriente de aguas domésticas o industriales, seguido por la conversión progresiva de materia biológica disuelta en una masa biológica sólida usando bacterias adecuadas, generalmente presentes en estas aguas. Una vez que la masa biológica es separada o removida, el agua tratada puede experimentar una desinfección adicional mediante procesos físicos o químicos. Este efluente final puede ser descargado o reintroducidos de vuelta a un cuerpo de agua natural (corriente, río o bahía) u otro ambiente (terreno superficial o subsuelo) entre otros. Los sólidos biológicos segregados experimentan un tratamiento y neutralización adicional antes de la descarga o reutilización apropiada. (Marsilli, 2005).

#### **1.4.3.1 Tratamiento de las aguas residuales como una vía para la conservación del medio ambiente utilizando el biorreactor de membrana.**

Las innovaciones en el campo del tratamiento de las aguas residuales son una de las estrategias más importantes para la conservación del medio ambiente. Una de las innovaciones más importantes de los últimos tiempos es el biorreactor de membrana (MBR). Su funcionamiento se basa en que el agua del reactor biológico es filtrada pasando a través de las paredes de una membrana, debido a una pequeña depresión producida por una bomba centrífuga. El agua filtrada es extraída del sistema mientras el fango y los compuestos de tamaño superior al poro de la membrana quedan retenidos y permanecen o retornan al reactor biológico. Este ciclo se alterna con un corto contralavado, en el que se invierte el sentido del flujo para forzar el paso del agua filtrada desde el interior al exterior de la membrana para limpiarla. Periódicamente, en función del grado de ensuciamiento, se realizan limpiezas químicas en profundidad de las membranas mediante su inmersión en una solución de limpieza, como lo cita el autor, (Judd, 2006).

El sistema MBR es un tratamiento relativamente reciente. La demanda de agua potable aumenta constantemente debido fundamentalmente al desarrollo industrial y al aumento de la densidad de población en zonas concretas y, como consecuencia, la cantidad de agua residual que se vierte. Esta situación plantea a los sistemas de tratamiento de aguas residuales unas exigencias de alto rendimiento de depuración, costes de explotación bajos, alta flexibilidad para las oscilaciones, mínima producción de lodos, menos necesidad de espacio.

La tecnología de los BRM se puede considerar que está ya plenamente implantada tanto para el tratamiento de efluentes municipales como industriales. Su grado de fiabilidad es superior a cualquier otro proceso de depuración biológica, lo que lo hace especialmente adecuado cuando se quiere reutilizar el efluente depurado. Actualmente se dispone de tecnología para depurar las aguas residuales de la industria, y obtener un efluente con calidad suficiente para su reciclado en el proceso productivo. Probablemente el proceso más adecuado y fiable para obtener un efluente de calidad suficiente para su reciclado, es el Biorreactor de Membrana con adición o no de productos decolorantes al reactor biológico (en el caso de efluentes textiles). Se puede tratar el efluente de un BRM con membranas de Osmosis Inversa sin problemas especiales de ensuciamiento de las mismas. (Vizcaya, 2006).

#### **1.4.4 Digestión anaerobia.**

La digestión anaerobia es una fermentación metánica, que estabiliza las materias orgánicas transformándolas en, el mayor grado posible, en gas metano (65 / 70%) y gas carbónico (25 / 30%), consiste en una serie de procesos microbiológicos en ausencia de oxígeno. Un primer grupo bacteriano, constituido por bacterias productoras de ácidos, transforma los compuestos orgánicos complejos en otros más simples (ácidos: acético, propiónico y butírico) los cuales, a su vez, sirven de alimento a un segundo grupo que son las bacterias metánicas. Estas últimas son los organismos clave de la digestión anaerobia. Son estrictamente anaerobias, se desarrollan lentamente y son muy sensibles a las variaciones de T<sup>a</sup> y pH.

La digestión anaerobia comprende dos fases: una fase de licuación y otra de gasificación. La primera da lugar a los ácidos volátiles, en la fase de gasificación, las bacterias metánicas producen gas metano a partir de los ácidos volátiles o de alcoholes formados en la primera fase. Una producción excesiva de ácidos volátiles da lugar a un descenso del pH que frenará la actividad

biológica de la digestión. Una alcalinidad bicarbonatada elevada puede producir un efecto tampón deseado.

El proceso se lleva a cabo en unos depósitos cerrados (de hasta 30 m de diámetro y casi 20 m de altura) denominados digestores, que permiten que se efectúen las reacciones correspondientes y la decantación de los fangos digeridos en su parte baja de forma cónica. (Urbáez, s.a.).

#### **1.4.4.1 Parámetros que influyen en la digestión anaerobia.**

Temperatura (normalmente estos procesos se llevan a cabo a 35 °C (proceso mesofílico) porque a esta temperatura las bacterias hidrolíticas-acidogénicas y metanogénicas tienen una similar y máxima actividad).

Velocidad de carga orgánica, VCO (expresa la cantidad de materia orgánica por unidad de volumen y tiempo, que puede introducirse en el digestor para su transformación en biogás sin que provoque una distorsión en el proceso. Se suele expresar generalmente en kg DQO/m<sup>3</sup> día).

Tiempo de retención hidráulico, TRH (nos indica el tiempo que debe permanecer un agua residual en el digestor para que toda la sustancia orgánica se transforme en metano).

Tiempo de retención de sólidos, TRS (La velocidad de formación de metano será directamente proporcional a la concentración de biomasa en el digestor. Por tanto, es muy conveniente determinar los tiempos de retención de esta biomasa).

pH (La digestión anaerobia se desarrolla en condiciones óptimas a un pH alrededor de 7.0-7.2).

Acidez volátil (El metabolismo de las bacterias metanogénicas es óptimo en presencia de pequeñas concentraciones de ácidos volátiles: concentraciones superiores a 2000 ppm (ácido acético) pueden inhibir su actividad). Caudal de metano (La relación entre este parámetro y el contenido en materia orgánica del vertido -por ejemplo, como DQO- da una medida bastante exacta del coeficiente de rendimiento del digestor). (Díaz, 2006).

#### **1.4.4.2 Biogás.**

El biogás es un gas producto del resultado de la degradación anaerobia de materia orgánica, dicho gas está compuesto por cerca de 60% de metano y 40% de dióxido de carbono. Contiene mínimas cantidades de otros gases, entre ellos 1% de ácido sulfhídrico. Es un poco más liviano que el aire, posee una temperatura inflamación de 700° C y su llama alcanza una temperatura de 870° C.

El biogás puede ser utilizado como cualquier otro combustible, tanto para la cohesión de alimentos, en sustitución de la leña, el queroseno, el gas licuado, etc., como para el alumbrado, mediante lámparas adaptadas. Mezclas de biogás con aire, con una relación 1:20, forman un gas detonante altamente explosivo, lo cual permite que también sea empleado como combustible en motores de combustión interna adaptados.

Es importante aclarar que este gas puede usarse como combustible sólo cuando el metano se encuentra en concentraciones mayores o iguales a 50 %.

El Biogás es un combustible de calidad reconocida que se obtiene por la fermentación de compuestos orgánicos biodegradables, por acción de los microorganismos en ausencia total de oxígeno. Este proceso conocido como Digestión Anaerobia ocurre en tanques cerrados denominados Digestores Anaerobios, a los que se le suministra, de forma discontinua o continua, una mezcla de la materia orgánica y agua, en las proporciones requeridas. Entre las materias orgánicas más utilizadas en el proceso de digestión anaeróbica están: estiércol vacuno, estiércol porcino, gallinaza, pulpa de café, vinaza de destilería, cachaza, pulpa y aguas residuales del café, entre otros. (Boizán, y Rodríguez, s.a.).

#### **1.4.4.3 Digestores anaerobios.**

La materia orgánica y el estiércol del ganado pueden transformarse en energía utilizable. Dicha energía se conoce como energía de biomasa, la cual es posible aprovechar como fuente de electricidad y gas. El aprovechamiento de la materia orgánica contenida en el excremento animal es posible mediante la descomposición que llevan a cabo bacterias anaeróbicas. Durante el proceso se produce Gas Metano, bióxido de carbono, hidrógeno, nitrógeno y ácido sulfhídrico, que pueden ser almacenados en contenedores sellados a los que generalmente se conoce con el nombre de Digestores Anaeróbicos. El Gas Metano obtenido se utiliza como combustible, ya sea para cocinar, calentar agua, calefacción, y principalmente como fuente de energía eléctrica. Los subproductos

del proceso en la obtención de Gas Metano: nitrógeno, fósforo y potasio, son fertilizantes orgánicos. (Bradfer, 2003).

El sistema en los Digestores Completos de Mezclas consiste en dos tanques: mezclador y digestor, así como un tercer depósito para almacenamiento y evaporación. El tanque mezclador puede estar, ya sea debajo o sobre la superficie del terreno, y es llenado constantemente con excremento de los animales. Se utiliza una hélice giratoria en el tanque mezclador, para evitar que los sólidos queden en el piso interior del tanque antes de ser llevados hacia el tanque digestor. En éste sistema es esencial mantener un flujo y volumen constante de estiércol en ambos tanques, el mezclador y el digestor. En el tanque digestor, una bomba mezcladora hace circular el excremento alrededor para mantener la temperatura uniforme. Así mismo, puede utilizarse el calor que se genera y recupera durante el proceso, para mantener la temperatura en el digestor y optimizar la producción de Bio-Gas. (Bradfer, 2003).

El desarrollo de Digestores Anaeróbicos que procesan el estiércol del ganado para obtener gas y electricidad, continúa incrementándose de manera notable en países como China, Estados Unidos y Europa. Los factores que han ejercido mayor influencia sobre la demanda acelerada de Digestores Anaeróbicos son: el incremento en la confiabilidad técnica, y en el desarrollo exitoso de los sistemas operativos durante los últimos cinco años; una mayor conciencia acerca de la calidad ambiental; los apoyos gubernamentales en esos países con relación a éste tipo de sistemas; las políticas sobre energía diseñadas en esos países para promover fuentes de energía limpia y renovable; y el incremento en el costo de la energía no renovable procedente del petróleo.

#### **1.4.4.4 Principio del digestor anaeróbico.**

El digestor anaeróbico (sin aire) es un reactor que realiza una fermentación acelerada de las materias orgánicas biodegradables mediante bacterias heterogéneas anaeróbicas (que no necesitan el oxígeno del aire para vivir, alimentarse y reproducirse) y microorganismos anaerobios facultativos (activos también en medio aerobio). El resultado final es la transformación de la materia en gas llamado biogás con un contenido normal de 30 a 35% en CO<sub>2</sub>, 65 a 70% en CH<sub>4</sub> y lo restante H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>S, entre otros. Los parámetros importantes para el diseño de los digestores son la tasa de aplicación (kg DQO/m<sup>3</sup>/día) en el caso de alimentación en continuo, o carga orgánica específica (kg DQO/kg SSV/día) en el caso de procesos discontinuos, los cuales consideran la biomasa presente en el digestor (como SSV). La velocidad de transformación de la

materia orgánica (MO) en biogás es mayormente función de la temperatura del medio, y del factor  $S_0/X_0$  que corresponde al ratio entre la cantidad de materia orgánica introducida dentro del digestor y de la concentración de biomasa para el caso reactor tipo ASBR<sup>5</sup>. A temperatura ambiental (10 a 20 °C) la actividad de fermentación ya existe, pero aumenta con la temperatura hasta un óptimo comprendido entre 30 y 40 °C. Más allá, la actividad disminuye. La alimentación en MO debe ser controlada. Un exceso de alimento provoca una disminución del rendimiento del digestor hasta su completa ineficiencia y el riesgo de inhibir totalmente las bacterias productoras de metano, debido a la aparición exagerada de ácidos grasos volátiles (AGV) inhibidores de la metanogénesis. Estos son producidos por las bacterias acidogénicas que tienen una cinética de transformación superior a la metanogénesis. (Bradfer, 2003).

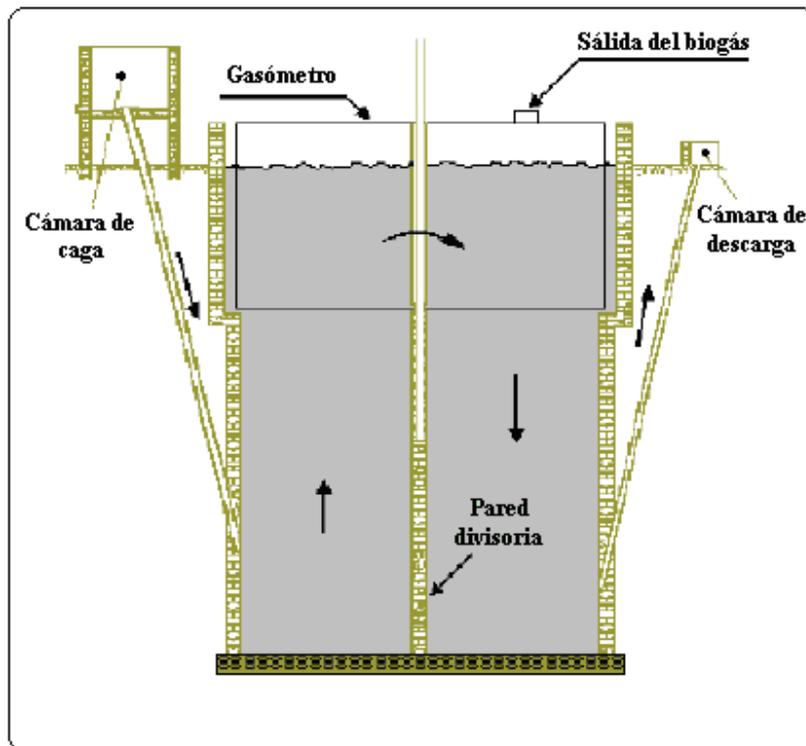
#### **1.4.4.5 Minibiodigestores.**

Estos biodigestores son utilizados, fundamentalmente, para obtener biogás a partir de residuos domésticos y/o residuos agropecuarios. En el primer caso sirven a una familia, o a pocas personas si son varias familias, y en el segundo caso, a pequeñas instalaciones pecuarias. En general éstos consisten en fosas o pequeños tanques que funcionan, casi siempre, en forma semicontinua.

En general no son altamente eficientes desde el punto de vista de la biodegradación de los residuos y además necesitan elevados tiempo de retención para lograr un buen comportamiento del proceso. Los minibiodigestores más utilizados a nivel mundial son los de tipo hindú o los del tipo chino, existiendo cientos de miles y millones, respectivamente.

Los minibiodigestores operan bajo el principio hidrostático de que la entrada de la carga diaria de residual al biodigestor por gravedad hasta el fondo del tanque, además de producir agitación, provocada la salida de un volumen equivalente de lodos digeridos.

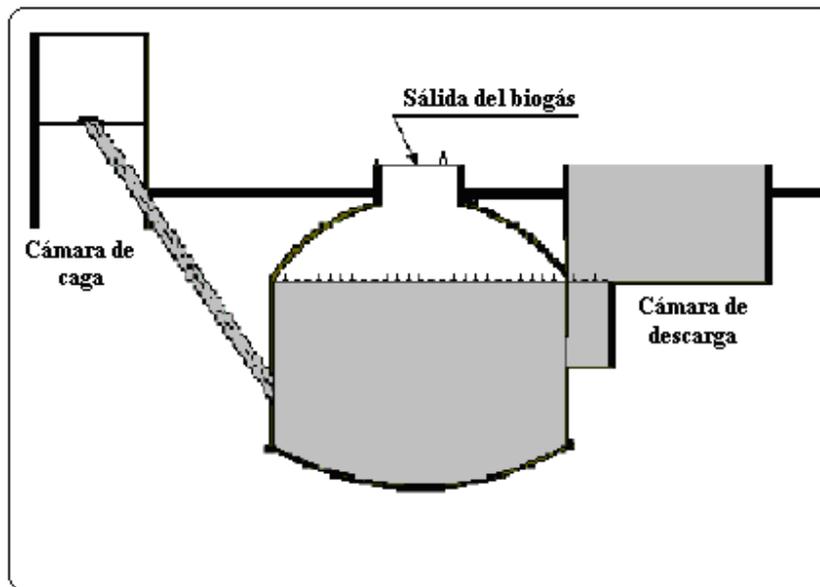
El biodigestor tipo hindú consiste en un tanque reactor vertical que tiene instalado una campana flotante recolectora de biogás. De esta forma, la presión del gas sobre la superficie de la mezcla es muy baja, de alrededor de 300 mm de columna de agua. Con esta campana se logra, además, una presión constante, lo que permite una operación eficiente de los equipos a los que alimenta. La campana también ayuda al rompimiento de la espuma que se forma en muchos biodigestores. En este biodigestor se alcanzan productividades volumétricas ( $P_v$ ) de 0.5 a 1m<sup>3</sup> de biogás/volumen de reactor por día. Un esquema de dicha instalación se muestra en la Figura 1.



**Figura 1. Biodigestor modelo hindú.**

El biodigestor tipo chino no tiene campana flotante, sino techo fijo para la recolección del biogás. Son tanques redondos y achatados con el techo y el piso en forma de domo. En este caso, a medida que aumenta la producción de gas, aumenta la presión en el domo o cúpula fija, forzando al líquido en los tubos de entrada y salida a subir, llegándose a alcanzar presiones internas de hasta más de 10 mm de columna de agua. Como consecuencia de la variación de presión, la que aumenta al generarse el gas y disminuye al consumirse éste, se reduce la eficiencia en los equipos consumidores. La  $P_v$  en los biodigestores chinos está, generalmente, entre  $0.15$  y  $0.2 \text{ m}^3 / \text{m}^3 \cdot \text{d}$ . Un esquema de dicha instalación se muestra en la figura 2.

Los tiempos de retención de operación para los biodigestores tipo chino son de 30 a 60 días, requiriéndose para alcanzar la misma eficiencia (máximo 50% de reducción de la materia orgánica) de  $1/2$  a  $1/3$  de este tiempo de retención en los biodigestores tipo hindú.

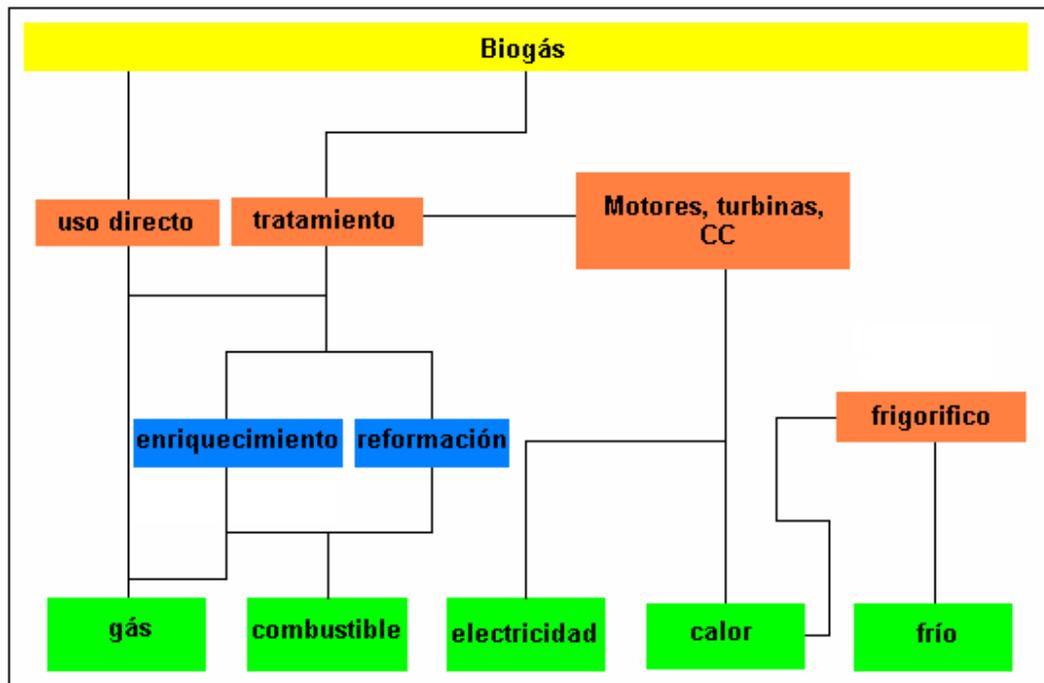


**Figura 2. Biodigestor modelo chino.**

Existen diferentes maneras de clasificar los reactores anaerobios que procesan aguas residuales, pero la forma más general es agruparlos y clasificarlos en biodigestores. (Urbáez... et al. s.a.).

#### **1.4.4.6 Aplicaciones de la digestión anaerobia.**

La digestión anaerobia es considerada como una de las fuentes de energía más económicas y de fácil adquisición para pequeñas comunidades. El biogás obtenido puede ser utilizado para múltiples aplicaciones: cocción de alimentos, iluminación, refrigeración, calefacción ambiental para uso residencial y comercial, calor útil para procesos industriales, echar andar bombas de agua y otras maquinarias agrícolas, motores de combustión interna para energía motriz, y generación de electricidad tal como lo muestra en la figura 3:



**Figura 3. Aplicaciones de la digestión anaerobia.**

Entre los factores que determinan el uso de la digestión anaerobia como una alternativa viable que garantiza una fuente de energía renovable y confiable más limpia podemos citar los siguientes: ayuda a mitigar el cambio climático, al prevenir que el metano sea liberado en el aire. Reduce la contaminación del agua, al usar las materias primas que podrían terminar en ríos o lagos. La materia prima es de fácil recuperación en ganado estabulado o donde los costos laborales son bajos. Es económicamente viable con un abastecimiento regular de estiércol de ganado o de otra materia prima. Requiere un área pequeña, en comparación con la disposición de los desechos municipales sólidos. Incrementa las condiciones de higiene. Reduce las molestias causadas por el olor. Ayuda a reducir las plantas, que como los lirios acuáticos se han vuelto una plaga. Además del combustible, el proceso de fermentación proporciona lodos residuales que pueden usarse como alimento para animales o como abono de excelente calidad y de más rápida producción, contribuyendo de esta manera a la conservación y el sostenimiento de la fertilidad del suelo.

Aplicación de la digestión anaerobia para el tratamiento de aguas residuales industriales.

Los procesos de digestión anaerobia están siendo aplicados actualmente en más de 70 países, en donde se encuentran instalados más de 2000 plantas a escala industrial. Un reciente estudio bibliográfico, que utiliza una base de datos constituida por una selección de 1215 plantas

anaerobias, ha puesto de manifiesto: La evolución del número de plantas anaerobias con el tiempo ha crecido de manera exponencial desde el año 1980 hasta el 2001. (Urbáez... et al. s.a.).

#### **1.4.4.7 Tratamiento anaerobio de aguas residuales urbanas en planta piloto.**

La digestión anaerobia es una alternativa cada vez más consolidada y utilizada, especialmente en el tratamiento de efluentes de media y alta carga. Las principales ventajas de la digestión anaerobia frente al tratamiento aerobio son la producción de biogás que, en general, satisface las demandas energéticas de la planta o incluso puede llegar a generar una cantidad extra de energía, y una escasa producción de lodo en exceso. Además, la digestión anaerobia se puede aplicar tanto en tratamientos centralizados como descentralizados, al tiempo que constituye un tratamiento de bajo coste. La aplicación de la digestión anaerobia al tratamiento de aguas residuales de baja carga es más novedosa y solo se considera consolidada en el caso de países tropicales, puesto que a temperaturas inferiores a 20° C (caso de Galicia), la tecnología anaerobia no está suficientemente desarrollada y la eficacia de tratamiento de efluentes de baja carga, es insuficiente. (Álvarez, 2003)

#### **1.4.4.8 Uso de la digestión anaerobia en algunos países.**

Países en vías de desarrollo.

La tecnología del biogás es conocida en la mayoría de los países en vías de desarrollo, misma que ha alcanzado un extenso uso en las últimas décadas.

Los biodigestores en estos países son generalmente alimentados con estiércol animal, un recurso biomásico con un gran potencial. También se han instalado con éxito unidades más pequeñas, alimentadas con los desperdicios de las cocinas, lirios acuáticos, excremento humano y paja.

China es un líder mundial en la aplicación de las tecnologías de la digestión anaerobia. En los años de 1970, el gobierno chino desarrolló el primer programa de biomasa a gran escala cuando instaló: 7 millones de biodigestores, principalmente en la provincia cálida y húmeda de Sechuán, que proporcionan biogás para cocinar y alumbrar a unos 25 millones de chinos; y, alrededor de 10,000 biodigestores de tamaño grande y mediano que suministran electricidad a las granjas.

