

1.- DATOS DE LA ASIGNATURA

Nombre de la asignatura:	Fenómenos de Transporte I
Carrera:	Ingeniería Bioquímica
Clave de la asignatura:	BQJ-1008
SATCA ¹	4-2-6

2.- PRESENTACIÓN

Caracterización de la asignatura.

Los fenómenos de transporte consisten en la caracterización a nivel microscópico o diferencial en el interior de los sistemas, con lo que se consigue así una concepción integral de la Ingeniería Bioquímica en la medida en que se relaciona el comportamiento macroscópico de las operaciones unitarias con el comportamiento a nivel microscópico y molecular de las sustancias o componentes de la operación unitaria, como se requiere en el estudio del secado de productos biológicos, esterilización de alimentos, destilación, absorción de gases, entre otros. Esta concepción también ha sido incorporada a los procesos con reacción química o biológica, en donde el fenómeno de transporte (por ser la mayoría de las veces un proceso *lento*) afecta sustancialmente a la eficiencia de los biorreactores, principalmente en los que son de naturaleza multifásica como la fermentación en estado sólido, la biofiltración, fermentación sumergida con inmovilización de microorganismos o enzimas, biorreactores de membrana, de burbujeo, de lecho fijo de flujo ascendente, entre muchos otros.

Los principales balances microscópicos en la Ingeniería Bioquímica son los de cantidad de movimiento o momentum, calor y masa que permiten caracterizar la variación de la fuerza motriz asociada (gradientes de velocidades, temperaturas o de concentraciones, respectivamente) con respecto a coordenadas espaciales y al tiempo en los problemas dinámicos. La rapidez del flux (valor de Ψ) está determinada por los parámetros de transporte asociados a cada tipo de transferencia: viscosidad o parámetros reológicos para el transporte de cantidad de movimiento; conductividad térmica, coeficiente de transferencia de calor por convección y emisividad para el transporte de calor; difusividad y coeficiente convectivo de transferencia masa para el transporte de masa para una sustancia o componente A en sistemas binarios o multicomponentes.

La materia de fenómenos de transporte I pertenece al grupo de ciencias de la ingeniería, fundamentada en ciencias básicas como son las Matemáticas, Física y Termodinámica, por lo que se imparte en el segundo tercio de la malla curricular, lo que la presenta como antecedente de otras asignaturas como: Fenómenos de transporte II y las operaciones Unitarias.

Esta asignatura está conformada por cinco unidades de aprendizaje distribuidas de la siguiente manera:

En el caso de la transferencia de cantidad de movimiento (momentum), que es el tema principal de estudio de esta asignatura, se efectúan balances microscópicos de velocidad de

¹ Sistema de asignación y transferencia de créditos académicos

cantidad de movimiento (tanto viscoso como convectivo), tomando en cuenta las fuerzas superficiales (presión) y las fuerzas volumétricas (gravedad o fuerza centrífuga) lo que, en otras palabras, es una expresión diferencial de la segunda ley de Newton. Al resolver las ecuaciones diferenciales obtenidas, se obtienen perfiles de esfuerzo(s) y de velocidad(es) en el fluido. A partir de estas expresiones se puede obtener: Velocidad promedio, flujo volumétrico, fuerza que ejerce el fluido sobre las paredes del ducto que lo contiene, número de Reynolds, flujo másico total, pérdidas de energía por transporte viscoso, entre otras, que son necesarias para el diseño de sistemas de transporte de fluidos.

Permite establecer los fundamentos para diseñar, seleccionar, adaptar, operar, simular, optimizar y escalar equipos y procesos en los que se utilicen de manera sostenible los recursos naturales.

- Proporciona las herramientas para tener una descripción fenomenológica basada en leyes y principios de la Ingeniería, para efectuar el diseño termodinámico de equipos para la industria así como la comprensión del efecto de los fenómenos de transporte de calor y masa en la operación eficiente de los equipos.

Intención didáctica.

El curso consta de cinco unidades en las que se desarrolla los elementos necesarios para la aplicación de los balances microscópicos de cantidad de movimiento o momentum para el estudio de las operaciones unitarias relacionadas con transporte y almacenamiento de fluidos. Como pieza clave en el desarrollo de la Ingeniería Bioquímica, las matemáticas proveen un enlace riguroso, sistemático y cuantitativo entre los fenómenos a nivel microscópico y el diseño de procesos por lo que en la Unidad 1 se describe la metodología para caracterizar y resolver las ecuaciones diferenciales parciales (EDP) resultantes de la aplicación de balances microscópicos (obtención de modelos con parámetros distribuidos). En este caso, las EDP del tipo elíptico están relacionadas con los procesos multidireccionales en estado estable; mientras que las EDP del tipo parabólico se presentan en la modelación de procesos en estado transitorio o dinámico con una o más coordenadas espaciales.

La solución analítica se enfoca a la utilización del Método de Separación de Variables empleando como caso de estudio una ecuación elíptica (Ecuación de Laplace del potencial), mientras que el Método de Transformada de Laplace utiliza como caso de estudio a la ecuación de difusión. El profesor deberá propiciar en los estudiantes la capacidad de análisis y formalización de los fenómenos, mediante la discusión apropiada del Problema de Sturm-Liouville para separación de variables y de las propiedades de las transformaciones integrales para el caso de la transformada de Laplace. Es importante resaltar que los ejemplos utilizados deben corresponder a situaciones de interés de la Ingeniería Bioquímica para favorecer simultáneamente la visión integradora del conocimiento. Una característica importante de las EDP en coordenadas cilíndricas o esféricas es que muchas de las soluciones de interés en la Ingeniería, aparecen funciones de Bessel ($J_n(X)$, $Y_n(X)$) o las funciones de Bessel modificadas ($I_n(X)$, $K_n(X)$), por lo que hay que establecer el mecanismo

de solución de la EDP involucrada en términos de analogía con la ecuación diferencial de Bessel, en lugar del método de Frobenius o solución con series de Potencias que es mucho más laborioso.

Como muchas ecuaciones diferenciales parciales utilizadas en la Ingeniería Bioquímica son no lineales, carecen de solución analítica conocida o requieren un procedimiento complejo para su obtención, por lo que es necesario resolverlas numéricamente. En estos casos para EDP elípticas, se plantearán los términos de malleo del dominio y discretización de