El segundo programa más grande fue lanzado en la India, donde en 1985 se instalaron 280,000 biodigestores de pequeña escala. Aún cuando en ese país se encuentran en uso varios modelos de

plantas de biogás, la "Deenbabdhu" (que significa amigo del pobre) ha sido rigurosamente probada en diferentes condiciones agroclimáticas, y es considerada como la más fuerte y barata. La India está empezando a producir biogás a partir de los desechos industriales. Un gran número de granjas lecheras, que durante muchos años habían sido una fuente importante de contaminación para los ríos, está usando ahora la metanización para procesar el estiércol animal y otros desechos, y el biogás resultante se usa para generar energía. En la actualidad se han instalado también plantas para el uso de las aguas residuales de algunas destilerías.

Países desarrollados.

Los países industrializados tienen algunos programas de divulgación para el uso de los biodigestores, y han construido biodigestores más grandes y con un control más elaborado. En estos países, los biodigestores de metano tienden más a usar los lodos de aguas residuales, los desechos municipales sólidos o las aguas orgánicas residuales de origen industrial (procesamiento alimenticio, lecherías, cervecías, farmacéuticas, pulpa y papel y producción de alcohol). Alemania, por ejemplo, ha implementado la primera planta piloto completa en un sistema vitivinícola sostenible que, con el fin de satisfacer su demanda de electricidad, usa las aguas residuales y los desechos para obtener energía a través de la conversión anaerobia. Algunos países, como Suecia, están usando en la producción de biogás también los subproductos de cultivos que tienen un bajo contenido de lignina, tales como el trigo y la alfalfa. Se ha encontrado que este último es un cultivo preferible debido a los bajos costos de sus insumos. El gas producido en los rellenos sanitarios está continuamente cobrando importancia. Existen algunas plantas generadoras de energía que ya están operando en Austria, Francia, Finlandia, el Reino Unido y los Estados Unidos. El gas es usado tanto para la generación de electricidad en motores de diesel modificados, o como una fuente de calor en procesos industriales. (Urbáez... et al. s.a.).

## **Capítulo 2. Metodología de la investigación.**

Se emplearon para el desarrollo de la investigación métodos empíricos y teóricos. Dentro de los métodos teóricos se aplicó el de análisis-síntesis, cuando se realizó el análisis documental descrito con anterioridad y a partir de éste se formuló la organización del taller; inductivo- deductivo, cuando se organizaron los ejercicios a partir del estudio de la literatura científica de los temas que corresponden a la asignatura de referencia; análisis sistémico, cuando se incorporan contenidos de diferentes asignaturas del currículo del ingeniero químico con un enfoque integral.

El método empírico se empleó cuando se efectuaron intercambio con los expertos, que en el caso que se analiza fueron el claustro de profesores de la carrera de Ingeniería química, el profesor de la asignatura Fundamentos de automatización (Dr. C José Luis Ybáñez), el profesor de la asignatura Reactores heterogéneos (Dr. C Mario Yll Lavín), la profesora jefa de la carrera (MSc. María del Carmen Sánchez Russynol), el profesor que atiende la estrategia pedagógica (Dr. C Andrés Hassan Hernández), la profesora de Tratamiento de aguas y residuales (Dr. C Juana Zoila Junco Horta), el profesor de la disciplina Fundamentos químicos y biológicos (Dr. C Marcelo Marcet Sánchez) y profesores del centro de estudio de combustión y energía.

Se toma como base el plan de estudio D y la asignatura Tratamiento de aguas y residuales que se imparte en el segundo semestre de tercer año de la carrera de ingeniería química.

Se realiza un estudio profundo de la documentación, que describe todo lo referente al plan de estudio, al reglamento docente metodológico y lo reportado por la literatura científica, acerca de los temas que son objeto de análisis de aplicación del currículo del ingeniero químico.

El aspecto fundamental de la investigación consiste, en la proyección sobre el proceso docente educativo concebido en el plan D, donde se enfatiza las orientaciones metodológicas para lograr una mayor independencia del estudiante, en la adquisición de conocimientos y desarrollo de habilidades y valores que debe poseer el profesional egresado de la educación superior cubana.

Para materializar esta aspiración a través de la presente tesis, se decide desarrollar el estudio sobre la forma de enseñanza taller y la organización del mismo, con el objetivo metodológico de integración inter e intradisciplinar de los contenidos de las diferentes asignaturas y disciplinas, que conforman el currículo del ingeniero químico, que mantengan puntos de contacto con la asignatura tratamiento de aguas y residuales.

Del análisis del plan de estudio se constata que la asignatura Reactores heterogéneos es la de mayor correspondencia con la asignatura de referencia, por lo cual adquiere mayor importancia el estudio por tratarse de asignaturas que se imparten en diferentes semestres del plan curricular, una en segundo semestre del tercer año y la segunda en el primer semestre del quinto año. Esto requiere desarrollar valores para que los estudiantes sean capaces de adquirir conocimientos por sí mismos expresado en la independencia mostrada al analizar situaciones que requieren el empleo de conocimientos provenientes de las diferentes partes de la asignatura, y de integrarlos de manera que contribuyan al logro de un objetivo único como lo establece el plan de estudio D. Se analiza también la interrelación con otras asignaturas.

Para la estructuración de la actividad docente se concibe la inclusión de acciones de montaje y utilización de instrumentos para la medición de los gases generados en un digestor anaerobio piloto como se muestra en las figura 2.4 presentada en el anexo.

**La asignatura que se toma como referencia para el desarrollo de la investigación, como se había señalado, es Tratamiento de aguas y residuales. Se describe a continuación toda la información referente a la misma.**

#### **Tratamiento de aguas y residuales.**

##### **Objetivos instructivos de la asignatura.**

Que los estudiantes sean capaces de aplicar a un nivel productivo los principios de las ciencias básicas, ciencias de ingeniería, los conceptos fundamentales de la ingeniería química y los principios de operaciones unitarias a: la evaluación de programas de acción para la protección y educación medio ambiental, la evaluación de sistemas industriales basados en los principios de la minimización de desechos y de la ecología industrial, la selección, cálculo y evaluación de tecnologías con vistas a la purificación de aguas de uso industrial y al tratamiento de residuales de la industria química.

##### **Contenidos de la asignatura.**

- Sistema de conocimientos.

Principales problemas medioambientales a nivel nacional y mundial. Composición y características físicas, químicas y microbiológicas de las aguas naturales. Operaciones de cribado de rejas, de sedimentación de partículas discretas y de filtración en medio granular. Procesos de coagulación, cloración, ablandamiento y desmineralización por intercambio iónico, oxidación y reducción

química. Tratamiento microbiológico de aguas residuales mediante lagunas de oxidación, filtros percoladores, reactores con lodo activado y digestores.

- Sistema de habilidades.

Explicar los principales problemas ambientales en el ámbito nacional e internacional. Explicar las principales características físicas, químicas y microbiológicas de las aguas naturales. Seleccionar, calcular y evaluar los métodos, tecnologías y tratamientos para la purificación de aguas de uso industrial y de residuales líquidos y gaseosos con vistas a la minimización de desechos, y de prevención de contaminación ambiental.

- Sistema de valores.

Contribuir a que el estudiante desarrolle valores tales como:

El sentido de responsabilidad, a través del cumplimiento de las tareas y trabajos extra-clases en los tiempos establecidos y con la calidad requerida. La disciplina, por la puntualidad en las actividades en que debe participar y por el desempeño de una conducta apropiada a la naturaleza de estas, tales como: conferencias, clases prácticas. Una conducta ética expresada por el respeto con que asume las tareas a desarrollar dentro y fuera del aula y por el celo por fundamentar científicamente los análisis realizados. Una sensibilidad estética que contribuya a una personalidad capaz de disfrutar de la limpieza, el orden y la belleza; sensibilidad expresada en el cuidado del puesto en la elaboración de sus informes. Capaz de adquirir conocimientos por sí mismo expresado en la independencia mostrada al analizar situaciones que requieren el empleo de conocimientos provenientes de las diferentes partes de la asignatura, y de integrarlos de manera que contribuyan al logro de un objetivo único. Con un alto sentido de su responsabilidad profesional, dado por el rigor y por el esfuerzo personal que ponga en realizarlo a cabalidad. (Garcell, s.a.).

**Se presentan a continuación la descripción de las características de las asignaturas del currículo que presentan coincidencias con la asignatura de referencia.**

**Reactores heterogéneos.**

**Objetivos instructivos de la asignatura.**

Que los estudiantes sean capaces de seleccionar el tipo de reactor, las dimensiones y / o los parámetros característicos de los reactores heterogéneos.

**Contenido de la asignatura.**

- Sistema de conocimientos.

Análisis y diseño de reactores. Modelos cinéticos para reacciones de fermentación. Elementos de un biorreactor.

- Sistema de habilidades.

Interpretar el efecto de las variables de operación sobre la velocidad global de reacción y sobre el comportamiento de los reactores.

- Sistema de valores.

Contribuir a que el estudiante desarrolle valores tales como: alto sentido de responsabilidad profesional, expresado al valorar los efectos causados por los reactores empleados en los sistemas fluido- sólido no catalíticos en nuestro país , de no tomarse medidas rigurosas en relación con sus residuales y el medio ambiente.

Con una percepción muy clara de cómo la defensa del país se realiza también desde el ámbito de la actuación profesional , percepción lograda a través de los análisis realizados sobre reactores catalíticos y el efecto destructor que sobre la vida del catalizador pueden ocasionar condiciones de trabajo impropias.

Capaz de adquirir conocimientos por sí mismo, capacidad expresada en la independencia mostrada al analizar situaciones que requieren el empleo de conocimientos provenientes de las diferentes partes de la asignatura, y de integrarlos de manera que contribuyan al logro de un objetivo. (Garcell, s.a.).

**De acuerdo a que se contemplará el montaje de instrumentos para la evaluación de los gases que genera la digestión anaerobia se presenta la información referida a la disciplina Fundamentos de Automatización.**

### **Instrumentación industrial.**

#### **Objetivos instructivos de la asignatura.**

Utilizar a un nivel reproductivo los conceptos y fundamentos de automatización en: especificar las características de los instrumentos de medición y control requeridos para un proceso, determinar los elementos primarios de medición necesarios para el montaje de un sistema de control, selección del tipo y lugar de la medición.

#### **Contenido de la asignatura.**

- Sistema de conocimientos.

Procedimientos de verificación y calibración de los instrumentos.

### **Controles para procesos.**

#### **Características de mayor correspondencia con la asignatura de referencia.**

#### **Objetivos instructivos de la asignatura.**

Utilizar a un nivel productivo los principios fundamentales de la automatización en: determinar las condiciones de medición necesarias para realizar balances de masa y energía en plantas existentes, establecer las condiciones necesarias de control de un proceso tecnológico.

#### **Contenido de la asignatura.**

- Sistema de habilidades.

Plantear alternativas de esquemas de control y proponer las más convenientes. Confeccionar el esquema de instrumentación y control de procesos.

Indicar físicamente los distintos tipos de instrumentos de medición y control construidos con las tecnologías vigentes.

Proponer las nuevas condiciones de un sistema para lograr la mejora de la efectividad del control. (J' de Disciplina FAU s.a.).

Se declaró como palabras claves para el estudio de la literatura científica que aborda los temas que constituyen puntos de contacto con la asignatura de referencia para la investigación, como comprobación de la aplicación de la teoría que sustenta dicha asignatura en la práctica social, tanto industrial como laboral e investigativa: digestión anaerobia, biogás, digestores anaerobios, principio del digestor anaeróbico. Biodigestor, tratamiento de aguas residuales, reactores biológicos, contaminación ambiental, impacto ambiental.

A partir del estudio bibliográfico y de la profundización de las orientaciones que se presentan en el plan de estudio, el reglamento docente metodológico y las especificidades de las asignaturas objeto de estudio se estructura la actividad docente en la forma de enseñanza taller que se describe en el capítulo tres.

## **Capítulo 3. Documentación correspondiente a la preparación de asignatura OPU IV para el desarrollo del taller. Ejercitación**

### **3.1 Comparación de contenidos abordados en la asignatura Tratamiento de agua y aguas residuales con la asignatura Reactores heterogéneos.**

Del estudio bibliográfico se aprecia que los contenidos que comprenden la asignatura Tratamiento de aguas y residuales, donde se enfatiza la problemática ambiental los aspectos referidos al tratamiento de las aguas residuales para atenuar el impacto ambiental negativo que implicaría sus vertimientos al entorno sin previo tratamiento se efectúa mediante tratamientos primarios, secundarios y terciarios que incluyen los tratamientos biológicos aerobios y anaerobios. Los fundamentos de estos tratamientos están sustentados sobre la acción de los microorganismos. Se realizan cálculos requeridos para el diseño de dichos sistemas y se realizan actividades prácticas de laboratorios, clases prácticas, seminarios, conducentes a desarrollar en el estudiante su capacidad de análisis y concreción de las soluciones a dichas problemáticas.

Las ecuaciones y teorías que se emplean cuando se aplica la teoría de los digestores anaerobios y reactores aerobios en la asignatura tratamiento de aguas y residuales, tienen plena correspondencia con la teoría y ecuaciones aplicadas en la asignatura reactores heterogéneos. De ahí la importancia de concebir en la preparación de la asignatura los puntos comunes de ambas asignaturas y establecer acciones que implique la adquisición de conocimientos de forma independiente no impartido en la clase como es el caso que se analiza, los cuales guardan cuatro semestres de diferencia en el momento de su impartición.

#### **3.1.1 Tratamiento de Aguas y Residuales.**

Cinética del crecimiento celular es uno de los aspectos que se abordan en la asignatura de Tratamiento de aguas y residuales, cuando se brinda la fundamentación de la oxidación biológica de la materia orgánica por parte de los microorganismos en los sistemas de tratamientos biológicos. El tema crecimiento celular está asociado directamente a este tópico. (Díaz, 2006).

Las explicaciones de estos procesos incluyen además lo concerniente a la velocidad de producción de células microbianas y las ecuaciones que describen estos procesos. Se especifica las

terminologías *consumo de un sustrato limitante* en función de las *concentraciones másicas* de estos dos componentes  $\rho_x$  y  $\rho_y$  y en cada instante de tiempo:

$$\frac{d\rho_x}{dt} = f(\rho_x, \rho_s) \quad (\text{ec 3.1})$$

El modelo de Monod, contempla el estudio de cultivo continuo donde se logra desarrollar una ecuación semiempírica que describe, de manera muy adecuada, este comportamiento:

$$\frac{d\rho_x}{dt} = \mu_{\max} \frac{\rho_s \cdot \rho_x}{K_s + \rho_s} \quad (\text{ec 3.2})$$

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.

La velocidad máxima de crecimiento ( $\mu_{\max}$ ) 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 ( $1/2 \mu_{\max}$ ).

Otros aspectos de interés sobre este tema es lo referido a la 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:  $C_5 H_7 O_2 N$ . A partir de esta fórmula se pueden realizar balances estequiométricos de las diferentes biorreacciones para cada sustrato en particular. Sin embargo, muchos especialistas prefieren hacer uso de un coeficiente empírico ( $Y$ ) equivalente a la conversión másica de sustrato en biomasa:

$$Y = \frac{\rho_x - \rho_{x_0}}{\rho_{s_0} - \rho_s} \quad (\text{ec 3.3})$$

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

$$\frac{d\rho_x}{dt} = -Y \frac{d\rho_s}{dt} \quad (\text{ec 3.4})$$

de donde resulta finalmente:

$$\frac{dP_S}{dt} = -\frac{\mu_{max}}{Y} \frac{P_S \cdot P_X}{K_S + P_S} \quad (\text{ec 3.5})$$

la relación  $\mu_{max} / Y$  por el término  $k$ , que representa la tasa máxima de utilización del sustrato por unidad de microorganismos:

$$\frac{dP_S}{dt} = -k \frac{P_S \cdot P_X}{K_S + P_S} \quad (\text{ec 3.6})$$

Otro contenido abordado en la asignatura de Tratamiento de Aguas y Residuales es el 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.

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

$$\frac{dP_X}{dt} = \mu_{max} \frac{P_S \cdot P_X}{K_S + P_S} - k_d \cdot P_X \quad (\text{ec 3.7})$$

El efecto de la temperatura sobre la velocidad de biorreacción se describe a continuación. Existe una fuerte dependencia de con la temperatura, por lo cual los coeficientes cinéticos se deben determinar a una temperatura constante y conocida. Generalmente en la literatura los coeficientes se reportan a una temperatura de referencia de 20 °C. La siguiente ecuación permite extrapolar la cinética del proceso a otras temperaturas:

$$\frac{r_T}{r_{20}} = e^{(T-20)} \quad (\text{ec 3.8})$$

donde  $r_T$  y  $r_{20}$  son las velocidades de producción de células y de consumo de sustrato a la temperatura deseada (T) y a la temperatura de referencia (20 °C) respectivamente. El coeficiente

de actividad - temperatura (?) ha sido reportado ampliamente en la literatura para diferentes situaciones y para los principales sistemas de tratamiento, la siguiente tabla 3.1.

Tabla 3.1 Coeficientes de actividad – temperatura.

| Proceso              | Coeficiente de actividad - temperatura ( $\theta$ ) |              |
|----------------------|-----------------------------------------------------|--------------|
|                      | Intervalo                                           | Valor típico |
| Lodo activado        | 1,00 - 1,04                                         | 1,02         |
| Lagunas de oxidación | 1,06 - 1,12                                         | 1,08         |
| Filtros percoladores | 1,02 - 1,14                                         | 1,08         |

### 3.1.2 Reactores.

#### Cinética de las fermentaciones.

En la asignatura de reactores heterogéneos también se tratan los temas acerca de la cinética del crecimiento celular con un solo sustrato como limitante explicado a través del modelo de Monod.

Las expresiones utilizadas en esta asignatura para desarrollar esos conceptos se relacionan a continuación.

$$dX/dt = V_{\text{máx}} X (S / (K_S + S)) \quad (\text{ec 3.9})$$

X = concentración de células (g/l)

S = concentración de sustrato limitante del crecimiento (g/l)

t = tiempo (h)

V máx = velocidad específica de crecimiento máxima (h<sup>-1</sup>).

Por definición de velocidad específica de crecimiento:

$$V = (1/X) (dX/dt) \quad (\text{ec 3.10})$$

$$V = V_{\text{máx}} ( S / (K_S + S) ) \quad (\text{ec 3.11})$$

Coeficientes específicos de mantenimiento.

Las células utilizan el sustrato no solamente para crecimiento, sino también para mantener sus funciones vitales. Un determinado consumo de sustrato: (S<sub>0</sub> – S) no producirá un aumento proporcional de biomasa (X – X<sub>0</sub>), una parte de ese consumo es utilizada para mantener las

funciones vitales: trabajo osmótico para mantener los gradientes de concentración de sustancias entre el interior y el exterior de la célula, las modificaciones de componentes celulares que requieren energía.

El estudio cinético de un proceso fermentativo consiste en el análisis de la evolución de los valores de las concentraciones de uno o más de los componentes del sistema de cultivo, en función del tiempo de fermentación.

$$X = X(t), P = P(t), S = S(t).$$

El microorganismo es el agente activo que promueve la transformación de los sustratos

$$X = X(t), P = P(t), S = S(t).$$

El microorganismo es el agente activo que promueve la transformación de los sustratos en productos gracias a las actividades de miles de enzimas, que a su vez son sintetizadas por el propio microorganismo. Resultará muy difícil identificar cuál medida o medidas son realmente representativas de la transformación en estudio ej. Sistemas de tratamiento biológico de residuos.

Hay sistemas de fermentación donde la medida de biomasa no es simple de realizar (ej. FSS, flóculos, células inmovilizadas, entre otros). (Yll, 2009).

Como se aprecia se utilizan las mismas expresiones con diferencias en las simbologías empleadas.

Se considera, por tanto, que en la asignatura tratamiento de agua se le brinda a los estudiantes informaciones de la aplicación práctica de estas teorías para la actividad industrial, y de los servicios a través de los cuales se motive a los mismos, sobre la importancia de los contenidos que están recibiendo en esta asignatura cuando reciben la asignatura de reactores hagan referencia a los contenidos recibidos dos años atrás.

Si se analiza el aspecto referido a la acción de los microorganismos en los tratamientos biológicos, resalta la importancia de vincular la asignatura con la disciplina Fundamentos químicos y biológicos que a su vez también sustentan la teoría de los biorreactores. En este caso resulta menos complejo establecer la relación porque dichos contenidos tienen precedencia a la asignatura tratamiento de aguas y residuales.

Otras correspondencias se tienen con la disciplina Preparación para la defensa cuando se aborda que el estudiante sea capaz de ver en qué consiste la contaminación ambiental, los principales

contaminantes y las medidas para evitarlas, el plan de medidas contra catástrofe, las consecuencias de los principales tipos de desastres y las medidas de Defensa Civil que deben adoptarse ante esta situación.

La disciplina Ingeniería de procesos, como disciplina principal siempre tendrá relación con las restantes asignaturas del currículo dentro de las que se incluyen las que son objeto de estudio.

En la forma de enseñanza seleccionada para la investigación, taller, se persigue que los estudiantes brinden solución a los problemas de su esfera de actuación con un enfoque sistémico, teniendo un carácter integrador y generalizador dado que los fundamentos teóricos que utiliza y los problemas que analiza proceden de diferentes campos.

Esta actividad incluye autopreparación de los estudiantes con los materiales técnicos disponibles a los cuales se accede a través de plataforma interactiva con el MOODLE, las guías de orientación para el desarrollo de la actividad y la confección de informes. Esta ejercitación hace énfasis en la interrelación inter e intradisciplinar. De esta forma se da cumplimiento a las indicaciones metodológicas del plan de estudio acerca de cómo debe desarrollarse los talleres: “En los talleres debe lograrse la vinculación de un tema principal abordado con otros complementarios propios de la disciplina o pertenecientes a otras disciplinas e integrar los conocimientos recibidos en la disciplina”. (Plan D).

La inclusión de la aplicación de la forma de enseñanza taller contribuye a que el estudiante desde ese año adquiera una preparación más integral, ya que en la actualidad la asignatura solo se imparte los contenidos reflejados en el programa sin ninguna alusión a los aspectos que tratarán en quinto año.

Finalmente reiterar que estos aspectos debatidos sustentan la pertinencia de desarrollar la actividad de taller, para lo cual se formulan a continuación ejercicios a tener en cuenta para el desarrollo del mismo, para dar cumplimiento a lo señalado por (Hassan, 2009): dada la especificidad de cada elemento del contenido y su relación con los procesos de aprendizaje, se impone la necesidad de organizar un sistema de tareas docentes diversas, de manera que en las mismas se eliciten diferentes acciones de aprendizaje en función de la apropiación de todos los contenidos, (en este caso, los valorativos) garantizando siempre la adecuada relación e integración entre los mismos.

También es importante en la formulación de los objetivos de los ejercicios lo expuesto por dicho autor: la determinación de los problemas de enseñanza-aprendizaje permite al profesor o profesora partir del conocimiento de ciertas condiciones en las que habrá de transcurrir el proceso, plantearse

objetivos que le orienten en el fin a lograr, y facilitarle a los alumnos que también se planteen los suyos. A través del logro de los objetivos “se puede transformar el objeto y satisfacer las necesidades resolviendo el problema”. (Hassan, 2009).

Dada la especificidad de cada elemento del contenido y su relación con los procesos de aprendizaje, se impone la necesidad de organizar un sistema de tareas docentes diversas, de manera que en las mismas se eliciten diferentes acciones de aprendizaje en función de la apropiación de todos los contenidos, (en este caso, los valorativos) garantizando siempre la adecuada relación e integración entre los mismos.

Orientación de la preparación previa de los estudiantes para el desarrollo del taller en la clase de conferencia que precede la actividad. Se propone en el encuentro cinco que desarrolla el tema Métodos y tecnologías para el tratamiento de aguas residuales. A través de la plataforma interactiva Moodle podrán revisar la información referente al tema que incluye la propuesta de 19 ejercicios.

El desarrollo del taller concebido para tres horas de clase, y sus contenidos a desarrollar son las generalidades sobre métodos para el tratamiento de aguas industriales, lo que conlleva en primer instancia la introducción de la clase un recorrido por las instalaciones donde se encuentra los biorreactores (como se muestra en la figura 2.1 del anexo), un debate donde los estudiantes brinden sus consideraciones al respecto y la ejercitación de los ejemplos

Como actividad final del encuentro se hace una generalización de los aspectos teóricos tratados y se orienta la presentación del informe final que desarrollarán de forma extracurricular.

La evaluación del taller contemplará la participación en la actividad presencial y el informe final que presentarán a través de la plataforma Moodle.

Como se plantea por (Horruitiner, 2008) en la página 197, los ejercicios evaluativos integradores, así denominados, constituyen una forma superior de evaluación del estudiante, porque permiten conocer con mayor precisión su dominio de los modos de actuación profesional y los prepara mucho mejor para su ejercicio de culminación de estudios y para su futura actividad profesional.

Se presentará como continuidad del taller que se contemplan como práctica laboral la instalación del instrumento Medidor de flujo como lo muestra la figura 2.4 en el anexo.

### 3.2 Propuesta de conjuntos de ejercicios a incorporar como parte de la actividad de taller a establecer.

#### Ejercicio 1.

Sobre las expresiones utilizadas para el diseño de digestores biológicos más empleados en la asignatura de Tratamiento de Aguas y Residuales reportados en su libro de texto Tratamiento de aguas y aguas residuales (Díaz, 2006) que se presenta a continuación, responda:

1. Correspondencia de los términos empleados como criterios de diseño con la teoría que trata la asignatura reactores heterogéneos expuestos en la información presentada en la plataforma Moodle.
2. Exponga dos ejemplos de aplicación práctica de diseño de sistemas de tratamientos de residuales.
3. Establezca similitudes y diferencias de los digestores existentes en la UMCC con los que aborda la problemática del ejercicio 1.
4. Brinde sus consideraciones acerca de la aplicación de estas teorías a la práctica real en el territorio o en el país a partir de referencias bibliográficas en informes técnicos o imágenes.
5. Plantee los principios, habilidades, valores y objetivos que se cumplen en la formación del estudiante al realizar el ejercicio.

Métodos de diseño.

Métodos de reducción de volumen.

$$V = [Q_f - 2/3 (Q_f - Q_d)] t. \quad (1.1)$$

donde:

V: Volumen requerido de digestor ( $m^3$ ).

$Q_f$ : Volumen de lodo fresco adicionado por día ( $m^3 \cdot d^{-1}$ ).

$Q_d$ : Volumen de lodo digerido extraído por día ( $m^3 \cdot d^{-1}$ ).

t: Tiempo de digestión (d).

Método en base poblacional.

$$V = (PO) V_e \quad (1.2)$$

donde:

PO: Población equivalente.

$V_e$ : Volumen de digestor requerido por habitante ( $m^3$ ).

Método del tiempo de residencia medio celular.

$$\mu_{obs} = \mu_m S / (K_S + S) - b. \quad (1.3)$$

Relación entre rendimiento real biomasa: sustrato ( $Y_{obs}$ ) y el rendimiento teórico ( $Y$ ).

$$Y_{obs} = Y / (1 + \theta_X b). \quad (1.4)$$

donde:

$\theta_X$ : Tiempo de residencia medio celular (d).

$b$ : Velocidad específica de muerte endógena ( $d^{-1}$ ).

Expresión de trabajo.

$$F_X = Y Q E S_0 / (1 + \theta_X b). \quad (1.5)$$

donde:

$F_X$ : Biomasa neta producida ( $kg \cdot d^{-1}$ )

$Y$ : Rendimiento teórico.

$E$ : Eficiencia del proceso (%).

$$E = [(S_0 - S) / S_0 \theta] = 0,6-0,9. \quad (1.6)$$

$S_0$ : DBO total del afluente ( $kg \cdot m^{-3}$ ).

$Q$ : Flujo másico de residual ( $m^3 \cdot d^{-1}$ ).

En el caso de no existir recirculación

$\theta_X$  es igual al tiempo de residencia hidráulico.

Este modelo (1.5) es aplicable a procesos de digestión anaerobia continuos en reactores agitados.

Expresión para el cálculo de volumen de metano producido.

$$Q_{\text{CH}_4} = f_C [E Q S_0 - 1,42 F_2 F_X]. \quad (1.7)$$

donde:

$Q_{\text{CH}_4}$ : Volumen de metano producido diariamente a. Temperatura, Presión, Normal (TPN) ( $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ ).

$f_C$ : Factor de conversión  $V_{\text{CH}_4} / \text{DBO}_{\text{total removida}}$ .  
(Usualmente se emplea 0,35).

1,42: Factor de conversión de  $\text{DBO}_{\text{total}}$  a biomasa.

Método de factor de carga.

Tiene una base empírica. Se establece experimentalmente la carga de residual que admite el digestor.

Como criterio de carga se emplea:

Para sólidos  $\longrightarrow$  masa de sólidos suspendidos volátiles /día/ unidad de volumen del digestor.

Para líquidos  $\longrightarrow$  masa de DQO / día/ unidad de volumen del digestor.

Como se aprecia en el ejercicio se demuestra un carácter integrador y generalizador, dado que los fundamentos teóricos que utiliza y los problemas que se analizan proceden de diferentes campos.

También se aprecia los aspectos referidos a contenidos del currículo, sistemas de habilidades, desarrollo de valores y cumplimiento de objetivos que se logra con la ejecución de este ejercicio:

### **Contenidos de las disciplinas del currículo del ingeniero químico.**

Se vinculan contenidos de la asignatura tratamiento de aguas y residuales con contenidos de la asignatura reactores heterogéneos.

### **Sistema de habilidades.**

Se cumple lo referente a ser capaz de seleccionar, calcular y evaluar los métodos, tecnologías y tratamientos para la purificación de aguas de uso industrial y de residuales líquidos y gaseosos con vistas a la minimización de desechos, y de prevención de contaminación ambiental.

### **Sistema de valores.**

Se aplica lo concerniente a la capacidad de adquirir conocimientos por sí mismo expresado en la independencia mostrada al analizar situaciones que requieren el empleo de conocimientos

provenientes de las diferentes partes de la asignatura, y de integrarlos de manera que contribuyan al logro de un objetivo único. Esto es un aspecto de gran importancia como señala (Hassan, 2009): la formación de valores constituye un aspecto priorizado en el desarrollo integral de jóvenes.

### **Objetivos educativos e instructivos**

Se cumple lo relativo a que el taller es el tipo de clase que tiene como objetivo específico que los estudiantes apliquen los conocimientos adquiridos en las diferentes disciplinas para la resolución de problemas propios de la profesión, a partir del vínculo entre los componentes académico, investigativo y laboral.

También se cumple la capacidad para adquirir conocimientos por sí mismo, que constituye uno de los rasgos más definitorios de la calidad de toda educación de nivel superior, la de desarrollar la constancia del hábito de producir reflexivamente y evaluar críticamente los resultados de su trabajo.

### **Indicaciones metodológicas y de organización de las disciplinas**

Sobre las indicaciones metodológicas se aplica lo referido a las actividades de taller, sea cual sea la modalidad que se utilice para su desarrollo, que tienen como objetivo esencial elevar la eficacia del trabajo independiente del estudiante; por esta causa, no se reportan en los fondos de tiempos de las asignaturas, ni pueden contemplar la impartición de nuevos conocimientos, excepto cuando el dominio de estos al nivel de asimilación que se establezca, no requieran de un trabajo adicional fuera de estas actividades.

Otros ejemplos para la ejercitación se exponen en el anexo 1, con sus respectivas valoraciones acerca del cumplimiento de los aspectos analizados en el ejercicio anterior.

### **Consideraciones finales.**

Como se aprecia se han formulado un total de 7 ejercicios cuya solución conlleva a la aplicación de los fundamentos teóricos de las disciplinas del ingeniero químico. Se evidencia la interrelación que existe entre la asignatura Tratamiento de aguas y residuales y la asignatura Reactores Heterogéneos. La precedencia de la disciplina Fundamento químico y biológico constituye un basamento fuerte para la interpretación del funcionamiento de los procesos biológicos que trata la asignatura de Tratamiento de agua y la proyección a profundizar en la asignatura de reactores. Se cumple en esta interrelación los aspectos formulados en el plan D de desarrollar la capacidad de los estudiantes de apropiarse por sí mismo contenidos no impartidos en clases y su aplicación en la práctica social con las referencias bibliográficas de ejemplos prácticos. La forma de enseñanza taller, como lo establece el artículo 111, posibilita dicha integración que es otro de los principios que se sustentan en el plan D de desarrollar en proceso sistémico e integrador.

Los ejercicios propuestos a integrar la preparación del taller sustentan el cumplimiento de los objetivos instructivos y educativos, sistema de habilidades, sistema de valores, el sistema de contenidos del currículo del ingeniero químico, la planificación y organización del proceso docente educativo en el cual se aprecia con más evidencia que la primera prioridad del trabajo docente es la correcta aplicación del enfoque Integral (artículo 102).

Los ejercicios propuestos cumplen con los requisitos que establece la forma de enseñanza taller al concebir la autopreparación del estudiante, la posibilidad de integración con diferentes asignaturas y la autoindependencia del mismo. El taller puede instrumentarse en períodos que precedan las prácticas laborales que constituirían la continuidad de la constatación de los aspectos teóricos y prácticos abordados en el taller. Se concibe que la actividad se desarrolle en el segundo semestre de tercer año y que contemple las horas curriculares que no afecte la relación establecida entre horas teóricas y prácticas y se incluyan horas de actividad independiente de los estudiantes como actividad no curricular.

La bibliografía disponible para el desarrollo del taller se ubicará como plataforma interactiva con el empleo del MOODLE. La relación de otros ejercicios para efectuar la autopreparación de los estudiantes se plasma en el anexo 1. De igual forma la revisión de los ejercicios se hará de forma interactiva a través de dicha plataforma.

## **Conclusiones**

Se desarrolla una actividad docente de forma de enseñanza taller que contempla la integración de contenidos que aborda la asignatura tratamiento de aguas y residuales, reactores heterogéneos, fundamentos de automatización y vestigios de las disciplinas fundamentos químicos y biológicos, ingeniería de procesos, preparación para la defensa, principios de ingeniería química e ingeniería de los materiales que tributan a la formación integral del estudiante y al desarrollo de habilidades para adquirir conocimientos por sí mismo con lo que queda validada la hipótesis.

La preparación del taller contempla la utilización del MOODLE como plataforma interactiva para la autopreparación del estudiante y el intercambio con el profesor para la evaluación de las repuestas a los ejercicios que se les exponen.

Los contenidos de las asignaturas tratamiento de aguas y residuales y de la asignatura reactores son los de mayor convergencia en los temas específicos de reactores biológicos.

Los ejercicios que integran el taller incluyen la caracterización análisis y propuesta de utilización de digestores anaerobios pilotos existentes en la facultad de ingeniería química- mecánica. De igual forma se vinculan los ejercicios con información científica actualizada de digestores y reactores instalados en la práctica social en regiones de América y de Europa, lo que propicia al estudiante la interiorización de la aplicación práctica de los contenidos teóricos que recibe en la carrera.

## **Recomendaciones**

Que se valore por el colectivo de año la incorporación de los resultados de ésta tesis para su implementación en el plan D.

Que se continúe sistemáticamente el enriquecimiento de los ejemplos a concluir en el desarrollo del trabajo.

## Bibliografía

1. Alcarria Escribano, Marta y Cortina Pallás, José Luis (1995). Evaluación Tecnológica de la Aplicación de Reactores Biológicos de Membranas en Procesos de Tratamiento de Aguas Residuales. [en línea]. Universitat Politècnica de Catalunya. Departament d'Enginyeria Química. [Consultado: 25 mayo 2009]. Disponible en: <http://www.recercat.net/handle/2072/6321>.
2. Álvarez Rodríguez, Juan Antonio (2003). Facultad de ciencias. Tratamiento anaerobio de aguas residuales urbanas en planta piloto. Universidad A Coruña.
3. Boizán, F.M. y Rodríguez, P. S. (s.a.). Centro de Estudios de Biotecnología industrial. La energía de los desechos. Santiago de Cuba. Disponible en: Patricio Lumumba s/n Código Postal 90500.
4. Bonet, Sánchez Antonio (1991). Gran enciclopedia educativa. Ediciones Zamora Ltda. México, Panamá, Colombia, España.
5. Bradfer, Jean-François (2003). Digestores anaeróbicos para riles altamente cargados y lodos de P.T.A.S. Una alternativa viable para el cumplimiento al futuro reglamento sobre manejo de lodos no peligrosos. XV Congreso de Ingeniería Sanitaria Y Ambiental AIDIS – CHILE. [en línea]. Concepción, octubre: Chile. [Consulta: 20 abril 2009]. Disponible en: <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/chile15/digestores.pdf>
6. Contaminación ambiental: Un problema siempre en crisis. (2009). Contaminación ambiental. [en línea]. [Consulta: 20 abril 2009]. Disponible en: <http://eurocontaminacion.blogspot.com/search?q=Contaminaci%C3%B3n+ambiental%3A+Un+problema+siempre+en+crisis+>
7. Díaz García, Armando (s.a.). Programa de la disciplina Análisis de Procesos. Plan D. Curso Presencial. Ingeniería Química. Universidad de Oriente.
8. Díaz Betancourt, Raúl (2006). Tratamiento de aguas y aguas residuales. Ciudad de La Habana. Editorial ISPJAE.
9. Echarri Prim, Luis (1998). Evaluación del impacto ambiental. En su: Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente. [en línea]. Editorial Teide. [Consultado: 20 abril 2009]. Disponible en: <http://www.tecnun.es/Asignaturas/ecologia/Hipertexto/15HombAmb/150ImpAmb.htm>
10. Enkerlin, Ernesto C.... et al. (1997). Ciencia Ambiental y Desarrollo Sostenible. Internacional Thomson Editores. México.
11. Evaluación de impacto ambiental (2009). WIKIPEDIA, la enciclopedia libre. [en línea]. [Consultado: 24 junio 2009]. Disponible en: [http://es.wikipedia.org/wiki/Evaluaci%C3%B3n\\_de\\_impacto\\_ambiental](http://es.wikipedia.org/wiki/Evaluaci%C3%B3n_de_impacto_ambiental)

12. Garcell Puyans, Leonel (s.a.). Programa de la disciplina: Operaciones y Procesos unitarios. Plan D. Curso presencial. Ingeniería Química. Universidad de Oriente.
13. Hassan Hernández, Andrés (2009). El nuevo Claroline en la UMCC. Pedagogía. PEDADOQUÍMICA.[en línea]. [Consulta: 8 de julio 2009]. Disponible en: <http://newclaroline.umcc.cu/claroline/document/document.php?cmd=exChDir&file=%2Faprendizaje>.
14. Hing Cortón, Romelia (s.a.). Programa de la disciplina Ingeniería de los Materiales. Plan D. Curso presencial. Ingeniería Química. Universidad de Oriente.
15. Horruitiner Silva, Pedro (2008).La Universidad Cubana: el modelo de formación. La Habana. Editorial Félix Varela.
16. Irusta Mata, Ruben; Álamo Martin, Josue del y Briongos Gil, R. (2006). Gestión centralizada de aguas residuales en polígonos industriales: Una estrategia sostenible. Revista Ingeniería Química. [en línea]. No. 435. [Consultado: 19 mayo 2009]. Disponible en: <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2117180>
17. Judd S. (2006). The MBR Book: Principles and Applications of Membrane Bioreactors for Water and Wastewater Treatment. Editorial Elsevier. Oxford.
18. J' de Disciplina FAU (s.a.). Programa de la disciplina: Fundamentos de Automatización. Plan D. Curso Presencial. Ingeniería Química. Universidad de Oriente.
19. Mason, C.F. (1984). Biología de la contaminación del agua dulce. Alhambra. Madrid.
20. Marsilli, Alejandro (2005). Tratamiento de aguas residuales. [Consultado: 15 mayo 2009]. Disponible en: [www.tierramor.org](http://www.tierramor.org).
21. Metcalf & Eddy, (1996). Ingeniería de Aguas Residuales: Tratamiento, vertido y reutilización. McGraw-Hill.
22. Ministerio de Justicia (2007). Gaceta Oficial de la República de Cuba. Resolución 210/07. La Habana.
23. Moro Martínez, Alina (s.a.). Programa de la disciplina: Fundamentos Químicos y Biológicos. Plan D. Curso presencial. Ingeniería Química. Universidad de Oriente.
24. Programa de la disciplina: Preparación para la defensa. Plan D. Curso presencial. Ingeniería Química.
25. Pons Hernández, Antonio (s.a.). Programa de la disciplina Principios de Ingeniería Química. Plan D. Curso presencial. Ingeniería Química. Universidad de Oriente.

26. Tapia, F. y Toharia, M. (1995). Medio ambiente: ¿alerta verde? Acento Editorial. Madrid.
27. Speece, R.E. (1996). Anaerobic biotechnology for industrial wastewaters. Archae Press, Tennessee.
28. Urbáez Méndez, Carlos Luis... et al. (s.a.). Biomasa: alternativa sustentable para la producción de Biogás. Universidad de Pinar del Río. [en línea]. [Consulta: 19 marzo 2009]. Disponible en: <http://www.monografias.com/trabajos48/biomasa/biomasa.shtml>
29. Van der Roest H.F., Lawrence D.P., van Bentem A.G.N. (2002). Membrane bioreactors for municipal wastewater treatment. IWA Publishing –Stowa.
30. Viera Bertrán, Raúl (1991). Diseño y Análisis de Reactores Químicos. T.4. La Habana. Ediciones ENPES.
31. Viera Bertrán, René (s.a.). Programa de la disciplina: Ingeniería de Procesos. Plan D. Curso presencial. Ingeniería Química. Universidad de Oriente.
32. Vizcaya Lozano, F. J.; Estrany Coda, Francesc y Oliver Pujol, Ramón (2006). El reactor biológico de membrana en el tratamiento de aguas residuales. Revista Ingeniería Química. [en línea]. No. 435. [Consultado: 19 mayo 2009]. Disponible en: <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2117202>.
33. Yll Lavin, Mario (2009). Ingeniería de las Reacciones Químicas II. T 5. Disponible en: <http://newclaroline.umcc.cu/claroline/document/document.php?cmd=exChDir&file=%2F>.

## **Anexo 1. Documentación correspondiente a la preparación de asignatura OPU IV para el desarrollo del taller. Ejercitación.**

### **Ejercicio 2**

Analice la información que se brinda a continuación y brinde sus comentarios al respecto a partir de las disciplinas del currículo del ingeniero químico.

Las sustancias poliméricas con elevados pesos moleculares no pueden atravesar la membrana (su tamaño es superior al diámetro de poro) y son retornadas al biorreactor. En el caso de ser biodegradables se descomponen aumentando la calidad del permeado. Por otro lado, las sustancias orgánicas con pesos moleculares bajos y que no se eliminarían sólo con la membrana, son biodegradadas por los microorganismos o bien convertidas en polímeros formando parte de las células bacterianas. La suma de los efectos producidos por la degradación biológica y la filtración hacen superar en muchos casos porcentajes de depuración del 99% en eliminación de DBO5 y 95 % de eliminación de la DQO. En la tabla 3.2, se indican como referencia algunos rendimientos que se alcanzan en plantas depuradoras BRM que tratan aguas residuales industriales.

Tabla 3.2 Rendimientos de BRM para aguas residuales industriales.

Aerobio (A).

Anaerobio (ANA) DQO DBO5 SS DQO DBO5 SS

Láctea A 4.200 2.600 650 40 <5 4,2

Téxtil A 1.600 90

Zumos A 2.250 24

AR aceitosas A 4.300 - 6.900 919 - 1.360 253 - 889 180 - 669 3 - 34 1 - 11

Cosmética A 35.000 18.000 3.000 130 <10 <5

Acido láctico A 2.000 900 700 60 <10 <5

Industria Influyente (mg/l) Efluente (mg/l)

Flexibilidad de operación.

En los BRM la edad del fango es independiente del tiempo de retención hidráulico. Es posible mantener una edad del fango muy elevada que favorece, entre otras cosas, el desarrollo de microorganismos de crecimiento lento como los nitrificantes. De este modo aumenta la eliminación de productos lentamente biodegradables, lo que es una gran ventaja en efluentes industriales.

Tamaño de las instalaciones.

Los BRM trabajan a cargas volumétricas elevadas, ya que la concentración de fango en el biorreactor es mucho mayor que en un sistema convencional. Las concentraciones típicas de un sistema aerobio convencional están entre 2 y 6 Kg/m<sup>3</sup>, a concentraciones mayores no se consigue decantar todo el fango. En un BRM se puede llegar hasta 20-30 Kg/m<sup>3</sup>. Sin embargo existe un límite, ya que cuando la concentración de fango sobrepasa estos valores, la viscosidad aumenta considerablemente, dificultando en gran medida la filtración a través de las membranas. Además la transferencia de oxígeno disminuye por lo que las necesidades energéticas de aireación son más elevadas. En los modernos BRM se suele trabajar a concentraciones de biomasa de 8-12 Kg/m.

El volumen de un BRM suele ser de 2 y 5 veces inferior al del sistema convencional, manteniendo la misma carga másica de trabajo. Se consigue de esta manera una carga volumétrica superior. Además, el BRM ahorra el espacio que supone el decantador. Tampoco es necesario un sistema terciario para llegar a la misma calidad del efluente.

+

Como se aprecia en el ejercicio se demuestra un carácter integrador y generalizador, dado que los fundamentos teóricos que utiliza y los problemas que se analizan proceden de diferentes campos.

### **Contenidos de las disciplinas del currículo del ingeniero químico.**

Reactores heterogéneos.

Métodos y tecnologías para el tratamiento de agua de uso industrial y de residuales de la industria química constituyen tópicos a tratar dentro de los contenidos de la disciplina de Operaciones y Procesos Unitarios.

La asignatura Tratamiento de aguas y residuales está dedicada al estudio de temas medioambientales. Así, las actividades prácticas referentes a los contenidos de tratamiento de aguas industriales y residuales se deben concebir, fundamentalmente, como trabajos en clases

prácticas, en el laboratorio químico, o de ingeniería en trabajos de curso que conduzcan al estudiante a la discusión y selección de variantes de tratamiento y operación.

Biomoléculas e integridad del metabolismo. Características estructurales, propiedades físicas y químicas. Fundamentos del metabolismo: síntesis y degradación. Crecimiento y nutrición de los microorganismos. Microbiología ambiental y aplicada.

Balance de masa, la metodología general para resolver problemas de balances de masa en procesos estacionarios, balances de masa en procesos sin y con reacciones químicas, balances de energía en procesos sin y con reacciones químicas, balances de masa y de energía en procesos no estacionarios y el equilibrio en las reacciones químicas simples homogéneas y heterogéneas entre otras.

### **Sistema de habilidades.**

El estudiante debe ser capaz de seleccionar, calcular y evaluar los métodos, tecnologías y tratamientos para la purificación de aguas de uso industrial y de residuales líquidos y gaseosos con vistas a la minimización de desechos, y de prevención de contaminación ambiental.

Interpretar el efecto de las variables de operación sobre la velocidad global de reacción y sobre el comportamiento de los reactores.

Determinar las condiciones de medición necesarias para realizar balances de masa y energía en plantas existentes. Establecer las condiciones necesarias de control de un proceso tecnológico.

Determinar el comportamiento de los microorganismos en procesos biotecnológicos y de la industria alimentaria a partir de leyes que rigen su crecimiento y metabolismo. Determinar la dirección, extensión y velocidad de las reacciones químicas en sistemas homogéneos en fase gaseosa, fase líquida y en sistemas heterogéneos. Predecir la estructura, propiedades físico-químicas y los métodos más generales de síntesis de los compuestos químicos orgánicos. Inferir el comportamiento de las biomoléculas en procesos biosintéticos aplicando los conceptos del metabolismo y los principios de la enzimología y la bioenergética. Determinar la concentración de componentes en una muestra dada, haciendo uso de métodos de análisis químico e instrumental.

Describir los rasgos esenciales de los productos, las materias primas, y los residuales de las plantas, describir las principales normas de protección e higiene y de protección contra incendios, identificar los fenómenos químicos accesibles a su conocimiento que están involucrados en las operaciones del proceso, explicar cualitativamente su comportamiento ante los cambios de las

variables de operación, determinar los requerimientos materiales y energéticos de cada una de las operaciones componentes, determinar si los equipos y aparatos principales de las operaciones accesibles a su conocimiento, poseen las dimensiones requeridas para realizar el trabajo establecido o el que se establezca como condición a analizar, analizar si los materiales utilizados en los aparatos principales han sido adecuadamente seleccionados, atendiendo a sus propiedades mecánicas y si su resistencia a la corrosión o el sistema de protección anticorrosiva son satisfactorias.

Utilizar los principios estequiométricos en la resolución de problemas de balances de masa donde ocurren reacciones químicas, resolver balances de masa en situaciones donde existan corrientes recirculadas, evaluar un sistema de generación de vapor, evaluar el equilibrio químico para reacciones gaseosas simples, para una simple reacción química heterogénea y reacciones químicas en fase líquida que forman soluciones ideales.

### **Sistema de valores**

Desarrollar la capacidad para educarse por sí mismo, percibir la necesidad de proteger la naturaleza y el medio ambiente, mediante la ejecución de trabajos técnicos realizados con esa finalidad.

Capacidad de adquirir conocimientos por sí mismo expresado en la independencia mostrada al analizar situaciones que requieren el empleo de conocimientos provenientes de las diferentes partes de la asignatura, y de integrarlos de manera que contribuyan al logro de un objetivo único.

### **Objetivos educativos e instructivos**

Vincular diferentes leyes, fenómenos, modos de operar y el impacto ambiental que provocan, como elementos determinantes del comportamiento de estas, y en las que se analice de qué forma los cambios en uno cualquiera de dichos elementos que influyen sobre los otros y sobre el comportamiento global de las mismas, y sobre el entorno, análisis de problemas simples típicos de la profesión, evaluación del comportamiento de las estaciones de las aguas de abasto a la industria de procesos y de los sistemas tecnológicos para el tratamiento, reutilización y vertimiento de los residuales industriales, teniendo en cuenta su impacto ambiental y el uso racional de los recursos naturales y energéticos, diseño y análisis del comportamiento de reactores químicos homogéneos y heterogéneos en distintas condiciones de operaciones típicas de los procesos químicos.

Adquirir conocimientos por sí mismo, constituye uno de los rasgos más definitorios de la calidad de toda educación de nivel superior, desarrollar la constancia del hábito de producir reflexivamente y evaluar críticamente los resultados de su trabajo.

Interpretación de los principios básicos de la química, química física, bioquímica y microbiología para su aplicación práctica a nivel productivo, desarrollando hábitos y habilidades que le permitan la educación por sí mismo, determinar el comportamiento de las biomoléculas en procesos biosintéticos, aplicando los conceptos de metabolismo sobre la base de la enzimología y la bioenergética, determinar el comportamiento de los microorganismos en un proceso biotecnológico y de la industria alimentaria a partir de las leyes que rigen su crecimiento.

Capacidad para educarse por sí mismo y educar a otros, a través del:

Desarrollo de la capacidad para orientarse y utilizar el sistema de información científico-técnica, el análisis de la estructura científica de la profesión, su campo de acción y los objetivos esenciales del profesional, el empleo sistemático de conocimientos y habilidades lógicas, el análisis de problemas no estructurados que requieran el dominio parcial de contenidos no desarrollados en clases y con actividades de todo tipo desarrolladas con un alto grado de independencia, el reconocimiento de la actuación del hombre sobre el medio circundante como el agente decisivo en la formación de su personalidad, el análisis de la relación entre los procesos productivos, las necesidades sociales, el análisis y empleo de las medidas de protección física y ambiental como medios para la protección del hombre y del medio ambiente, la solución de tareas técnicas propias del ejercicio de la profesión, desarrolladas a través del vínculo laboral- investigativo, cuya estructura fenomenológica responda a la naturaleza real de los problemas y no a las características de una disciplina en particular.

### **Indicaciones metodológicas y de organización de las disciplinas**

Solución de problemas de análisis, selección y proyecto de operaciones y procesos unitarios, tanto considerados aisladamente, como vinculados a una tecnología determinada, debe dársele la debida importancia, durante la actividades prácticas, a la consideración de variantes de operación y diseño de procesos tecnológicos, al análisis de anomalías de funcionamiento y otros problemas comunes en la operación de plantas.

### **Ejercicio 3.**

Analice la información que se brinda a continuación y brinde sus comentarios al respecto a partir de las disciplinas del currículo del ingeniero químico.

Concentración de biomasa.

Un BRM permite tener en el reactor una concentración de biomasa superior que en un sistema convencional, al no tener las limitaciones que impone la decantación. A partir de 15-20 g/l de biomasa, la viscosidad del licor mezcla aumenta provocando:

Una disminución del flujo de permeado.

La disminución de la turbulencia en las proximidades de las membranas, aumentando la posibilidad de que se depositen más partículas sólidas.

Aumenta la dificultad de la transferencia de oxígeno a los microorganismos, a causa del aumento de viscosidad.

En los modernos MBR se suele trabajar entre 8-12 g/l de biomasa en el reactor biológico.

Como se aprecia en el ejercicio se demuestra un carácter integrador y generalizador, dado que los fundamentos teóricos que utiliza y los problemas que se analizan proceden de diferentes campos.

### **Contenidos de las disciplinas del currículo del ingeniero químico.**

Reactores heterogéneos.

Biomoléculas e integridad del metabolismo. Características estructurales, propiedades físicas y químicas. Fundamentos del metabolismo: síntesis y degradación. Crecimiento y nutrición de los microorganismos. Microbiología ambiental y aplicada.

La disciplina de principios de ingeniería química trata sobre la expresión general del balance de masa, la metodología general para resolver problemas de balances de masa en procesos estacionarios, balances de masa en procesos sin y con reacciones químicas, balances de energía en procesos sin y con reacciones químicas, balances de masa y de energía en procesos no estacionarios y el equilibrio en las reacciones químicas simples homogéneas y heterogéneas entre otras.

### **Sistema de habilidades**

Interpretar el efecto de las variables de operación sobre la velocidad global de reacción y sobre el comportamiento de los reactores.

Determinar las condiciones de medición necesarias para realizar balances de masa y energía en plantas existentes. Establecer las condiciones necesarias de control de un proceso tecnológico.

Determinar el comportamiento de los microorganismos en procesos biotecnológicos y de la industria alimentaria a partir de leyes que rigen su crecimiento y metabolismo. Determinar la dirección, extensión y velocidad de las reacciones químicas en sistemas homogéneos en fase gaseosa, fase líquida y en sistemas heterogéneos. Predecir la estructura, propiedades físico-químicas y los métodos más generales de síntesis de los compuestos químicos orgánicos.

### **Sistema de valores.**

Capacidad de adquirir conocimientos por sí mismo expresado en la independencia mostrada al analizar situaciones que requieren el empleo de conocimientos provenientes de las diferentes partes de la asignatura, y de integrarlos de manera que contribuyan al logro de un objetivo único.

Capacidad para educarse por sí mismo, percibir la necesidad de proteger la naturaleza y el medio ambiente, mediante la ejecución de trabajos técnicos realizados con esa finalidad.

### **Objetivos educativos e instructivos.**

Vincular diferentes leyes, fenómenos, modos de operar y el impacto ambiental que provocan, como elementos determinantes del comportamiento de estas, y en las que se analice de qué forma los cambios en uno cualquiera de dichos elementos que influyen sobre los otros y sobre el comportamiento global de las mismas, y sobre el entorno, análisis de problemas simples típicos de la profesión, evaluación del comportamiento de las estaciones de las aguas de abasto a la industria de procesos y de los sistemas tecnológicos para el tratamiento, reutilización y vertimiento de los residuales industriales, teniendo en cuenta su impacto ambiental y el uso racional de los recursos naturales y energéticos, diseño y análisis del comportamiento de reactores químicos homogéneos y heterogéneos en distintas condiciones de operaciones típicas de los procesos químicos.

Interpretación de los principios básicos de la química, química física, bioquímica y microbiología para su aplicación práctica a nivel productivo, desarrollando hábitos y habilidades que le permitan

la educación por sí mismo, determinar el comportamiento de las biomoléculas en procesos biosintéticos, aplicando los conceptos de metabolismo sobre la base de la enzimología y la bioenergética, determinar el comportamiento de los microorganismos en un proceso biotecnológico y de la industria alimentaria a partir de las leyes que rigen su crecimiento

#### **Indicaciones metodológicas y de organización de las disciplinas.**

Integración de los contenidos de la enseñanza, de manera tal que los estudiantes distingan lo esencial y se apropien de la habilidad.

#### **Ejercicio 4.**

Caracterice el biodigestor existente en el área de la facultad la figura 2.1 del anexo, de acuerdo a lo reportado por la literatura científica.

Proponga alternativas para su utilización para el tratamiento de residuales generados en la UMCC y para desarrollar actividades con fines docentes.

Como se aprecia en el ejercicio se demuestra un carácter integrador y generalizador, dado que los fundamentos teóricos que utiliza y los problemas que se analizan proceden de diferentes campos.

#### **Contenidos de las disciplinas del currículo del ingeniero químico.**

Reactores heterogéneos.

Tratamiento de aguas industriales y residuales.

Biomoléculas e integridad del metabolismo. Características estructurales, propiedades físicas y químicas. Fundamentos del metabolismo: síntesis y degradación. Crecimiento y nutrición de los microorganismos. Microbiología ambiental y aplicada.

Balance de masa, la metodología general para resolver problemas de balances de masa en procesos estacionarios, balances de masa en procesos sin y con reacciones químicas, balances de energía en procesos sin y con reacciones químicas, balances de masa y de energía en procesos no estacionarios y el equilibrio en las reacciones químicas simples homogéneas y heterogéneas entre otras.

**Sistema de habilidades.**

Identificar los fenómenos químicos accesibles a su conocimiento que están involucrados en las operaciones del proceso, explicar cualitativamente su comportamiento ante los cambios de las variables de operación, determinar los requerimientos materiales y energéticos de cada una de las operaciones componentes, determinar si los equipos y aparatos principales de las operaciones accesibles a su conocimiento, poseen las dimensiones requeridas para realizar el trabajo establecido o el que se establezca como condición a analizar, analizar si los materiales utilizados en los aparatos principales han sido adecuadamente seleccionados, atendiendo a sus propiedades mecánicas y si su resistencia a la corrosión o el sistema de protección anticorrosiva son satisfactorias.

**Sistema de valores.**

Capacidad de adquirir conocimientos por sí mismo expresado en la independencia mostrada al analizar situaciones que requieren el empleo de conocimientos provenientes de las diferentes partes de la asignatura, y de integrarlos de manera que contribuyan al logro de un objetivo único.

**Objetivos educativos e instructivos.**

Vincular diferentes leyes, fenómenos, modos de operar y el impacto ambiental que provocan, como elementos determinantes del comportamiento de éstas, y en las que se analice de qué forma los cambios en uno cualquiera de dichos elementos que influyen sobre los otros y sobre el comportamiento global de las mismas, y sobre el entorno, análisis de problemas simples típicos de la profesión, evaluación del comportamiento de las estaciones de las aguas de abasto a la industria de procesos y de los sistemas tecnológicos para el tratamiento, reutilización y vertimiento de los residuales industriales, teniendo en cuenta su impacto ambiental y el uso racional de los recursos naturales y energéticos, diseño y análisis del comportamiento de reactores químicos homogéneos y heterogéneos en distintas condiciones de operaciones típicas de los procesos químicos.

**Indicaciones metodológicas y de organización de las disciplinas.**

Solución de problemas de análisis, selección y proyecto de operaciones y procesos unitarios, tanto considerados aisladamente, como vinculados a una tecnología determinada, debe dársele la debida importancia, durante la actividades prácticas, a la consideración de variantes de

operación y diseño de procesos tecnológicos, al análisis de anomalías de funcionamiento y otros problemas comunes en la operación de plantas.

### **Ejercicio 5**

Analice la información que se brinda a continuación y brinde sus comentarios al respecto a partir de las asignaturas microbiología, tratamiento de aguas y residuales y la asignatura reactores heterogéneos del currículo del ingeniero químico.

Recientes estudios realizados en UK, demuestran que se puede tratar el agua residual municipal hasta niveles de calidad superiores a los exigidos por las regulaciones más recientes sobre agua potable. Para lo cual trataremos el efluente secundario con los nuevos sistemas de ultrafiltración, seguido de un tratamiento de O.I. de baja presión. O bien trataremos directamente el efluente de un BRM con un proceso de O.I. de baja presión. Este modo de obtener agua de calidad es más sostenible que la desalación de agua de mar. Se puede realizar con inversiones de capital un 34 % inferior a la desalación del agua de mar, y costes de explotación un 50 % inferior. Los costes totales del ciclo de vida del tratamiento del agua residual municipal hasta niveles de agua potable, son un 40 % inferior a los de la desalación del agua de mar.

Como se aprecia en el ejercicio se demuestra un carácter integrador y generalizador, dado que los fundamentos teóricos que utiliza y los problemas que se analizan proceden de diferentes campos.

### **Contenidos de las disciplinas del currículo del ingeniero químico.**

Fundamentos del metabolismo: síntesis y degradación. Crecimiento y nutrición de los microorganismos. Microbiología ambiental y aplicada.

Balance de masa. La metodología general para resolver problemas de balances de masa en procesos estacionarios, balances de masa en procesos sin y con reacciones químicas, balances de energía en procesos sin y con reacciones químicas, balances de masa y de energía en procesos no estacionarios y el equilibrio en las reacciones químicas simples homogéneas y heterogéneas entre otras.

### **Sistema de habilidades.**

Que el estudiante sea capaz de seleccionar, calcular y evaluar los métodos, tecnologías y tratamientos para la purificación de aguas de uso industrial y de residuales líquidos y gaseosos con vistas a la minimización de desechos, y de prevención de contaminación ambiental.

Determinar las condiciones de medición necesarias para realizar balances de masa y energía en plantas existentes. Establecer las condiciones necesarias de control de un proceso tecnológico.

Determinar el comportamiento de los microorganismos en procesos biotecnológicos y de la industria alimentaria a partir de leyes que rigen su crecimiento y metabolismo. Determinar la dirección, extensión y velocidad de las reacciones químicas en sistemas homogéneos en fase gaseosa, fase líquida y en sistemas heterogéneos. Predecir la estructura, propiedades físico-químicas y los métodos más generales de síntesis de los compuestos químicos orgánicos. Inferir el comportamiento de las biomoléculas en procesos biosintéticos aplicando los conceptos del metabolismo y los principios de la enzimología y la bioenergética. Determinar la concentración de componentes en una muestra dada, haciendo uso de métodos de análisis químico e instrumental.

### **Sistema de valores.**

Capacidad para educarse por sí mismo, percibir la necesidad de proteger la naturaleza y el medio ambiente, mediante la ejecución de trabajos técnicos realizados con esa finalidad.

### **Objetivos educativos e instructivos.**

Vincular diferentes leyes, fenómenos, modos de operar y el impacto ambiental que provocan, como elementos determinantes del comportamiento de éstas, y en las que se analice de qué forma los cambios en uno cualquiera de dichos elementos que influyen sobre los otros y sobre el comportamiento global de las mismas, y sobre el entorno, análisis de problemas simples típicos de la profesión, evaluación del comportamiento de las estaciones de las aguas de abasto a la industria de procesos y de los sistemas tecnológicos para el tratamiento, reutilización y vertimiento de los residuales industriales, teniendo en cuenta su impacto ambiental y el uso racional de los recursos naturales y energéticos, diseño y análisis del comportamiento de reactores químicos homogéneos y heterogéneos en distintas condiciones de operaciones típicas de los procesos químicos.

Capacidad para adquirir conocimientos por sí mismo, constituye uno de los rasgos más definitorios de la calidad de toda educación de nivel superior, desarrollar la constancia del hábito de producir reflexivamente y evaluar críticamente los resultados de su trabajo.

Indicaciones metodológicas y de organización de las disciplinas.

Integrar los conocimientos recibidos en la disciplina. Los talleres han de contribuir a elevar la eficacia del trabajo independiente de los estudiantes.

### **Ejercicio 6.**

Apoyado en los principios de la disciplina fundamentos de automatización, realice:

La caracterización del flujómetro presentado en la figura 2.3 del anexo y proponga las bases para su instalación y utilización en la medición del flujo de biogás generado en el biodigestor piloto instalado en la planta piloto de producción de alcohol del laboratorio de operaciones unitarias representado en la figura 2.2 del anexo.

Como se aprecia en el ejercicio se demuestra un carácter integrador y generalizador, dado que los fundamentos teóricos que utiliza y los problemas que se analizan proceden de diferentes campos.

### **Contenidos de las disciplinas del currículo del ingeniero químico.**

La disciplina fundamentos de automatización incluye entre sus contenidos los métodos y normas de instalación y mantenimiento de la instrumentación. Función que realiza cada instrumento instalado.

Fundamentos del metabolismo: síntesis y degradación. Crecimiento y nutrición de los microorganismos. Microbiología ambiental y aplicada.

Reactores químicos homogéneos y heterogéneos.

Métodos y tecnologías para el tratamiento de agua de uso industrial y de residuales de la industria química constituyen tópicos a tratar dentro de los contenidos de la disciplina de operaciones y procesos unitarios.

### **Sistema de habilidades.**

Confecionar el esquema de instrumentación y control de procesos. Utilizar a un nivel productivo los principios fundamentales de la automatización. Determinar las condiciones de medición necesarias para realizar balances de masa y energía en plantas existentes. Establecer las condiciones necesarias de control de un proceso tecnológico.

### **Sistema de valores.**

Capacidad de adquirir conocimientos por sí mismo expresado en la independencia mostrada al analizar situaciones que requieren el empleo de conocimientos provenientes de las diferentes partes de la asignatura , y de integrarlos de manera que contribuyan al logro de un objetivo único.

### **Objetivos educativos e instructivos.**

Adquirir conocimientos por sí mismo, constituye uno de los rasgos más definitorios de la calidad de toda educación de nivel superior, desarrollar la constancia del hábito de producir reflexivamente y evaluar críticamente los resultados de su trabajo.

Indicaciones metodológicas y de organización de las disciplinas.

Deben utilizarse aquellos métodos de enseñanza que obliguen al estudiante a participar de una forma activa en ellos, de tal forma que logre crear el hábito de aprender por sí mismo.

### **Ejercicio 7.**

En la literatura internacional se hace promoción a programas de formación académica en la temática ambiental. Con vistas a la interiorización de la importancia que reviste para la formación del ingeniero químico lo concerniente a los sistemas de tratamiento de aguas se acompaña la estructura de dicho programa de doctorado.

Realice un análisis de la información que se acompaña y emita sus consideraciones acerca de la interrelación de las asignaturas que conforman el currículo del ingeniero químico y el programa de doctorado.

Programa de Doctorado: Ingeniería Química y Ambiental (2007-2008)

Asignatura: “Diseño y operación de sistemas de tratamiento de aguas” (6 Créditos).

Código: 2149-07-1 (04) Tipo B

1. Profesores.

J.L. Campos, J.M. Garrido, L. Larrea, R. Méndez y F. Omil.

2. Objetivos.

El tratamiento de las aguas residuales y su reutilización mediante nuevas tecnologías y procesos avanzados es una temática que no se suele abordar en los cursos de segundo ciclo de ingeniería, y dado el perfil del programa de doctorado abordado se deben ampliar y estudiar con mayor profundidad especialmente las nuevas tecnologías que, habiendo sido estudiadas ampliamente en el mundo científico, todavía son poco conocidas e implementadas en el tratamiento de aguas residuales urbanas e industriales. El objetivo principal de este curso es contribuir a paliar esta carencia, mediante el estudio de sistemas de tratamiento novedosos y ambientalmente sostenibles tales como los procesos de eliminación anaerobia de materia orgánica, los sistemas de membranas, la eliminación de nutrientes y las herramientas de simulación aplicadas a todos ellos, indicando además el estado actual de los principales proyectos de investigación existentes en este campo.

### 3. Contenidos

El presente curso de 6 créditos consta de los siguientes bloques temáticos:

Bloque I. Procesos anaerobios de alta carga. (1 Crédito) (*Prof. Francisco Omil*).

El objeto de este primer bloque es profundizar en el conocimiento de los sistemas de tratamiento anaerobio como alternativa a considerar especialmente en el caso de aguas industriales de alta carga orgánica. Así, el programa comienza con una visión detallada de los principales reactores de alta carga: reactor de Contacto Anaerobio, reactores de lechos granulares y reactores con soporte inorgánico. Se estudiará en cada caso sus parámetros principales de diseño y sus aplicaciones preferentes. El tema 2 está orientado a conocer la estrategia general de diseño frente a un problema dado, desde los ensayos hechos en discontinuo hasta los reactores a escala de laboratorio y planta piloto. El tema 3 profundiza en el estudio de los reactores anaerobios más empleados (tecnología UASB) analizándose sus principales elementos estructurales, configuraciones espaciales, etc. Con el tema 4 se estudia la operación de un reactor anaerobio, desde el estado estacionario (variables de control del proceso) hasta el estado no estacionario (arranques, paradas, situaciones de inestabilidad). Finalmente el tema 5 aborda un caso singular como es la problemática de las aguas residuales con alto contenido en sulfato, hecho relativamente frecuente en aguas residuales industriales como durante la fabricación de la pulpa de papel, refinado de aceites comestibles, fermentaciones, etc. Con este tema se aborda a posible competición que surge entre diversos grupos bacterianos por la eliminación de la materia orgánica (bacterias metanogénicas y sulfurogénicas), las implicaciones que esta situación puede suponer y las medidas tecnológicas que se pueden abordar para dirigir el metabolismo del proceso en la dirección más conveniente.

## *Programa Bloque I.*

### Tema 1. Reactores de Alta Carga.

Bases de diseño. Sistemas de Contacto Anaerobio: elementos y posibles configuraciones. Sistemas basados en lechos de lodos granulares: Reactores UASB e EGSB. Sistemas de lecho fijo: AF y DSFF. Otras configuraciones. Reactores híbridos. Sistemas de lecho fluidizado. Aplicaciones y limitaciones.

### Tema 2. Estrategia general de diseño.

Estrategia a seguir frente a un problema dado. Ensayos batch (I): Biodegradabilidad. Mineralización y biotransformación. Balances en aguas con presencia de sólidos orgánicos. Dispositivos experimentales. Ensayos batch (II): Actividad metanogénica y no metanogénica. Experimentación. Ensayos batch (III): Toxicidad. Fenómenos de toxicidad. Aclimatación. Ensayos en el laboratorio en continuo. Operación en planta piloto.

### Tema 3. Criterios de diseño de reactores UASB.

Diseños basados en la carga orgánica y en la carga hidráulica. Criterios de forma y tamaño. El separador de fases. Sistemas de distribución del influente. Sistemas de recogida del efluente. Estabilidad mecánica de un reactor UASB.

### Tema 4. Análisis da operación: Estado estacionario e non estacionario.

Estrategias de arranque. Inoculación. Control de reactores anaerobios. Principales parámetros. Nuevas estrategias de control. Estado estacionario. Evolución a largo plazo. Estado no estacionario: sobrecargas orgánicas e hidráulicas.

### Tema 5. Tratamiento de aguas residuales con alto contenido en sulfato

Estrategias para llevar a cabo el tratamiento de estas aguas. Competición. Reactores sulfurogénicos. Aplicaciones.

## Bloque II. Sistemas de membranas y reutilización de aguas residuales. (1 Crédito)

*(Prof. Juan M. Garrido)*

En el capítulo 1 del segundo bloque se describirán principalmente los fundamentos y aplicaciones de la tecnología de membranas para el tratamiento de aguas, como son el uso de tecnologías de membrana para el tratamiento de aguas saladas o de mar (sistemas de electrodiálisis, nanofiltración

y osmosis inversa) para la producción de agua potable y los biorreactores de membrana de ultrafiltración e microfiltración para el tratamiento de agua residual. Se estudiarán las características más importantes de diferentes tipos de sistemas así como los parámetros más importantes de operación. Una parte muy importante de este bloque se centra en la descripción del diseño y operación de los biorreactores de membrana, al que se dedica el Capítulo 2. Los biorreactores de membrana son una combinación de sistemas de lodos activos y un proceso de filtración que han supuesto uno de los mayores avances en los últimos años en el campo del tratamiento de aguas, permitiendo obtener calidades del efluente final muy elevadas que facilitan el reuso de las aguas. Precisamente la reutilización constituye el último apartado de este bloque, tema 3. Los motivos para que exista un interés por la reutilización de aguas son muy variados: la presión sobre los recursos hídricos existentes, el aumento del precio del agua suministrada, la variabilidad de las existencias de recursos hídricos con períodos de sequía prolongados y el aumento de las necesidades hace que el uso de agua, reutilizada vaya a tener cada vez más importancia en nuestra sociedad.

Programa bloque II.

Tema 1. La tecnología de membranas en el tratamiento de aguas (3 horas)

- 1.1 Membranas, tipos y características.
- 1.2 Fundamentos de los procesos de membranas: Fuerza impulsora, polarización, flujo crítico.
- 1.3 Transferencia de materia en sistemas de membrana.
- 1.4 Ensuciamiento de las membranas.
- 1.5 Diseño y operación de procesos de membrana.

Tema 2. Biorreactores de membrana para el tratamiento de aguas (4 horas).

- 2.1 Tipos de biorreactores de membrana (BRMs) utilizados en el tratamiento de aguas.
- 2.2 Aplicación de BRMs a la depuración de aguas residuales urbanas.
- 2.3 Aplicación de BRMs a la depuración de aguas residuales industriales.

Tema 3. Reutilización de aguas residuales (3 horas).

- 3.1 La calidad del agua para la reutilización. Legislación y normativa.
- 3.2 Aspectos sanitarios en la reutilización de aguas.

### 3.3 Tecnologías para reutilización de aguas, usos:

3.3.1 Reutilización de aguas en la industria.

3.3.2 Reutilización de aguas urbanas.

3.3.3 Reuso en la agricultura.

3.3.4 Recarga de acuíferos.

### Bloque III. Eliminación de nutrientes. (1 Crédito) (*Prof José Luís Campos*)

En este bloque se estudiará la eliminación de compuestos nitrogenados y de fósforo tanto por medio de métodos físico-químicos como biológicos. En primer lugar se estudiará el impacto que tienen dichos compuestos y las normativas que regulan su vertido. Se tratará la eliminación de nitrógeno desde el punto de vista tradicional (proceso de nitrificación/desnitrificación) dando a conocer al alumno las unidades habitualmente usadas, posteriormente se estudiarán las mejoras que se están llevando a cabo tanto en el diseño de reactores como en el descubrimiento de nuevos procesos. Por último se hará una descripción del proceso de eliminación biológica de fósforo y de los sistemas usados para llevarla a cabo.

#### *Programa Bloque III.*

##### Tema 1. Introducción

Criterios ecológicos: Impacto de compuestos de N e P. Criterios legislativos: Legislación aguas residuales urbanas e industriales

##### Tema 2. Eliminación de nitrógeno: Procesos convencionales

Ciclo del nitrógeno. Origen de los contaminantes en el ambiente. Sistemas físico-químicos. Sistemas biológicos: nitrificación-desnitrificación: Parámetros cinéticos y estequiométricos, estrategias para integrar nitrificación e desnitrificación, sistemas con biomasa en suspensión e biopelícula.

##### Tema 3. Eliminación de nitrógeno: Procesos avanzados

Procesos de nitrificación e desnitrificación. Ruta del nitrito. Proceso Anammox. Desnitrificación autótrofa

##### Tema 4. Eliminación de fósforo.

Origen de los contaminantes en el ambiente. Sistemas físico-químicos: Precipitación en lodos activos, reactores de lecho fluidizado. Sistemas biológicos: Microbiología del proceso, tecnologías.

Bloque IV. Actividades de investigación y diseño de equipos de tratamiento biológico de aguas del grupo de ingeniería ambiental de la USC (1 Crédito) (*Prof. R. Méndez*).

El objetivo primordial de este bloque es transmitir, con una visión global, los resultados obtenidos en el grupo de Ingeniería Ambiental de la USC en el tratamiento de aguas en diferentes sectores industriales con énfasis en el estudio del desarrollo de tecnología, partiendo de los primeros estadios de gestión de aguas e investigación básica, hasta la eventual construcción de plantas industriales, incluyendo la incorporación de tecnologías limpias.

#### *Programa Bloque IV*

Tema 1.- Estudios de gestión/ Caracterización.

Tema 2.- Tratamiento anaerobio.

Estudios de biodegradabilidad y toxicidad.

Reactores de laboratorio.

Pilotos industriales.

Instalaciones industriales.

Proyectos actuales.

Tema 3.- Eliminación de nitrógeno.

Estudios de evaluación de actividades, toxicidad e inhibición

Desarrollo de unidades de nitrificación

Desarrollo de unidades de desnitrificación

Desarrollo de unidades de sistemas acoplados para la eliminación de C y N

Aplicaciones a escala industrial

Proyectos actuales

Bloque V. Simulación de plantas de lodos activos (2 Créditos) (*Prof. Luís Larrea*).

El objetivo del bloque V del programa es el familiarizar al alumno con los modelos matemáticos que se usan para simular el comportamiento de plantas de tratamiento de lodos activos, en la eliminación de materia orgánica, nitrógeno y fósforo. Las clases se estructuran como una combinación de clases de teoría, donde se exponen los modelos usados para la simulación de plantas y clases aplicadas, donde el alumno realizará ejercicios de simulación de plantas de tratamiento en ordenadores, usando el programa WEST. Se ilustrarán los contenidos con una serie de ejemplos prácticos relativos a la aplicación de dichos modelos para apoyar el diseño de plantas de tratamiento.

#### *Programa bloque V.*

Tema 1. Modelado matemático de eliminación de N y P.

Tema 2. Plan de muestreo y análisis en planta y de ensayos batch para seguimiento y control de plantas piloto y/o reales y para calibración de modelos matemáticos de eliminación de N y P.

Tema 3. Prácticas de ordenador de diseño y operación de procesos de fangos activos N-P con simulador WEST.

Tema 4. Modelado de biopelículas y simulación de procesos de eliminación de nitrógeno con simulador AQUASIM.

Como se aprecia en el ejercicio se demuestra un carácter integrador y generalizador, dado que los fundamentos teóricos que utiliza y los problemas que se analizan proceden de diferentes campos.

#### **Contenidos de las disciplinas del currículo del ingeniero químico.**

Operaciones y Procesos Unitarios.

##### **Sistema de habilidades.**

Identificar los fenómenos químicos accesibles a su conocimiento que están involucrados en las operaciones del proceso.

##### **Sistema de valores.**

Capacidad de adquirir conocimientos por sí mismo expresado en la independencia mostrada al analizar situaciones que requieren el empleo de conocimientos provenientes de las diferentes partes de la asignatura, y de integrarlos de manera que contribuyan al logro de un objetivo único.

### **Objetivos educativos e instructivos.**

Capacidad para orientarse y utilizar el sistema de información científico-técnica, el análisis de la estructura científica de la profesión, su campo de acción y los objetivos esenciales del profesional, el empleo sistemático de conocimientos y habilidades lógicas, el análisis de problemas no estructurados que requieran el dominio parcial de contenidos no desarrollados en clases y con actividades de todo tipo desarrolladas con un alto grado de independencia, el reconocimiento de la actuación del hombre sobre el medio circundante como el agente decisivo en la formación de su personalidad, el análisis de la relación entre los procesos productivos, las necesidades sociales, el análisis y empleo de las medidas de protección física y ambiental como medios para la protección del hombre y del medio ambiente, la solución de tareas técnicas propias del ejercicio de la profesión, desarrolladas a través del vínculo laboral- investigativo, cuya estructura fenomenológica responda a la naturaleza real de los problemas y no a las características de una disciplina en particular, el reconocimiento en los problemas profesionales de elementos técnicos y de factores de índole social, y que por tanto su solución exige una formación técnica específica, unida al dominio de factores jurídicos y a rasgos personales determinantes de una postura activa ante la vida, llevar a la práctica la esencia de las estrategias curriculares como una consecuencia natural del desarrollo de actividades propias del ejercicio de la profesión, desarrollar los elementos imprescindibles para ejercitar conscientemente la capacidad de educarse por sí mismos, integrar los conceptos fundamentales (más que las disciplinas), en un modo de actuar que utilice a todos cuanto se precisen simultáneamente.

### **Indicaciones metodológicas y de organización de las disciplinas.**

En los talleres que se logre la vinculación de un tema principal abordado con otros complementarios propios de la disciplina o pertenecientes a otras disciplinas. Integrar los conocimientos recibidos en la disciplina. Los talleres han de contribuir a elevar la eficacia del trabajo independiente de los estudiantes.

### **Ejercicio 8.**

Se plantea la realización de balances de materiales y energía para determinar la producción de biomasa en el tratamiento de corrientes residuales.

1 Describa el procedimiento a seguir para cumplimentar dicha encomienda.

2 Identifique las asignaturas del currículo del ingeniero químico donde se aplican los balances de masa y energía.

3 Establezca las relaciones que tienen lugar entre tratamiento de agua y reactores en la información que se brinda a continuación.

Balance de biomasa

$$dX/dt = (F/V) \cdot X_0 - (F/V) \cdot X + \mu \cdot X - k_d \cdot X \quad (1.1)$$

Suponiendo:

- \* Estado estacionario:  $dX/dt = 0$
  - \* Alimentación estéril,  $X_0 \cong 0$
  - \* Velocidad de muerte despreciable,  $k_d \cong 0$
- $$- (F/V) \cdot X + \mu \cdot X = 0$$

Por definición, D: Velocidad de dilución =  $F/V$  ( $h^{-1}$ )

Cancelando X (si  $X \neq 0$ )  $\mu = D$

Balance de sustrato limitante

Combinando las ecuaciones 6 y 7 y dividiendo por V se tiene:

$$dS/dt = (F/V) \cdot S_0 - (F/V) \cdot S - \mu \cdot X/Y_G - m \cdot X - q_P \cdot X/Y_P \quad (1.2)$$

Suponiendo:

Estado estacionario:  $dS/dt = 0$

Consumo de sustrato para mantenimiento despreciable,  $m \cong 0$

Consumo de sustrato para formación de producto despreciable,  $q_P \cong 0$

$$X = Y_{X/S} \cdot (S_0 - S) \quad (1.3)$$

Balance de producto

Combinando las ecuaciones 9 y 10 y dividiendo por V se tiene:

$$dP/dt = (F/V) \cdot P_0 - (F/V) \cdot P + q_P \cdot X \quad (1.4)$$

Suponiendo:

Estado estacionario:  $dP/dt = 0$

Alimentación sin producto,  $P_0 \cong 0$

$$P = qP \cdot X / D \quad (1.5)$$

Un fermentador tipo tanque agitado en estado estacionario se denomina quimiostato.

Como se aprecia en el ejercicio se demuestra un carácter integrador y generalizador, dado que los fundamentos teóricos que utiliza y los problemas que se analizan proceden de diferentes campos.

### **Contenidos de las disciplinas del currículo del ingeniero químico.**

Contenidos de la asignatura tratamiento de aguas y residuales.

Contenidos de la asignatura reactores heterogéneo.

### **Sistema de habilidades**

Capaz de aplicar una metodología general para la resolución de problemas de balances de masa, utilizar los principios estequiométricos en la resolución de problemas de balances de masa donde ocurren reacciones químicas, resolver balances de masa en situaciones donde existan corrientes recirculadas.

### **Sistema de valores**

Capacidad para educarse por sí mismo, percibir la necesidad de proteger la naturaleza y el medio ambiente, mediante la ejecución de trabajos técnicos realizados con esa finalidad.

### **Objetivos educativos e instructivos.**

Vincular diferentes leyes, fenómenos, modos de operar y el impacto ambiental que provocan, como elementos determinantes del comportamiento de estas.

### **Indicaciones metodológicas y de organización de las disciplinas**

Dado el hecho de que los balances de masa y de energía tienen la característica de integrar los conocimientos y además un carácter poco esquemático se hace necesario que los estudiantes que los reciban hayan logrado desarrollar aceptablemente la capacidad de trabajo independiente y el enfoque debe ser ingenieril al estudio cuantitativo del equilibrio químico de reacciones homogéneas y heterogéneas.

Se hace hincapié, cuando el proceso simplificado sobre el cual se trabaja lo permite, en la necesidad de cuidar el medio ambiente

### **Ejercicio 9.**

En la asignatura reactores heterogéneos se contempla el diseño y análisis de reactores biológicos fermentadores.

- 1 Describa los puntos de contacto que tienen con la asignatura tratamiento de agua y residuales.
- 2 Ejemplifique con casos reales la relación del contenido del ejemplo que redescubre a continuación.
- 3 Señale otras asignaturas que se aplica en el ejemplo que se presenta.

## DISEÑO Y ANÁLISIS DE REACTORES BIOLÓGICOS FERMENTADORES.

### Parte II: Metodología - Ecuaciones

#### 3.0 Metodología

El análisis de un biorreactor consiste en conocer su desempeño bajo diferentes condiciones de operación. Para ello se requiere saber la cinética del proceso biológico y los fenómenos de transporte que tienen lugar.

Cada biorreactor tiene características propias de flujo, de mezcla y de actividad transformadora por unidad de volumen por lo que cumplirá con requerimientos diferentes de producción.

El diseño implica establecer las características del dispositivo y las condiciones de operación que satisfacen los criterios de producción y de economía del emprendimiento industrial.

#### **Variables, parámetros y ecuaciones**

Variabes de estado:  $X$ ,  $S$ ,  $P$

Variabes de operación:  $X_0$ ,  $S_0$ ;  $P_0$ ,  $F$ ,  $V$ ,  $pH$ , entre otros.

Variabes intermedias:  $r_X$ ,  $r_S$ ,  $r_P$ ,  $\mu$ ,  $q_S$ ,  $q_P$

Parámetros estequiométricos:  $Y_G$ ,  $Y_P$

Parámetros cinéticos:  $\mu_m$ ,  $m$ ,  $k_d$ ,  $Y_{X/S}$ ,  $Y_{P/S}$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $K_I$ , entre otros.

Ecuaciones de balance de materiales y de energía

Ecuaciones cinéticas: transferencia (calor, masa), reacciones biológicas.

Ecuaciones termodinámicas

Restricciones

Condiciones iniciales

Régimen: estacionario, no estacionario

### **Ecuaciones generales**

Las ecuaciones que describen el sistema son:

Ecuaciones de balance:

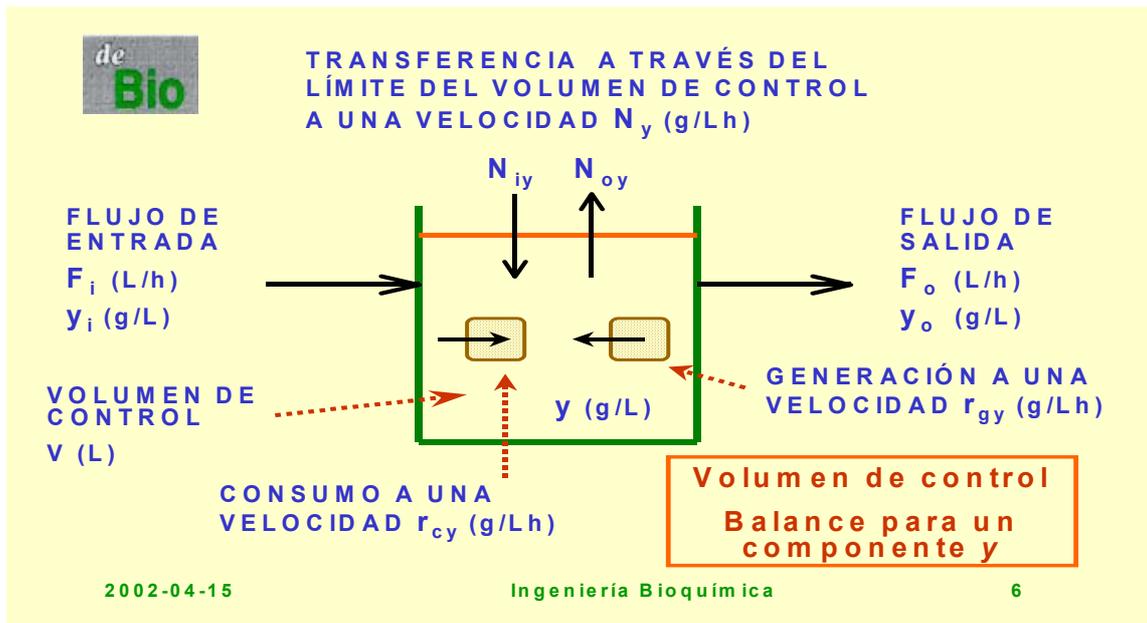
De materiales: biomasa, substratos, productos

De elementos: carbono, oxígeno, nitrógeno

De energía

Ecuaciones de Velocidad de transferencia de masa y de energía a través de la región de control.

Velocidades de generación o de consumo dentro de la región de Ecuaciones fisicoquímicas (termodinámicas).



**Figura 1.1** Transferencia a través del límite del volumen de control.

Como se aprecia en el ejercicio se demuestra un carácter integrador y generalizador, dado que los fundamentos teóricos que utiliza y los problemas que se analizan proceden de diferentes campos.

### Contenidos de las disciplinas del currículo del ingeniero químico

Contenidos de la asignatura reactores heterogéneo.

#### Sistema de habilidades

Determinar las condiciones de medición necesarias para realizar balances de masa y energía en plantas existentes. Establecer las condiciones necesarias de control de un proceso tecnológico.

Determinar las composiciones de equilibrio de reacciones homogéneas gaseosas, líquidas y en reacciones heterogéneas gas-sólido, constante de velocidad y órdenes de reacción, así como cuantificar los procesos electroquímicos y los parámetros característicos de la adsorción y la catálisis. Determinar la dirección, extensión y velocidad de las reacciones químicas en sistemas homogéneos en fase gaseosa, fase líquida y en sistemas heterogéneos.

#### Sistema de valores

Capacidad de adquirir conocimientos por sí mismo expresado en la independencia mostrada al analizar situaciones que requieren el empleo de conocimientos provenientes de las diferentes partes de la asignatura, y de integrarlos de manera que contribuyan al logro de un objetivo único.

Desarrollar la capacidad para educarse por sí mismo, percibir la necesidad de proteger la naturaleza y el medio ambiente, mediante la ejecución de trabajos técnicos realizados con esa finalidad

### **Objetivos educativos e instructivos.**

Integrar los conocimientos y habilidades adquiridas en las disciplinas precedentes y paralelas como fundamentación para la resolución de balances de masa y de energía, ampliar el campo de aplicaciones de los balances de energía y generalizar los tratamientos cuantitativos sobre equilibrio físico y químico a situaciones reales de ingeniería, realizar, a nivel productivo, análisis termodinámicos a diferentes sistemas reales tales como , reactores químicos, por separados o integrados en diferentes combinaciones.

### **Indicaciones metodológicas y de organización de las disciplinas**

Deben utilizarse aquellos métodos de enseñanza que obliguen al estudiante a participar de una forma activa en ellos, de tal forma que logre crear el hábito de aprender por sí mismo.

### **Ejercicio 10.**

En la asignatura reactores heterogéneos se contempla el diseño y análisis de reactores biológicos fermentadores.

- 1 Describa los puntos de contacto que tienen con la asignatura tratamiento de agua y residuales.
- 2 Ejemplifique con casos reales la relación del contenido del ejemplo que se describe a continuación.
- 3 Señale otras asignaturas que se aplican en el ejemplo que se presenta.

## **DISEÑO Y ANÁLISIS DE REACTORES BIOLÓGICOS.**

### **FERMENTADORES**

Parte III: Análisis de fermentadores

Análisis de fermentadores

El análisis de los fermentadores se basa en manipular aquellas variables que controlan la velocidad de crecimiento. Desde el punto de vista práctico son las siguientes:

Concentración de un nutriente esencial limitante;

Concentración de biomasa;

Variable ambiental: temperatura, pH, entre otros.

### **Fermentador continuo tipo tanque agitado**

La fermentación continua permite un alto nivel de productividad en términos de transformación por unidad de tiempo y por unidad de volumen.

No obstante su difusión está restringida a un grupo reducido de aplicaciones debido a los siguientes obstáculos:

Dificultad para mantener asepsia por largo tiempo;

Cambios genéticos de la cepa;

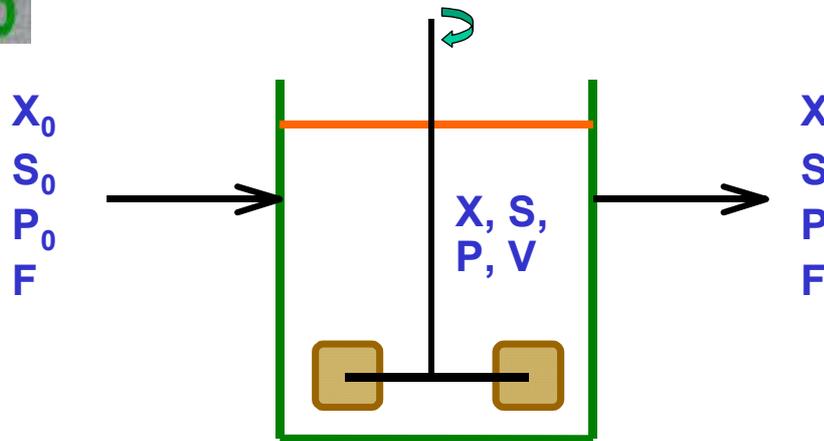
Desconocimiento dinámico del sistema.

Baja velocidad del bioproceso.

Ejemplos de aplicación: tratamiento de efluentes, producción de levadura de panadería, proteína



Fermentador continuo tipo tanque agitado



Suposiciones generales

- ✘ Mezcla perfecta;
- ✘ Flujo de entrada y salida iguales ( $F_i = F_o = F$ );
- ✘ Volumen de líquido en el biorreactor constante ( $dV/dt = 0$ );
- ✘ Temperatura, pH, velocidad de transferencia de oxígeno, etc. constantes.

2003-03-25

Ingeniería Bioquímica

5

unicelular, etanol, cerveza, vino, ácido acético, selección de inóculos, entre otros. Fermentador continuo tipo tanque agitado.

**Figura 1.2 Fermentador continuo, tipo tanque agitado.**

Suposiciones generales

Mezcla perfecta;

Flujo de entrada y salida iguales ( $F_i = F_o = F$ );

Volumen de líquido en el biorreactor constante ( $dV/dt = 0$ );

Temperatura, pH, velocidad de transferencia de oxígeno, entre otros, constantes.

Como se aprecia en el ejercicio se demuestra un carácter integrador y generalizador, dado que los fundamentos teóricos que utiliza y los problemas que se analizan proceden de diferentes campos.

### **Contenidos de las disciplinas del currículo del ingeniero químico.**

Reactores heterogéneos.

Tratamiento de residuales de la industria química.

Fundamentos químicos y biológicos (Microbiología ambiental y aplicada)

### **Sistema de habilidades**

Interpretar el efecto de las variables de operación sobre la velocidad global de reacción y sobre el comportamiento de los reactores.

Realizar balances de masa y energía en plantas existentes. Establecer las condiciones necesarias de control de un proceso tecnológico.

### **Sistema de valores**

Capacidad de adquirir conocimientos por sí mismo expresado en la independencia mostrada al analizar situaciones que requieren el empleo de conocimientos provenientes de las diferentes partes de la asignatura , y de integrarlos de manera que contribuyan al logro de un objetivo único.

### **Objetivos educativos e instructivos**

Vincular diferentes leyes, fenómenos, modos de operar y el impacto ambiental que provocan, como elementos determinantes del comportamiento de estas, y en las que se analice de qué forma los cambios en uno cualquiera de dichos elementos que influyen sobre los otros y sobre el comportamiento global de las mismas, y sobre el entorno, análisis de problemas simples típicos de la profesión, evaluación del comportamiento de las estaciones de las aguas de abasto a la industria de procesos y de los sistemas tecnológicos para el tratamiento, reutilización y vertimiento de los residuales industriales, teniendo en cuenta su impacto ambiental y el uso racional de los recursos naturales y energéticos, diseño y análisis del comportamiento de reactores químicos homogéneos y heterogéneos en distintas condiciones de operaciones típicas de los procesos químicos.

## Indicaciones metodológicas y de organización de las disciplinas

Consideración de variantes de operación y diseño de procesos tecnológicos, análisis de anomalías de funcionamiento y otros problemas comunes en la operación de plantas.

### Ejercicio 11.

En la asignatura tratamiento de agua y residuales se describen los fundamentos de la oxidación biológica a través del modelo de Monod. En la asignatura reactores heterogéneos también se hace alusión al modelo de Monod.

Haga un análisis de los aspectos comunes que involucren en cada asignatura y a su vez compárelos con la información que se brinda a continuación.

El quimiostato de Monod

Es un quimiostato donde el crecimiento sigue el modelo cinético de Monod,

Introduciendo dicha ecuación se tiene:

$$D = (\mu_m \cdot S) / (K_S + S) \quad \text{Despejando } S, \text{ se tiene:} \quad (4.1)$$

$$S = K_S \cdot D / (\mu_m - D) \quad (4.2)$$

Sustituyendo S:

$$X = Y_{X/S} \cdot [S_0 - K_S \cdot D / (\mu_m - D)] \quad (4.3)$$

Velocidad crítica de dilución.

El quimiostato puede ser operado hasta un valor límite máximo de D a partir del cual se tiene la situación de lavado: el medio de cultivo egresa tal cual entró sin sufrir transformación. Ese valor se conoce con el nombre de velocidad crítica de dilución,  $D_C$ .

$$\text{Cuando } S \rightarrow S_0, X \rightarrow X_0, \text{ se tiene } D \rightarrow D_C \quad (4.4)$$

$$D_C = (\mu_m \cdot S_0) / (K_S + S_0) \quad (4.5)$$

Generalmente  $S_0 \gg K_S \Rightarrow D_C \cong \mu_m$

En un quimiostato se trabaja a una fracción de  $\mu_m$

El fermentador continuo impone una condición selectiva adicional para el crecimiento microbiano: el microorganismo debe crecer a una velocidad definida por el sistema.

Productividad volumétrica de biomasa

$$Q_X = \text{Productividad volumétrica de biomasa} = (X - X_0) \cdot D \text{ (g/Lh)} \quad (4.6)$$

$$\text{Si } X_0 = 0 \quad Q_X = Y_{X/S} \cdot D [ S_0 - K_S \cdot D / (\mu_m - D) ] \quad (4.7)$$

$$\text{Cálculo de } Q_X \text{ máxima, } (Q_X)_m \Rightarrow \partial(X \cdot D) / \partial D = 0 \quad (4.8)$$

$$D_m = \mu_m \cdot [ 1 - [ K_S / (K_S + S_0) ]^{0.5} ] \quad (4.9)$$

$$S_m = [ K_S / (K_S + S_0) ]^{0.5} \cdot K_S \quad (4.10)$$

$$X_m = Y_{X/S} \cdot [ S_0 + K_S - [ K_S \cdot (S_0 + K_S) ]^{0.5} ] \quad (4.11)$$

$$(Q_X)_m = Y_{X/S} \cdot \mu_m \cdot [ (K_S + S_0)^{0.5} - K_S^{0.5} ]^2 \quad (4.12)$$

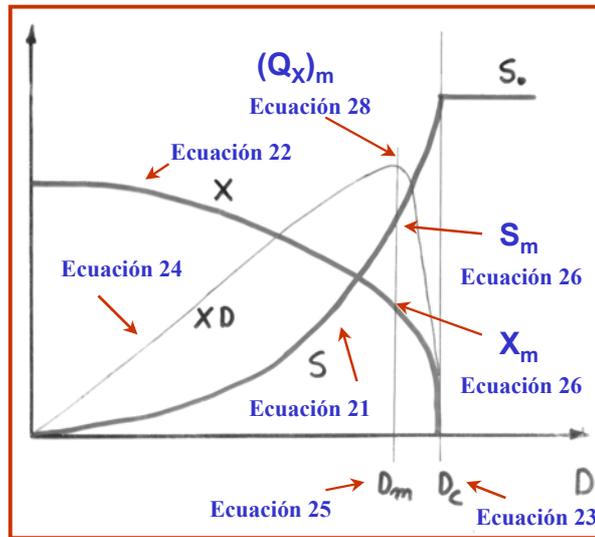
El subíndice m indica los valores de D, S y X a  $Q_X$  máxima

Generalmente  $S_0 \gg K_S \Rightarrow D_m$  está próximo a  $\mu_m$  y por lo tanto cerca de  $D_C$ .  $D_m$  está en una zona de inestabilidad

$$\text{Si } S_0 \gg K_S \Rightarrow (Q_X)_m = Y_{X/S} \cdot \mu_m \cdot S_0 \quad (4.13)$$

Representación gráfica del quimiostato de Monod.

Representación gráfica del quimiostato de Monod



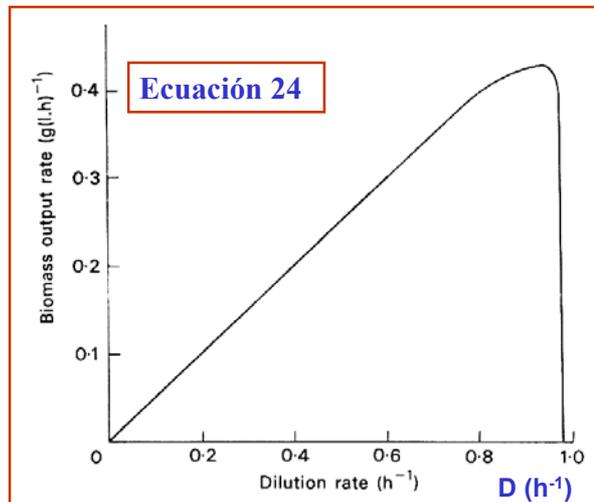
2003-03-25

Ingeniería Bioquímica

12

Figura 1.3 Representación gráfica del quimiostato de Monod.

$Q_x = XD$   
(g/Lh)



20

2003-03-25

Ingeniería Bioquímica

14

Figura 1.3.1 Representación gráfica del quimiostato de Monod. figura 1.3.2 Representación gráfica del quimiostato de Monod.

Formación de producto

Suponiendo un modelo cinético de formación de producto asociada al crecimiento de acuerdo a la ecuación 13, es posible expresar la ecuación 20 de la siguiente manera:

$$P = \alpha \cdot \mu \cdot X / D \quad (5.12) \quad \text{Si } \mu = D \text{ (ecuación 18) se tiene}$$

$$P = \alpha \cdot X$$

Sustituyendo  $\alpha = q_p / \mu = Y_{P/S} / Y_{X/S}$ , y la ecuación 22 en la 30 se tiene:

$$P = Y_{P/S} \cdot [ S_0 - K_S \cdot D / (\mu_m - D) ]$$

$$\text{Productividad volumétrica de producto: } Q_P = (P - P_0) \cdot D$$

$$\text{Si } P_0 = 0 \quad Q_P = Y_{P/S} \cdot D \cdot [ S_0 - K_S \cdot D / (\mu_m - D) ]$$

$$(Q_P)_m = Y_{P/S} \cdot \mu_m \cdot [ (K_S + S_0)^{0.5} - K_S^{0.5} ]^2$$

Como se aprecia en el ejercicio se demuestra un carácter integrador y generalizador, dado que los fundamentos teóricos que utiliza y los problemas que se analizan proceden de diferentes campos.

### **Contenidos de las disciplinas del currículo del ingeniero químico**

Reactores heterogéneos.

La disciplina fundamentos químicos y biológicos incluye entre sus contenidos: biomoléculas e integridad del metabolismo. Características estructurales, propiedades físicas y químicas. Fundamentos del metabolismo: síntesis y degradación. Crecimiento y nutrición de los microorganismos. Microbiología ambiental y aplicada.

### **Sistema de habilidades**

Interpretar el efecto de las variables de operación sobre la velocidad global de reacción y sobre el comportamiento de los reactores.

### **Sistema de valores**

Empleo de conocimientos provenientes de las diferentes partes de la asignatura y de integrarlos de manera que contribuyan al logro de un objetivo único.

### **Objetivos educativos e instructivos**

Interpretación de los principios básicos de la química, química física, bioquímica y microbiología para su aplicación práctica a nivel productivo, desarrollando hábitos y habilidades que le permitan

la educación por sí mismo, determinar el comportamiento de las biomoléculas en procesos biosintéticos, aplicando los conceptos de metabolismo sobre la base de la enzimología y la bioenergética, determinar el comportamiento de los microorganismos en un proceso biotecnológico y de la industria alimentaria a partir de las leyes que rigen su crecimiento.

### **Indicaciones metodológicas y de organización de las disciplinas**

Vinculación de un tema principal abordado con otros complementarios propio de la disciplina o perteneciente a otras disciplinas. Integrar los conocimientos recibidos en la disciplina, solución de problemas de análisis, selección y proyecto de operaciones y procesos unitarios, tanto considerados aisladamente, como vinculados a una tecnología determinada, debe dársele la debida importancia, durante la actividades prácticas, a la consideración de variantes de operación y diseño de procesos tecnológicos, al análisis de anomalías de funcionamiento y otros problemas comunes en la operación de plantas.

### **Ejercicio12.**

A partir de la información que se brinda haga un análisis de las asignaturas del currículo que sustentan teóricamente la misma.

Información.

Fermentador continuo con realimentación celular. Es un fermentador con alta concentración de biomasa lograda por la realimentación (reciclo, retroalimentación) de una fracción de la biomasa producida.

En la realimentación interna una fracción de biomasa producida se separa y se mantiene dentro del mismo.

En la realimentación externa la biomasa producida se separa fuera del fermentador y una fracción se retorna al mismo.

Una concentración elevada de biomasa activa permite mayor actividad metabólica y por lo tanto mejorar la productividad del sistema.

Los sistemas de fermentación con alta concentración de biomasa se requieren cuando:

Se necesita alta productividad general (Ejemplo: reducir costo de equipo, falta de espacio, aprovechamiento eficiente de un substrato);

Reducción de efectos de inhibición ocasionados por alta concentración de sustrato, producto o compuestos inhibidores;

Mitigar el efecto de variables ambientales en valores no óptimos (Ejemplos: temperatura o pH fuera del rango óptimo);

Reducir limitaciones particulares de transferencia de masa (Ejemplo: biodisponibilidad de sustratos insolubles).

Algunas limitaciones que pueden estar presentes:

Dificultad para manejar líquidos con alta concentración de sólidos (tanto disueltos como suspendidos);

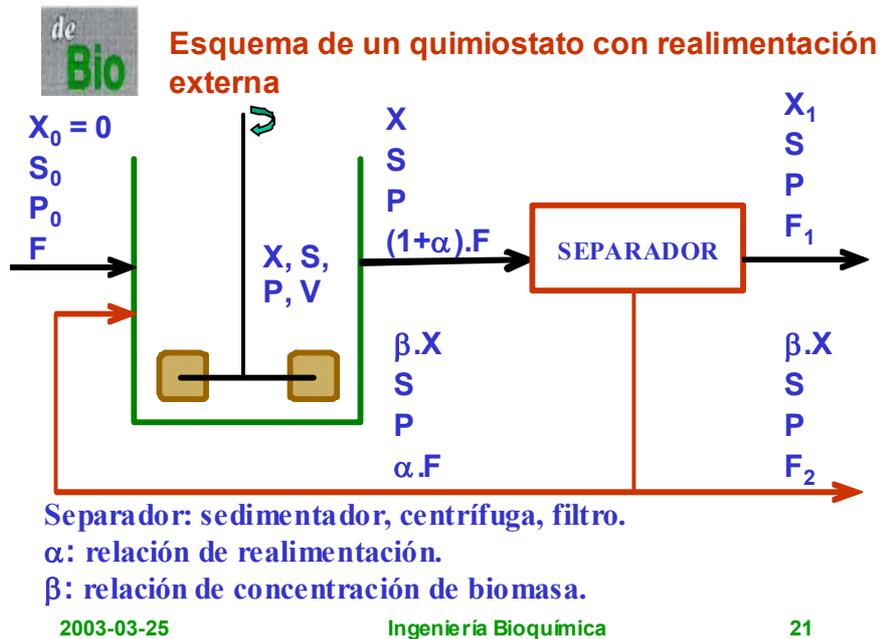
Dificultad para separar biomasa;

Acumulación en el sistema de sólidos no deseables (sólidos suspendidos, biomasa muerta, entre otros.)

Limitaciones en las velocidades de transferencia de calor y masa;

Limitaciones de mezclado;

Consumo de sustrato para mantenimiento celular no despreciable;



Muerte celular no despreciable, (pérdida de viabilidad celular).

**Figura 1.4 Esquema de un quimiostato con realimentación externa.**

Balance de biomasa en el fermentador, estado estacionario

Considerando las suposiciones previas se tiene:

$$\alpha \cdot D \cdot \beta \cdot X - (1 + \alpha) \cdot D \cdot X + \mu \cdot X = 0 \quad (5.1)$$

$$\mu = (1 + \alpha - \alpha \cdot \beta) \cdot D \quad (5.2)$$

$$B = (1 + \alpha - \alpha \cdot \beta) \quad (5.3)$$

Si no hay realimentación:  $\beta = 1$  y/o  $\alpha = 0 \Rightarrow B = 1$

Si hay realimentación:  $\beta > 1$ ,  $\alpha < 1 \Rightarrow \alpha \cdot (1 - \beta) < 0$

$$B = 1 + \alpha \cdot (1 - \beta) < 1 \quad (5.4)$$

$$D = \mu / B \Rightarrow D > \mu \quad (5.5)$$

Es posible trabajar a valores de  $D$  mayores que  $\mu_m$  sin que ocurra lavado.

Se aumenta el rango de operación de  $D$ .

Balance de substrato limitante en el fermentador, estado estacionario

$$D.S_0 + \alpha . D. S - (1 + \alpha).D.S - (\mu/Y_{X/S}).X = 0 \quad (5.6)$$

$$X = (D/\mu) . Y_{X/S} . (S_0 - S) \quad (5.7)$$

Introduciendo ecuación se tiene

$$X = (1/B) . Y_{X/S} . (S_0 - S) \quad (5.8)$$

(1/B): factor de concentración

Balance en el separador, suponiendo  $F_2 \cong 0$

$$(1 + \alpha).D.X = \alpha . D . \beta . X + D. X_1 \quad X_1 = (1 + \alpha - \alpha . \beta) . X \Rightarrow X_1 = B . X$$

No puede ser realimentada toda la biomasa producida. Una fracción debe ser sangrada del sistema para que el sistema alcance el estado estacionario.

Introduciendo la ecuación de Monod se tiene las siguientes ecuaciones:

$$S = K_S.D.B / (\mu_m - B.D) \quad (5.9)$$

$$D_C = (\mu_m . S_0) / [B. (K_S + S_0)] \quad (5.10)$$

$$X = (1/B).Y_{X/S} . [ S_0 - K_S.B.D / (\mu_m - B.D) ] \quad (5.11)$$

La velocidad de dilución crítica se aumenta en un factor de 1/B.

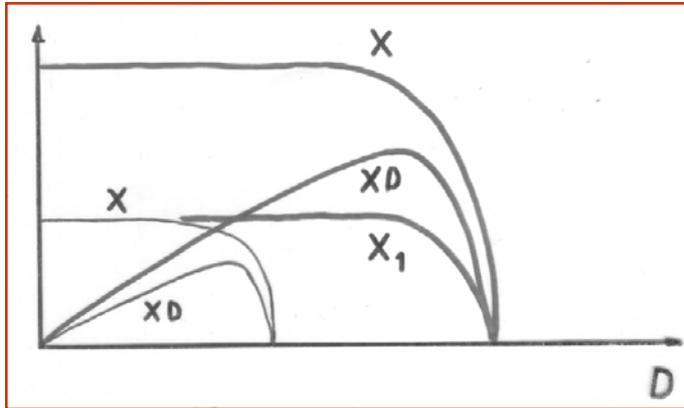
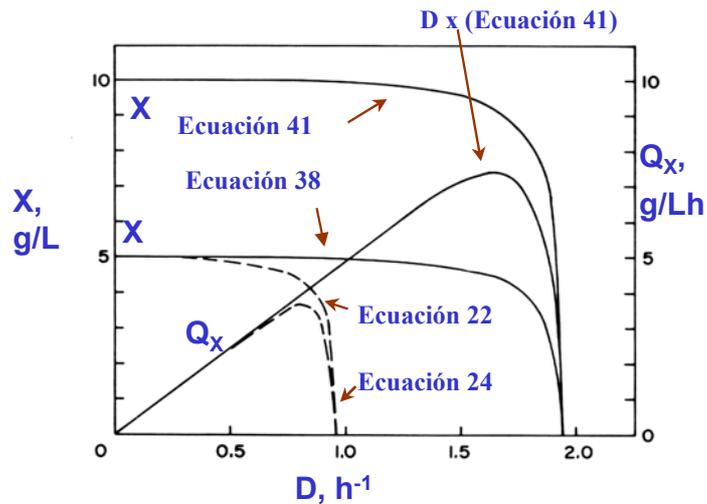


Figura 1.4.1 Esquema de un quimiostato con realimentación externa



Valores:

$\mu_m = 1 \text{ h}^{-1}$ ,  $K_S = 0.2 \text{ g/L}$ ,  $Y_{X/S} = 0.5 \text{ g/g}$ ;  $S_0 = 10 \text{ g/L}$ ,  $\alpha = 0.5$ ;  $\beta = 2$

Figura 1.4.2 Esquema de un quimiostato con realimentación externa

Como se aprecia en el ejercicio se demuestra un carácter integrador y generalizador, dado que los fundamentos teóricos que utiliza y los problemas que se analizan proceden de diferentes campos.

## **Contenidos de las disciplinas del currículo del ingeniero químico**

Operaciones de transferencia de calor, operaciones de transferencia de masa. Reactores químicos homogéneos y heterogéneos.

Biomoléculas e integridad del metabolismo. Características estructurales, propiedades físicas y químicas. Fundamentos del metabolismo: síntesis y degradación. Crecimiento y nutrición de los microorganismos. Microbiología ambiental y aplicada balance de masa, la metodología general para resolver problemas de balances de masa en procesos estacionarios, balances de masa en procesos sin y con reacciones químicas, balances de energía en procesos sin y con reacciones químicas, balances de masa y de energía en procesos no estacionarios y el equilibrio en las reacciones químicas simples homogéneas y heterogéneas entre otras.

### **Sistema de habilidades**

Interpretar el efecto de las variables de operación sobre la velocidad global de reacción y sobre el comportamiento de los reactores.

Determinar las condiciones de medición necesarias para realizar balances de masa y energía en plantas existentes. Establecer las condiciones necesarias de control de un proceso tecnológico.

Determinar las composiciones de equilibrio de reacciones homogéneas gaseosas, líquidas y en reacciones heterogéneas gas-sólido, constante de velocidad y órdenes de reacción, así como cuantificar los procesos electroquímicos y los parámetros característicos de la adsorción y la catálisis. Determinar el comportamiento de los microorganismos en procesos biotecnológicos y de la industria alimentaria a partir de leyes que rigen su crecimiento y metabolismo. Determinar la dirección, extensión y velocidad de las reacciones químicas en sistemas homogéneos en fase gaseosa, fase líquida y en sistemas heterogéneos. Predecir la estructura, propiedades físico-químicas y los métodos más generales de síntesis de los compuestos químicos orgánicos. Inferir el comportamiento de las biomoléculas en procesos biosintéticos aplicando los conceptos del metabolismo y los principios de la enzimología y la bioenergética. Determinar la concentración de componentes en una muestra dada, haciendo uso de métodos de análisis

Identificar los fenómenos químicos accesibles a su conocimiento que están involucrados en las operaciones del proceso, explicar cualitativamente su comportamiento ante los cambios de las variables de operación, determinar los requerimientos materiales y energéticos de cada una de las operaciones componentes, determinar si los equipos y aparatos principales de las operaciones

accesibles a su conocimiento, poseen las dimensiones requeridas para realizar el trabajo establecido o el que se establezca como condición a analizar.

Aplicar una metodología general para la resolución de problemas de balances de masa, utilizar los principios estequiométricos en la resolución de problemas de balances de masa donde ocurren reacciones químicas, resolver balances de masa en situaciones donde existan corrientes recirculadas, evaluar un sistema de generación de vapor, evaluar el equilibrio químico para reacciones gaseosas simples, para una simple reacción química heterogénea y reacciones químicas en fase líquida que forman soluciones ideales.

### **Sistema de valores**

capacidad de adquirir conocimientos por sí mismo expresado en la independencia mostrada al analizar situaciones que requieren el empleo de conocimientos provenientes de las diferentes partes de la asignatura, y de integrarlos de manera que contribuyan al logro de un objetivo único

### **Objetivos educativos e instructivos**

Diseño y análisis del comportamiento de reactores químicos homogéneos y heterogéneos en distintas condiciones de operaciones típicas de los procesos químicos.

Capacidad para adquirir conocimientos por sí mismo, constituye uno de los rasgos más definitorios de la calidad de toda educación de nivel superior, desarrollar la constancia del hábito de producir reflexivamente y evaluar críticamente los resultados de su trabajo.

Interpretación de los principios básicos de la química, química física, bioquímica y microbiología para su aplicación práctica a nivel productivo, desarrollando hábitos y habilidades que le permitan la educación por sí mismo, determinar el comportamiento de las biomoléculas en procesos biosintéticos, aplicando los conceptos de metabolismo sobre la base de la enzimología y la bioenergética, determinar el comportamiento de los microorganismos en un proceso biotecnológico y de la industria alimentaria a partir de las leyes que rigen su crecimiento.

Orientarse y utilizar el sistema de información científico-técnica, el análisis de la estructura científica de la profesión, su campo de acción y los objetivos esenciales del profesional, el empleo sistemático de conocimientos y habilidades lógicas, el análisis de problemas no estructurados que requieran el dominio parcial de contenidos no desarrollados en clases y con actividades de todo tipo desarrolladas con un alto grado de independencia, el reconocimiento de

la actuación del hombre sobre el medio circundante como el agente decisivo en la formación de su personalidad.

Integrar los conocimientos y habilidades adquiridas en las disciplinas precedentes y paralelas como fundamentación para la resolución de balances de masa y de energía, ampliar el campo de aplicaciones de los balances de energía y generalizar los tratamientos cuantitativos sobre equilibrio físico y químico a situaciones reales de ingeniería, realizar, a nivel productivo, análisis termodinámicos a diferentes sistemas reales tales como hornos, generadores de vapor, turbinas, compresores, equipos de transferencia de calor, ciclos de potencia y de refrigeración, columnas de destilación, reactores químicos, etc, por separados o integrados en diferentes combinaciones.

### **Indicaciones metodológicas y de organización de las disciplinas**

Solución de problemas de análisis, selección y proyecto de operaciones y procesos unitarios, tanto considerados aisladamente, como vinculados a una tecnología determinada, debe dársele la debida importancia, durante la actividades prácticas, a la consideración de variantes de operación y diseño de procesos tecnológicos, al análisis de anomalías de funcionamiento y otros problemas comunes en la operación de plantas.

Vinculación de unos temas principales abordados con otros complementarios propios de la disciplina o pertenecientes a otras disciplinas. Integrar los conocimientos recibidos en la disciplina. Los talleres han de contribuir a elevar la eficacia del trabajo independiente de los estudiantes.

Además, en las clases y talleres, se deben introducir elementos de análisis económico de los procesos y operaciones estudiado.

Se recomienda impartir talleres con la modalidad no presencial del profesor como vía de estimular el autodesarrollo en los estudiantes de manera que adquieran una mayor independencia, así como hábitos y habilidades de interpretación y adquisición de conocimientos por sí mismos.

### Ejercicio 13.

Analice el ejemplo que se presenta a continuación y defina los principios que se cumplen de las disciplinas fundamentos químicos y biológicos, operaciones y procesos unitarios y la disciplina integradora (ingeniería de procesos).

Ejemplo

Se produce ácido cítrico en un fermentador continuo a partir de un medio a base de glucosa. Se dispone de la siguiente información sobre la cinética y estequiometría del bioproceso:

$$Y_G = 0.47 \text{ g/g} \quad Y_P = 1.07 \text{ g/g} \quad m = 0.027 \text{ g/gh}$$

$$q_P = \alpha \cdot \mu + \beta = 0.16 \cdot \mu + 1.94 \text{ (g/gh)}$$

$$\mu \text{ (h}^{-1}\text{)} \quad 0.5 \quad 0.37 \quad 0.20 \quad 0.074$$

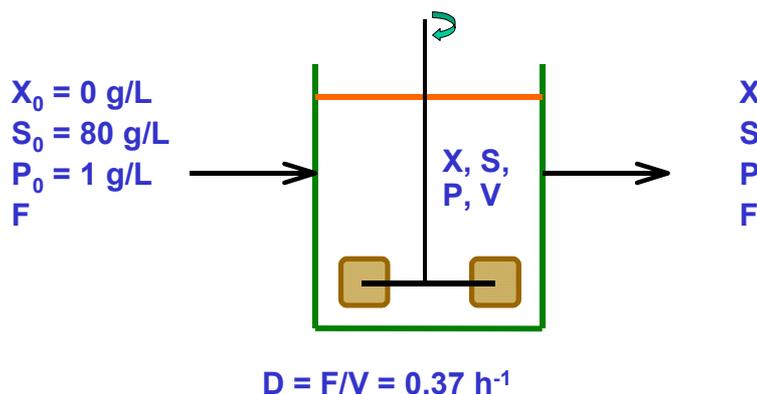
$$S \text{ (g/L)} \quad 80 \quad 20 \quad 5 \quad 1$$

$$\text{Datos operativos: } S_0 = 80 \text{ g/L} \quad P_0 = 1 \text{ g/L} \quad X_0 = 0 \text{ g/L} \quad D = 0.37 \text{ h}^{-1}$$

Estimar concentración de ácido cítrico alcanzada, conversión de glucosa y coeficiente de rendimiento de producto ( $Y_{P/S}$ ) para un quimiostato, con y sin realimentación externa, según diagramas.



#### Quimiostato sin realimentación



2003-03-25

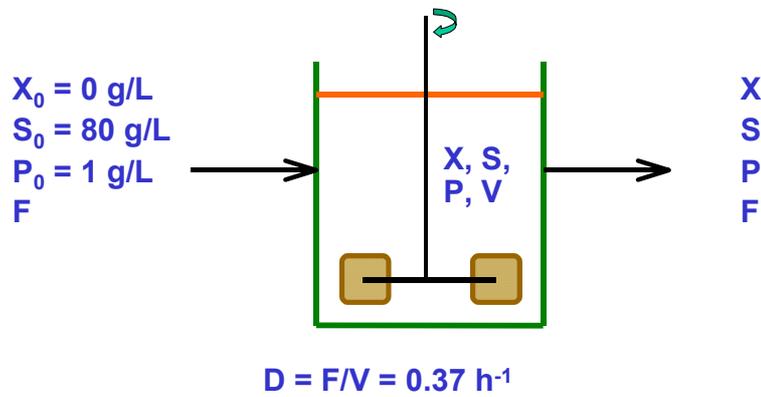
Ingeniería Bioquímica

28

Figura 1.5 Quimiostato sin realimentación.



## Quimiostato sin realimentación



2003-03-25

Ingeniería Bioquímica

28

Figura 1.5 Quimiostato sin realimentación.

### Balance de materiales

|               | Sin realimentación                                                                | Con realimentación                                                                                                      |
|---------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Biomasa       | $\mu = D$                                                                         | $\mu = (1 + 0.2 - 0.2 \cdot 5) \cdot D$                                                                                 |
| Glucosa       | $D \cdot S_0 - D \cdot S - \mu \cdot X / Y_G - m \cdot X - q_p \cdot X / Y_P = 0$ | $D \cdot S_0 - 0.2 \cdot D \cdot S - (1 + 0.2) \cdot D \cdot S - \mu \cdot X / Y_G - m \cdot X - q_p \cdot X / Y_P = 0$ |
| Ácido cítrico | $D \cdot P_0 - D \cdot P + q_p \cdot X = 0$                                       | $D \cdot P_0 + 0.2 \cdot D \cdot P - (1 + 0.2) \cdot D \cdot P + q_p \cdot X = 0$                                       |

### Ecuaciones cinéticas

$$\mu = f(S)$$

$$q_P = 0.16 \cdot \mu + 1.94 \text{ (g/gh)}$$

Incógnitas: X, S, P,  $\mu$ ,  $q_P$

Ecuaciones independientes: 5

### Resultad

| Parámetro          | Sin realimentación | Con realimentación |
|--------------------|--------------------|--------------------|
| X (g/L)            | 8.27               | 14.55              |
| S (g/L)            | 20                 | 1                  |
| P (g/L)            | 45.68              | 77.75              |
| Consumo de glucosa |                    |                    |
| Crecimiento (g)    | 17.60 (29%)        | 6.19 (8%)          |
| Mantenimiento (g)  | 0.64 (1%)          | 1.08 (1%)          |
| Producto (g)       | 41.76 (70%)        | 71.73 (91%)        |
| Total (g)          | 60                 | 79                 |
| Conversión (%)     | 75                 | 99                 |
| $Y_{P/S}$ (g/g)    | 0.74               | 0.97               |

Como se aprecia en el ejercicio se demuestra un carácter integrador y generalizador, dado que los fundamentos teóricos que utiliza y los problemas que se analizan proceden de diferentes campos.

### Contenidos de las disciplinas del currículo del ingeniero químico

Operaciones de transferencia de masa. Reactores heterogéneos.

Fundamentos del metabolismo: síntesis y degradación. Crecimiento y nutrición de los microorganismos. Microbiología ambiental y aplicada.

balance de masa, la metodología general para resolver problemas de balances de masa en procesos estacionarios, balances de masa en procesos sin y con reacciones químicas, balances de energía en procesos sin y con reacciones químicas, balances de masa y de energía en procesos no estacionarios y el equilibrio en las reacciones químicas simples homogéneas y heterogéneas entre otras.

### **Sistema de habilidades**

Interpretar el efecto de las variables de operación sobre la velocidad global de reacción y sobre el comportamiento de los reactores.

Determinar las condiciones de medición necesarias para realizar balances de masa y energía en plantas existentes. Establecer las condiciones necesarias de control de un proceso tecnológico.

Composiciones de equilibrio de reacciones homogéneas gaseosas, líquidas y en reacciones heterogéneas gas-sólido, constante de velocidad y órdenes de reacción, así como cuantificar los procesos electroquímicos y los parámetros característicos de la adsorción y la catálisis. Determinar el comportamiento de los microorganismos en procesos biotecnológicos y de la industria alimentaria a partir de leyes que rigen su crecimiento y metabolismo. Determinar la dirección, extensión y velocidad de las reacciones químicas en sistemas homogéneos en fase gaseosa, fase líquida y en sistemas heterogéneos. Predecir la estructura, propiedades físico-químicas y los métodos más generales de síntesis de los compuestos químicos orgánicos. Inferir el comportamiento de las biomoléculas en procesos biosintéticos aplicando los conceptos del metabolismo y los principios de la enzimología y la bioenergética. Determinar la concentración de componentes en una muestra dada, haciendo uso de métodos de análisis químico e instrumental.

Aplicar una metodología general para la resolución de problemas de balances de masa, utiliza los principios estequiométricos en la resolución de problemas de balances de masa donde ocurren reacciones químicas, resolver balance de masa en situaciones donde existan corrientes recirculadas, evaluar un sistema de generación de vapor, evaluar el equilibrio químico para reacciones gaseosas simples, para una simple reacción química heterogénea y reacciones químicas en fase líquida que forman soluciones ideales.

### **Sistema de valores**

capacidad de adquirir conocimientos por sí mismo expresado en la independencia mostrada al analizar situaciones que requieren el empleo de conocimientos provenientes de las diferentes partes de la asignatura , y de integrarlos de manera que contribuyan al logro de un objetivo único.

### **Objetivos educativos e instructivos**

Capacidad para adquirir conocimientos por sí mismo, constituye uno de los rasgos más definatorios de la calidad de toda educación de nivel superior, desarrollar la constancia del hábito de producir reflexivamente y evaluar críticamente los resultados de su trabajo.

### **Indicaciones metodológicas y de organización de las disciplinas**

Debe dársele la debida importancia, durante la actividades prácticas, a la consideración de variantes de operación y diseño de procesos tecnológicos, al análisis de anomalías de funcionamiento y otros problemas comunes en la operación de plantas.

Vinculación de unos temas principales abordados con otros complementarios propios de la disciplina o pertenecientes a otras disciplinas. Integrar los conocimientos recibidos en la disciplina. Los talleres han de contribuir a elevar la eficacia del trabajo independiente de los estudiantes.

Introducir elementos de análisis económico de los procesos y operaciones estudiado.

Se recomienda impartir algunas conferencias, clases prácticas y talleres con la modalidad no presencial del profesor como vía de estimular el autodesarrollo en los estudiantes de manera que éstos adquieran una mayor independencia, así como hábitos y habilidades de interpretación y adquisición de conocimientos por si mismos

### **Ejercicio 14.**

En la asignatura reactores heterogéneos se contempla el diseño y análisis de reactores biológicos fermentadores.

1 Describa los puntos de contacto que tienen con la asignatura tratamiento de agua y residuales.

2 Ejemplifique con casos reales la relación del contenido de la información que se detalla a continuación.

3 Señale otras asignaturas que se aplica en el ejemplo que se presenta.

## DISEÑO Y ANÁLISIS DE REACTORES BIOLÓGICOS

### FERMENTADORES

#### Parte IV: Análisis de fermentadores

#### Células inmovilizadas – lotes alimentados

##### Fermentador continuo con células inmovilizadas

##### Ventajas

Alta densidad celular:

Alta velocidad de transformación por unidad de volumen;

Reduce efectos de inhibición por alta concentración de sustrato, producto u otros compuestos inhibidores.

Altos flujos sin lavado de biomasa (sangrado, arrastre).

##### Desventajas

El medio debe estar libre de sólidos suspendidos.

Difícil mantener asepsia durante inmovilización y operación.

Limitaciones para la transferencia de masa ( $O_2$ ,  $CO_2$ ).

Limitaciones para la transferencia de calor (control de la temperatura).

Limitaciones para el control del pH.

Se debe evitar el sobre crecimiento microbiano.

Problemas de obstrucciones, caminos preferenciales.

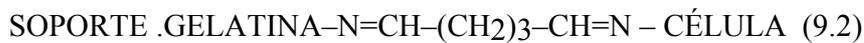
##### Métodos de inmovilización

Unión a un soporte por adsorción o enlace iónico

Ejemplos de materiales: cantos rodados, arcillas, cerámicas, polipropileno, PVC, resinas de intercambio iónico.

Enlace cruzado (*cross linking*).

Ejemplo:



Entrampamiento, confinación, absorción en una matriz. Ejemplos.

Matriz sintética: poliuretano, policrilamida.

Matriz natural: alginato de calcio, k-carragina, agar.

Fermentadores continuos con flujo pistón



### Fermentadores continuos con flujo pistón

Son el prototipo idealizado de los fermentadores torre y con células inmobilizadas.

❖ **Balance de biomasa, estado estacionario**

$$d(X.V)/dt = F.X_z - F.X_{z+\Delta z} + \mu.X . \Delta z.A = 0$$

$$\mu = (F/A).(1/X).(\Delta X/ \Delta z) \text{ con}$$

A: área de la sección transversal

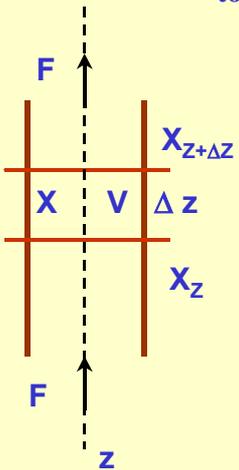
$$\Delta X = X_{z+\Delta z} - X_z$$

Velocidad lineal:  $u = F/A$  y  $\Delta z \rightarrow 0$

$$\mu = (u/X).(dX/dz) \quad (42)$$

Cambio de variable,  $dz = u.dt$

$$\Rightarrow \mu = (1/x).(dX/dt) \quad (43)$$



2003-03-24

Ingeniería Bioquímica

4

**Figura 1.6 Fermentadores continuos con flujo pistón**

Como se aprecia en el ejercicio se demuestra un carácter integrador y generalizador, dado que los fundamentos teóricos que utiliza y los problemas que se analizan proceden de diferentes campos.

### **Contenidos de las disciplinas del currículo del ingeniero químico**

Reactores heterogéneos.

Biomoléculas e integridad del metabolismo. Características estructurales, propiedades físicas y químicas. Fundamentos del metabolismo: síntesis y degradación. Crecimiento y nutrición de los microorganismos. Microbiología ambiental y aplicada.

balance de masa, la metodología general para resolver problemas de balances de masa en procesos estacionarios, balances de masa en procesos sin y con reacciones químicas, balances de energía en procesos sin y con reacciones químicas, balances de masa y de energía en procesos no estacionarios y el equilibrio en las reacciones químicas simples homogéneas y heterogéneas entre otras.

### **Sistema de habilidades**

Interpretar el efecto de las variables de operación sobre la velocidad global de reacción y sobre el comportamiento de los reactores.

Comportamiento de los microorganismos en procesos biotecnológicos y de la industria alimentaria a partir de leyes que rigen su crecimiento y metabolismo. Determinar la dirección, extensión y velocidad de las reacciones químicas en sistemas homogéneos en fase gaseosa, fase líquida y en sistemas heterogéneos. Predecir la estructura, propiedades fisico-químicas y los métodos más generales de síntesis de los compuestos químicos orgánicos. Inferir el comportamiento de las biomoléculas en procesos biosintéticos aplicando los conceptos del metabolismo y los principios de la enzimología y la bioenergética.

Aplicar una metodología general para la resolución de problemas de balances de masa, utilizar los principios estequiométricos en la resolución de problemas de balances de masa donde ocurren reacciones químicas, resolver balances de masa en situaciones donde existan corrientes recirculadas, evaluar un sistema de generación de vapor, evaluar el equilibrio químico para reacciones gaseosas simples, para una simple reacción química heterogénea y reacciones químicas en fase líquida que forman soluciones ideales.

### **Sistema de valores**

Capacidad de adquirir conocimientos por sí mismo expresado en la independencia mostrada al analizar situaciones que requieren el empleo de conocimientos provenientes de las diferentes partes de la asignatura, y de integrarlos de manera que contribuyan al logro de un objetivo único.

### **Objetivos educativos e instructivos.**

Interpretación de los principios básicos de la química, química física, bioquímica y microbiología para su aplicación práctica a nivel productivo, desarrollando hábitos y habilidades que le permitan la educación por sí mismo, determinar el comportamiento de las biomoléculas en procesos biosintéticos, aplicando los conceptos de metabolismo sobre la base de la enzimología y la bioenergética, determinar el comportamiento de los microorganismos en un proceso biotecnológico y de la industria alimentaria a partir de las leyes que rigen su crecimiento.

El análisis de problemas no estructurados que requieran el dominio parcial de contenidos no desarrollados en clases y con actividades de todo tipo desarrolladas con un alto grado de independencia.

Integrar los conocimientos y habilidades adquiridas en las disciplinas precedentes y paralelas como fundamentación para la resolución de balances de masa y de energía, ampliar el campo de aplicaciones de los balances de energía y generalizar los tratamientos cuantitativos sobre equilibrio físico y químico a situaciones reales de ingeniería, realizar, a nivel productivo, análisis termodinámicos a diferentes sistemas reales tales como hornos, generadores de vapor, turbinas, compresores, equipos de transferencia de calor, ciclos de potencia y de refrigeración, columnas de destilación, reactores químicos, etc, por separados o integrados en diferentes combinaciones.

Enfrentar los problemas de diseño y/o modificaciones de equipos con la convicción de que deben resolver los mismos.

### **Indicaciones metodológicas y de organización de las disciplinas**

Solución de problemas de análisis, selección y proyecto de operaciones y procesos unitarios, tanto considerados aisladamente, como vinculados a una tecnología determinada, debe dársele la debida importancia, durante la actividades prácticas, a la consideración de variantes de operación y diseño de procesos tecnológicos, al análisis de anomalías de funcionamiento y otros problemas comunes en la operación de plantas.

Integrar los conocimientos recibidos en la disciplina. Los talleres han de contribuir a elevar la eficacia del trabajo independiente de los estudiantes.

Además, en las clases y talleres, se deben introducir elementos de análisis económico de los procesos y operaciones estudiado.

Se recomienda impartir algunas conferencias, clases prácticas y talleres con la modalidad no presencial del profesor como vía de estimular el autodesarrollo en los estudiantes de manera que éstos adquieran una mayor independencia, así como hábitos y habilidades de interpretación y adquisición de conocimientos por sí mismos.

Debe lograrse la integración de los contenidos de la enseñanza, de manera tal que los estudiantes distingan lo esencial y se apropien de la habilidad.

Hacerse uso de plataformas interactivas que conduzcan a una mayor preparación y motivación de los estudiantes.

Como elemento propiciador de la actividad independiente de los estudiantes, podrán realizarse actividades no presenciales.

Dado el hecho de que los balances de masa y de energía tienen la característica de integrar los conocimientos y además un carácter poco esquemático se hace necesario que los estudiantes que los reciban hayan logrado desarrollar aceptablemente la capacidad de trabajo independiente.

Enfoque debe ser ingenieril al estudio cuantitativo del equilibrio químico de reacciones homogéneas y heterogéneas.

### **Ejercicio 15.**

Analice el comportamiento del digestor que se presenta a continuación y sustente los principios teóricos que rigen el fenómeno estudiado. Relaciónelo con las asignaturas del currículo del ingeniero químico.

Fermentador de lotes alimentados (fed-batch).

Es un fermentador por lotes, (discontinuo, batch) en el cual un nutriente limitante o un precursor se alimenta, continuamente o intermitentemente, durante el curso de la fermentación, de modo de controlar la cantidad disponible del mismo en el medio.

Al final del ciclo el fermentador puede vaciarse parcialmente y repetirse un nuevo ciclo.

Es el proceso más usado en la producción de metabolitos complejos.

Ejemplos de aplicación:

Producción de levadura de panadería, antibióticos, enzimas, vitaminas.

Aclimatación de inóculos microbianos a la degradación de alta concentración de compuestos orgánicos persistentes.



**Métodos de control para la adición de sustrato en un cultivo fed-batch.**

| <b>Tipo de control</b>                 | <b>Método</b>                             | <b>Parámetro controlado</b>                                                                              |
|----------------------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Feed back (Manual o automático)</b> | <b>Indirecto</b>                          | <b>pH, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, Coeficiente respiratorio, Concentración de producto secundario</b> |
|                                        | <b>Directo</b>                            | <b>Concentración de sustrato</b>                                                                         |
| <b>Feed forward</b>                    | <b>Adición intermitente o incremental</b> | <b>Ninguno</b>                                                                                           |
|                                        | <b>Velocidad de adición constante</b>     | <b>Ninguno</b>                                                                                           |
|                                        | <b>Velocidad de adición exponencial</b>   | <b>Ninguno</b>                                                                                           |

2003-03-24

Ingeniería Bioquímica

6

**Figura 1.7 Métodos de control para la adición de sustrato en un cultivo fed-batch.**

**Ventajas**

Permite el uso de sustratos que inhiben el crecimiento si están en altas concentraciones.

Reduce la formación de productos secundarios formados cuando hay exceso de sustrato (sobre alimentación).

Permite establecer condiciones óptimas para la producción de metabolitos secundarios ya que la alimentación del sustrato se realiza de modo de permitir el desarrollo de las dos fases: crecimiento (trofofase) y producción (idiofase).

Reduce problemas de alta viscosidad o de poca solubilidad del sustrato.

Reduce la represión catabólica cuando la síntesis de algunos metabolitos se reprime bajo la presencia de sustratos fácilmente metabolizables como la glucosa.

**Desventajas**

Requiere instrumentación adicional para el control.

En sistemas sin control tipo feed\*----+

Back no es posible contemplar desviaciones del crecimiento celular con respecto al comportamiento esperado.

Requiere operarios entrenados para operar el biorreactor y la toma de decisiones, especialmente cuando no se dispone de elementos de control automático.

Como se aprecia en el ejercicio se demuestra un carácter integrador y generalizador, dado que los fundamentos teóricos que utiliza y los problemas que se analizan proceden de diferentes campos.

### **Contenidos de las disciplinas del currículo del ingeniero químico**

Reactores heterogéneos.

#### **Sistema de habilidades**

Interpretar el efecto de las variables de operación sobre la velocidad global de reacción y sobre el comportamiento de los reactores.

#### **Sistema de valores**

Adquirir conocimientos por sí mismo expresado en la independencia mostrada al analizar situaciones que requieren el empleo de conocimientos provenientes de las diferentes partes de la asignatura, y de integrarlos de manera que contribuyan al logro de un objetivo único.

#### **Objetivos educativos e instructivos**

Análisis de problemas simples típicos de la profesión.

Análisis del comportamiento de reactores químicos homogéneos y heterogéneos en distintas condiciones de operaciones típicas de los procesos químicos.

#### **Indicaciones metodológicas y de organización de las disciplinas**

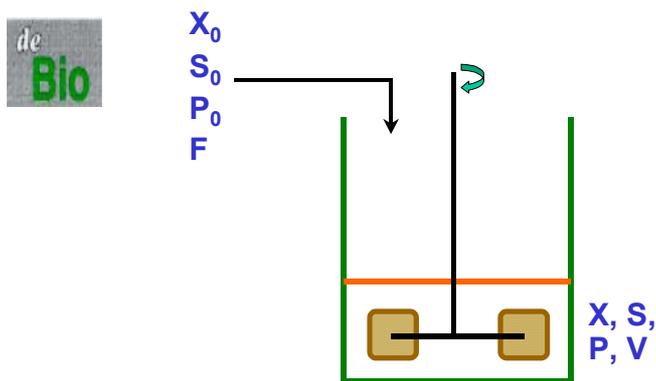
Análisis de anomalías de funcionamiento y otros problemas comunes en la operación de plantas.

#### **Ejercicio 16.**

En la asignatura reactores heterogéneos se contempla el diseño y análisis de reactores biológicos fermentadores.

- 1 Describa los puntos de contacto que tienen con la asignatura tratamiento de agua y residuales.
- 2 Ejemplifique con casos reales la relación del contenido del ejemplo que redescrive a continuación.
- 3 Señale otras asignaturas que se aplica en el ejemplo que se presenta.
- 4 Señale los incumplimientos del sistema internacional de unidades

Balace de biomasa



El volumen de fermentación es variable  $\Rightarrow F = dV/dt$

En este caso los balances de materiales no pueden expresarse en base volumétrica.

Si embargo cuando se usa como alimentación medio líquido muy concentrado en sustrato o el sustrato se alimenta en estado sólido o gaseoso, el volumen de fermentación puede mantenerse prácticamente constante.

2003-03-24

Ingeniería Bioquímica

9

**Figura 1.8 Quimiostato sin realimentación.**

Balace de biomasa

$$d(X.V)/dt = \mu.X.V \text{ (suponiendo } X_0 = 0 \text{ y } k_d = 0)$$

$$\text{Si } d(X.V)/dt = X.(dV/dt) + V.(dX/dt)$$

$$dX/dt = (\mu - F/V).X$$

Balace de sustrato

$$d(S.V)/dt = F.S_0 - (\mu.X.V)/Y_{X/S}$$

$$dt = (F/V).(S_0 - S) - (\mu.X)/Y_{X/S}$$

Balace de producto

$$d(P.V)/dt = q_p.X.V \quad (\text{suponiendo } P_0 = 0)$$

$$dP/dt = q_p.X - (F/V).P$$

Un biorreactor de lotes alimentados puede ser operado de muchos modos diferentes. Las ecuaciones resultantes frecuentemente son complejas.

Se analizará un caso sencillo: el biorreactor operado en modo “casi estacionario” con volumen variable.

En este caso el biorreactor se alimenta de modo que:

$$dX/dt = 0 \quad \text{D} \quad \mu = F/V$$

$$dS/dt = 0 \quad \text{D} \quad X = Y_{X/S} \cdot (S_0 - S)$$

$$dP/dt = 0 \quad \text{D} \quad P = (q_p.X)/\mu$$



| Modo de operación | Ecuaciones                                                                             |
|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| F constante       | $V = V_0 + F.t \quad (50)$<br>$\mu = F/(V_0 + F.t) \quad (51)$                         |
| $\mu$ constante   | $V = V_0 \cdot e^{\mu.t} \quad (52)$<br>$F = V_0 \cdot \mu \cdot e^{\mu.t} \quad (53)$ |

### Figura 1.9

Como se aprecia en el ejercicio se demuestra un carácter integrador y generalizador, dado que los fundamentos teóricos que utiliza y los problemas que se analizan proceden de diferentes campos.

### Contenidos de las disciplinas del currículo del ingeniero químico

Reactores químicos homogéneos y heterogéneos.

Fundamentos del metabolismo: síntesis y degradación. Crecimiento y nutrición de los microorganismos. Microbiología ambiental y aplicada.

Balance de masa, la metodología general para resolver problemas de balances de masa en procesos estacionarios, balances de masa en procesos sin y con reacciones químicas, balances de energía en procesos sin y con reacciones químicas, balances de masa y de energía en procesos no estacionarios y el equilibrio en las reacciones químicas simples homogéneas y heterogéneas entre otras.

### **Sistema de habilidades**

Interpretar el efecto de las variables de operación sobre la velocidad global de reacción y sobre el comportamiento de los reactores.

Realizar balances de masa y energía en plantas existentes. Establecer las condiciones necesarias de control de un proceso tecnológico.

Determinar el comportamiento de los microorganismos en procesos biotecnológicos y de la industria alimentaria a partir de leyes que rigen su crecimiento y metabolismo. Determinar la dirección, extensión y velocidad de las reacciones químicas en sistemas homogéneos en fase gaseosa, fase líquida y en sistemas heterogéneos. Predecir la estructura, propiedades físico-químicas y los métodos más generales de síntesis de los compuestos químicos orgánicos. Inferir el comportamiento de las biomoléculas en procesos biosintéticos aplicando los conceptos del metabolismo y los principios de la enzimología y la bioenergética. Determinar la concentración de componentes en una muestra dada, haciendo uso de métodos de análisis químico e instrumental.

Identificar los fenómenos químicos accesibles a su conocimiento que están involucrados en las operaciones del proceso, explicar cualitativamente su comportamiento ante los cambios de las variables de operación, determinar los requerimientos materiales y energéticos de cada una de las operaciones componentes, determinar si los equipos y aparatos principales de las operaciones accesibles a su conocimiento, poseen las dimensiones requeridas para realizar el trabajo establecido o el que se establezca como condición a analizar, analizar si los materiales utilizados en los aparatos principales han sido adecuadamente seleccionados, atendiendo a sus propiedades mecánicas y si su resistencia a la corrosión o el sistema de protección anticorrosiva son satisfactorias.

### **Sistema de valores**

Analizar situaciones que requieren el empleo de conocimientos provenientes de las diferentes partes de la asignatura , y de integrarlos de manera que contribuyan al logro de un objetivo único.

### **Objetivos educativos e instructivos.**

Capacidad para adquirir conocimientos por sí mismo, constituye uno de los rasgos más definitorios de la calidad de toda educación de nivel superior, desarrollar la constancia del hábito de producir reflexivamente y evaluar críticamente los resultados de su trabajo.

Determinar el comportamiento de las biomoléculas en procesos biosintéticos, aplicando los conceptos de metabolismo sobre la base de la enzimología y la bioenergética, determinar el comportamiento de los microorganismos en un proceso biotecnológico y de la industria alimentaria a partir de las leyes que rigen su crecimiento.

Empleo sistemático de conocimientos y habilidades lógicas, el análisis de problemas no estructurados que requieran el dominio parcial de contenidos no desarrollados en clases y con actividades de todo tipo desarrolladas con un alto grado de independencia, el reconocimiento de la actuación del hombre sobre el medio circundante como el agente decisivo en la formación de su personalidad.

Integrar los conocimientos y habilidades adquiridas en las disciplinas precedentes y paralelas como fundamentación para la resolución de balances de masa y de energía, ampliar el campo de aplicaciones de los balances de energía y generalizar los tratamientos cuantitativos sobre equilibrio físico y químico a situaciones reales de ingeniería, realizar, a nivel productivo, análisis termodinámicos a diferentes sistemas reales tales como hornos, generadores de vapor, turbinas, compresores, equipos de transferencia de calor, ciclos de potencia y de refrigeración, columnas de destilación, reactores químicos, etc, por separados o integrados en diferentes combinaciones.

### **Indicaciones metodológicas y de organización de las disciplinas**

Solución de problemas de análisis, selección y proyecto de operaciones y procesos unitarios, tanto considerados aisladamente, como vinculados a una tecnología determinada, debe dársele la debida importancia, durante la actividades prácticas, a la consideración de variantes de

operación y diseño de procesos tecnológicos, al análisis de anomalías de funcionamiento y otros problemas comunes en la operación de plantas.

Integrar los conocimientos recibidos en la disciplina. Los talleres han de contribuir a elevar la eficacia del trabajo independiente de los estudiantes.

Además, en las clases y talleres, se deben introducir elementos de análisis económico de los procesos y operaciones estudiado.

Se recomienda impartir algunas conferencias, clases prácticas y talleres con la modalidad no presencial del profesor como vía de estimular el autodesarrollo en los estudiantes de manera que éstos adquieran una mayor independencia, así como hábitos y habilidades de interpretación y adquisición de conocimientos por sí mismos.

### **Ejercicio 17**

Establezca los puntos de concordancia de las asignaturas reactores heterogéneos y tratamiento de aguas y residuales.

Ejemplo

Se desea producir 10 t de levadura de panadería (base seca) mediante un proceso fed-batch con volumen variable y sin flujo de salida. Se utiliza un medio de cultivo a base de melazas mezcladas de caña y remolacha, sales minerales y vitaminas con 300 g/L de azúcares reductores totales fermentables. El biorreactor disponible admite un volumen mínimo de medio de 20 m<sup>3</sup> y un máximo de 80 m<sup>3</sup>. El medio se alimenta de modo de mantener una concentración de azúcares en el medio (S) de 1 g/L y una velocidad específica de crecimiento ( $\mu$ ) de 0.1 h<sup>-1</sup> para evitar la fermentación alcohólica. El coeficiente  $Y_{X/S}$  es 0.45 g/g. Se pide calcular el volumen total de medio usado, la cantidad máxima de azúcar no utilizada, el tiempo de fermentación y encontrar una expresión para la velocidad de flujo de alimentación de medio.

Usando ecuación 48 para operación “casi estacionario” se tiene:

$$X = Y_{X/S} \cdot (S_0 - S) = 0.45 \cdot (300 - 1) = 135 \text{ g/L}$$

$$\text{Volumen final} = 10 \text{ (t)} \cdot 10^6 \text{ (g/t)} / (135 \text{ (g/L)} \cdot 1000 \text{ (L/m}^3\text{)}) = 74 \text{ m}^3$$

$$\text{Azúcar no utilizada} = 74 \text{ (m}^3\text{)} \cdot 1 \text{ (g/L)} \cdot 1000 \text{ (L/m}^3\text{)} \cdot 10^{-3} \text{ (kg/g)} = 74 \text{ kg}$$

De ecuación 52 para operación con  $\mu$  constante se tiene

$$V = V_0 \cdot e^{\mu \cdot t} \quad P \quad t = (1 / 0.1) \cdot \ln(74/20) = 13 \text{ horas}$$

De ecuación 53 se tiene  $P \quad F = 2 \cdot e^{0.1 \cdot t}$

Como se aprecia en el ejercicio se demuestra un carácter integrador y generalizador, dado que los fundamentos teóricos que utiliza y los problemas que se analizan proceden de diferentes campos.

### **Contenidos de las disciplinas del currículo del ingeniero químico**

Reactores químicos homogéneos y heterogéneos.

Fundamentos del metabolismo: síntesis y degradación. Crecimiento y nutrición de los microorganismos. Microbiología ambiental y aplicada.

balance de masa, la metodología general para resolver problemas de balances de masa en procesos estacionarios, balances de masa en procesos sin y con reacciones químicas, balances de energía en procesos sin y con reacciones químicas, balances de masa y de energía en procesos no estacionarios y el equilibrio en las reacciones químicas simples homogéneas y heterogéneas entre otras.

### **Sistema de habilidades**

Aplicar una metodología general para la resolución de problemas de balances de masa, utilizar los principios estequiométricos en la resolución de problemas de balances de masa donde ocurren reacciones químicas, resolver balances de masa en situaciones donde existan corrientes recirculadas, evaluar un sistema de generación de vapor, evaluar el equilibrio químico para reacciones gaseosas simples, para una simple reacción química heterogénea y reacciones químicas en fase líquida que forman soluciones ideales.

### **Sistema de valores**

Capacidad de adquirir conocimientos por sí mismo expresado en la independencia mostrada al analizar situaciones que requieren el empleo de conocimientos provenientes de las diferentes partes de la asignatura, y de integrarlos de manera que contribuyan al logro de un objetivo único.

### **Objetivos educativos e instructivos.**

Vincular diferentes leyes, fenómenos, modos de operar y el impacto ambiental que provocan, como elementos determinantes del comportamiento de estas, y en las que se analice de qué

forma los cambios en uno cualquiera de dichos elementos que influyen sobre los otros y sobre el comportamiento global de las mismas, y sobre el entorno, análisis de problemas simples típicos de la profesión, evaluación del comportamiento de las estaciones de las aguas de abasto a la industria de procesos y de los sistemas tecnológicos para el tratamiento, reutilización y vertimiento de los residuales industriales, teniendo en cuenta su impacto ambiental y el uso racional de los recursos naturales y energéticos, diseño y análisis del comportamiento de reactores químicos homogéneos y heterogéneos en distintas condiciones de operaciones típicas de los procesos químicos.

### **Indicaciones metodológicas y de organización de las disciplinas**

Solución de problemas de análisis, selección y proyecto de operaciones y procesos unitarios, tanto considerados aisladamente, como vinculado a una tecnología determinada, debe dársele la debida importancia, durante la actividades prácticas, a la consideración de variantes de operación y diseño de procesos tecnológicos, al análisis de anomalías de funcionamiento y otros problemas comunes en la operación de plantas.

Debe lograrse la integración de los contenidos de la enseñanza, de manera tal que los estudiantes distingan lo esencial y se apropien de la habilidad.

Dado el hecho de que los balances de masa y de energía tienen la característica de integrar los conocimientos y además un carácter poco esquemático se hace necesario que los estudiantes que los reciban hayan logrado desarrollar aceptablemente la capacidad de trabajo independiente

Enfoque debe ser ingenieril al estudio cuantitativo del equilibrio químico de reacciones homogéneas y heterogéneas.

### **Ejercicio 18.**

Establezca los puntos de concordancia de las asignaturas reactores heterogéneos y tratamiento de aguas y residuales.

Un medio preparado a base de melaza de caña de azúcar y sales minerales se utiliza para la producción de etanol por fermentación usando la levadura *Saccharomyces cerevisiae*. La melaza contiene un 50% de azúcares fermentables en peso medidos como glucosa.

La producción de etanol está asociada al crecimiento y presenta inhibición por producto según las siguientes ecuaciones:

$$q_P = q_{pm} \cdot [S/(K_S + S)] \cdot (1 - P/P_m)^n$$

$$q_P = a \cdot \mu$$

$\mu$  : velocidad específica de crecimiento de biomasa,  $h^{-1}$   $q_P$  : velocidad específica de producción de etanol, g/gh

S : concentración de azúcar, g/L

P : concentración de etanol, g/L

$q_{pm}$ : velocidad específica máxima de producción de etanol = 1.85 g/gh

$K_S$  : constante cinética = 0.315 g/l

$P_m$  : concentración máxima de etanol, g/L

n : potencia de inhibición por etanol = 0.36

$Y_{P/S}$  : coeficiente de rendimiento de etanol = 0.434 g/g

a : coeficiente cinético = 4.02 g/g

Se desea comparar el desempeño de un biorreactor batch (por lotes) con un biorreactor continuo en estado estacionario (quimiostato), ambos tipo tanque agitado, en base a la productividad volumétrica de etanol.

Datos adicionales  $S_f$  : concentración final de azúcares = 2.8 g/L

Para el biorreactor batch el inóculo aporta:

$X_0$  : concentración inicial de biomasa = 2.8 g/L

$P_0$  : concentración inicial de etanol = 8.6 g/L

Suposiciones:

$Y_{P/S}$  ,  $Y_{X/S}$  constantes.

Fenómenos despreciables: muerte celular, consumo de azúcar para mantenimiento, evaporación de etanol.

Tanque perfectamente agitado.

Volumen de trabajo constante.

$Y_{X/S}$  : coeficiente de rendimiento de biomasa, g/g.

Variable operativa para esta situación:  $S_0$  La productividad volumétrica de etanol depende de la concentración inicial de azúcar ( $S_0$ )

Fermentación *batch* (por lotes)

Balance de sustrato

$$-(dS/dt) = \mu \cdot X / Y_{X/S} = q_P \cdot X / Y_{P/S} \quad \text{Ecuaciones cinéticas}$$

$$q_P = q_{pm} \cdot [S / (K_S + S)] \cdot (1 - P/P_m)^n$$

$$q_P = a \cdot \mu$$

$$\text{Cálculo de } Y_{X/S} = q_P / \mu = Y_{P/S} / Y_{X/S} \quad \text{P} \quad Y_{X/S} = 0.434 / 4.02 = 0.108 \text{ g/g}$$

$$\text{Si } Y_{X/S} \text{ constante } \text{P} \quad X = X_0 + Y_{X/S} \cdot (S_0 - S)$$

$$\text{Si } Y_{P/S} \text{ constante } \text{P} \quad P = P_0 + Y_{P/S} \cdot (S_0 - S)$$

De ecuación 13.3 se tiene para el tiempo de fermentación  $t_F$ :

### Sustituyendo ecuaciones

$$t_F = \int_{S_f}^{S_0} \frac{Y_{P/S} \cdot dS}{q_P \cdot X}$$

$$t_F = \int_{S_f}^{S_0} \frac{P_m^n \cdot Y_{P/S} \cdot (K_S + S) \cdot dS}{q_{pm} \cdot S \cdot (P_m - P_0 - Y_{P/S} \cdot S_0 + Y_{P/S} \cdot S)^n \cdot (X_0 + Y_{X/S} \cdot S_0 - Y_{X/S} \cdot S)}$$

Productividad, no considerando tiempos muertos y siendo  $P_f$  la concentración final de etanol se expresa como:

$$Q_P = (P_f - P_0)/t$$

El máximo valor de  $S_0$  se tiene para  $P = P_m = 87.5$  g/L.

$$S_0 = (87.5 - 8.6)/0.434 + 2.8 = 184.6$$
 g/L.



| $S_0$ (g/L) | $t_f$ (h) | $P_f$ (g/L) | $X$ (g/L) | $Q_p$ (g/Lh) |
|-------------|-----------|-------------|-----------|--------------|
| 100         | 4.44      | 50.8        | 12.6      | 9.50         |
| 120         | 4.93      | 59.5        | 14.8      | 10.32        |
| 140         | 5.41      | 68.1        | 16.9      | 11.01        |
| 150         | 5.65      | 72.5        | 18.0      | 11.31        |
| 160         | 5.90      | 76.8        | 19.1      | 11.56        |
| 170         | 6.18      | 81.2        | 20.2      | 11.74        |
| 180         | 6.53      | 85.5        | 21.2      | 11.77        |
| 184.5       | 6.82      | 87.46       | 21.7      | 11.56        |

2003-03-24                      Ingeniería Bioquímica                      8

Como se aprecia en el ejercicio se demuestra un carácter integrador y generalizador, dado que los fundamentos teóricos que utiliza y los problemas que se analizan proceden de diferentes campos.

**Contenidos de las disciplinas del currículo del ingeniero químico**

Reactores heterogéneos.

Biomoléculas e integridad del metabolismo. Características estructurales, propiedades físicas y químicas. Fundamentos del metabolismo: síntesis y degradación. Crecimiento y nutrición de los microorganismos. Microbiología ambiental y aplicada.

balance de masa, la metodología general para resolver problemas de balances de masa en procesos estacionarios, balances de masa en procesos sin y con reacciones químicas, balances de energía en procesos sin y con reacciones químicas, balances de masa y de energía en procesos no estacionarios y el equilibrio en las reacciones químicas simples homogéneas y heterogéneas entre otras.

### **Sistema de habilidades**

Interpretar el efecto de las variables de operación sobre la velocidad global de reacción y sobre el comportamiento de los reactores.

Establecer las condiciones necesarias de control de un proceso tecnológico.

Determinar el comportamiento de los microorganismos en procesos biotecnológicos y de la industria alimentaria a partir de leyes que rigen su crecimiento y metabolismo. Determinar la dirección, extensión y velocidad de las reacciones químicas en sistemas homogéneos en fase gaseosa, fase líquida y en sistemas heterogéneos.

Inferir el comportamiento de las biomoléculas en procesos biosintéticos aplicando los conceptos del metabolismo y los principios de la enzimología y la bioenergética. Determinar la concentración de componentes en una muestra dada, haciendo uso de métodos de análisis químico e instrumental.

resolución de problemas de balances de masa, utilizar los principios estequiométricos en la resolución de problemas de balances de masa donde ocurren reacciones químicas, resolver balances de masa en situaciones donde existan corrientes recirculadas, evaluar un sistema de generación de vapor, evaluar el equilibrio químico para reacciones gaseosas simples, para una simple reacción química heterogénea y reacciones químicas en fase líquida que forman soluciones ideales.

### **Sistema de valores**

capacidad de adquirir conocimientos por sí mismo expresado en la independencia mostrada al analizar situaciones que requieren el empleo de conocimientos provenientes de las diferentes partes de la asignatura, y de integrarlos de manera que contribuyan al logro de un objetivo único.

### **Objetivos educativos e instructivos**

interpretación de los principios básicos de la química, química física, bioquímica y microbiología para su aplicación práctica a nivel productivo, desarrollando hábitos y habilidades que le permitan

la educación por sí mismo, determinar el comportamiento de las biomoléculas en procesos biosintéticos, aplicando los conceptos de metabolismo sobre la base de la enzimología y la bioenergética, determinar el comportamiento de los microorganismos en un proceso biotecnológico y de la industria alimentaria a partir de las leyes que rigen su crecimiento.

orientarse y utilizar el sistema de información científico-técnica, el análisis de la estructura científica de la profesión, su campo de acción y los objetivos esenciales del profesional, el empleo sistemático de conocimientos y habilidades lógicas, el análisis de problemas no estructurados que requieran el dominio parcial de contenidos no desarrollados en clases y con actividades de todo tipo desarrolladas con un alto grado de independencia, el reconocimiento de la actuación del hombre sobre el medio circundante como el agente decisivo en la formación de su personalidad, el análisis de la relación entre los procesos productivos, las necesidades sociales, el análisis y empleo de las medidas de protección física y ambiental como medios para la protección del hombre y del medio ambiente, la solución de tareas técnicas propias del ejercicio de la profesión, desarrolladas a través del vínculo laboral- investigativo, cuya estructura fenomenológica responda a la naturaleza real de los problemas y no a las características de una disciplina en particular, el reconocimiento en los problemas profesionales de elementos técnicos y de factores de índole social, y que por tanto su solución exige una formación técnica específica, unida al dominio de factores jurídicos y a rasgos personales determinantes de una postura activa ante la vida, llevar a la práctica la esencia de las estrategias curriculares como una consecuencia natural del desarrollo de actividades propias del ejercicio de la profesión, desarrollar los elementos imprescindibles para ejercitar conscientemente la capacidad de educarse por sí mismos integrar los conceptos fundamentales(más que las disciplinas), en un modo de actuar que utilice a todos cuanto se precisen simultáneamente.

### **Indicaciones metodológicas y de organización de las disciplinas**

solución de problemas de análisis, selección y proyecto de operaciones y procesos unitarios, tanto considerados aisladamente, como vinculados a una tecnología determinada, debe dársele la debida importancia, durante la actividades prácticas, a la consideración de variantes de operación y diseño de procesos tecnológicos, al análisis de anomalías de funcionamiento y otros problemas comunes en la operación de plantas.

Debe lograrse que el estudiante desarrolle habilidades suficientes en la Debe dársele la debida importancia, durante las actividades prácticas, a la consideración de variantes de operación y

diseño de procesos tecnológicos, al análisis de anomalías de funcionamiento y otros problemas comunes en la operación de plantas.

### Ejercicio 19

Establezca los puntos de concordancia de las asignaturas reactores heterogéneos y tratamiento de aguas y residuales

Fermentación continua.

Balance de biomasa

$$X_0 = 0 \text{ g/L} \quad \text{D} \quad m = D$$

Balance de producto

$$P_0 = 0 \text{ g/L} \quad \text{D} \quad Q_P = P_D = q_P \cdot X$$

El máximo valor de  $S_0$  se tiene para  $P = P_m = 87.5 \text{ g/L}$ .

$$S_0 = (87.5 - 0)/0.434 + 2.8 = 204.4 \text{ g/L}.$$

Datos del balance de biomasa



| $S_0$ (g/l) | $q_p$ (g/gh) | $D$ (h <sup>-1</sup> ) | $P_f$ (g/L) | $X_f$ (g/L) | $Q_p$ (g/Lh) |
|-------------|--------------|------------------------|-------------|-------------|--------------|
| 100         | 1.31         | 0.327                  | 42.2        | 10.5        | 13.8         |
| 120         | 1.22         | 0.303                  | 50.9        | 12.7        | 15.4         |
| 130         | 1.16         | 0.289                  | 55.2        | 13.7        | 16.0         |
| 140         | 1.10         | 0.275                  | 59.5        | 14.8        | 16.3         |
| 150         | 1.04         | 0.258                  | 63.9        | 15.9        | 16.5         |
| 160         | 0.965        | 0.240                  | 68.2        | 17.0        | 16.4         |
| 170         | 0.880        | 0.219                  | 72.6        | 18.1        | 15.9         |
| 190         | 0.643        | 0.160                  | 81.2        | 20.2        | 13.0         |
| 204.4       | 0.051        | 0.013                  | 87.49       | 21.8        | 1.12         |

2003-03-24                      Ingeniería Bioquímica                      10

## Comportamiento en diferentes condiciones de operación

Como se aprecia en el ejercicio se demuestra un carácter integrador y generalizador, dado que los fundamentos teóricos que utiliza y los problemas que se analizan proceden de diferentes campos.

### **Contenidos de las disciplinas del currículo del ingeniero químico.**

Balace de masa, la metodología general para resolver problemas de balances de masa en procesos estacionarios, balances de masa en procesos sin y con reacciones químicas, balances de energía en procesos sin y con reacciones químicas, balances de masa y de energía en procesos no estacionarios y el equilibrio en las reacciones químicas simples homogéneas y heterogéneas entre otras.

Biomoléculas e integridad del metabolismo. Características estructurales, propiedades físicas y químicas. Fundamentos del metabolismo: síntesis y degradación. Crecimiento y nutrición de los microorganismos. Microbiología ambiental y aplicada.

Reactores químicos homogéneos y heterogéneos.

### **Sistema de habilidades**

Interpretar el efecto de las variables de operación sobre la velocidad global de reacción y sobre el comportamiento de los reactores.

Determinar el comportamiento de los microorganismos en procesos biotecnológicos y de la industria alimentaria a partir de leyes que rigen su crecimiento y metabolismo. Determinar la dirección, extensión y velocidad de las reacciones químicas en sistemas homogéneos en fase gaseosa, fase líquida y en sistemas heterogéneos. Predecir la estructura, propiedades físico-químicas y los métodos más generales de síntesis de los compuestos químicos orgánicos. Inferir el comportamiento de las biomoléculas en procesos biosintéticos aplicando los conceptos del metabolismo y los principios de la enzimología y la bioenergética. Determinar la concentración de componentes en una muestra dada, haciendo uso de métodos de análisis químico e instrumental.

### **Sistema de valores**

capacidad de adquirir conocimientos por sí mismo expresado en la independencia mostrada al analizar situaciones que requieren el empleo de conocimientos provenientes de las diferentes partes de la asignatura, y de integrarlos de manera que contribuyan al logro de un objetivo único.

### **Objetivos educativos e instructivos**

integrar los conocimientos y habilidades adquiridas en las disciplinas precedentes y paralelas como fundamentación para la resolución de balances de masa y de energía, ampliar el campo de aplicaciones de los balances de energía y generalizar los tratamientos cuantitativos sobre equilibrio físico y químico a situaciones reales de ingeniería, realizar, a nivel productivo, análisis termodinámicos a diferentes sistemas reales tales como hornos, generadores de vapor, turbinas, compresores, equipos de transferencia de calor, ciclos de potencia y de refrigeración, columnas de destilación, reactores químicos, etc, por separados o integrados en diferentes combinaciones.

Orientarse y utilizar el sistema de información científico-técnica, el análisis de la estructura científica de la profesión, su campo de acción y los objetivos esenciales del profesional, el empleo sistemático de conocimientos y habilidades lógicas, el análisis de problemas no estructurados que requieran el dominio parcial de contenidos no desarrollados en clases y con actividades de todo tipo desarrolladas con un alto grado de independencia, el reconocimiento de la actuación del hombre sobre el medio circundante como el agente decisivo en la formación de su personalidad, el análisis de la relación entre los procesos productivos, las necesidades sociales.

Interpretación de los principios básicos de la química, química física, bioquímica y microbiología para su aplicación práctica a nivel productivo, desarrollando hábitos y habilidades que le permitan la educación por sí mismo, determinar el comportamiento de las biomoléculas en procesos biosintéticos, aplicando los conceptos de metabolismo sobre la base de la enzimología y la bioenergética, determinar el comportamiento de los microorganismos en un proceso biotecnológico y de la industria alimentaria a partir de las leyes que rigen su crecimiento.

### **Indicaciones metodológicas y de organización de las disciplinas.**

Solución de problemas de análisis, selección y proyecto de operaciones y procesos unitarios, tanto considerados aisladamente, como vinculados a una tecnología determinada, debe dársele la debida importancia, durante la actividades prácticas, a la consideración de variantes de

operación y diseño de procesos tecnológicos, al análisis de anomalías de funcionamiento y otros problemas comunes en la operación de plantas.

Debe lograrse que el estudiante desarrolle habilidades suficientes en la Debe dársele la debida importancia, durante la actividades prácticas, a la consideración de variantes de operación y diseño de procesos tecnológicos, al análisis de anomalías de funcionamiento y otros problemas comunes en la operación de plantas.

## **Anexo 2. Instrumentos de trabajo.**



*Figura 2.1 Digestor anaerobio.*



*Figura 2.2 Digestor anaerobio piloto.*



*Figura 2.3 Pieza del digestor anaerobio piloto.*



*Figura 2.4 Instrumento medidor de gases.*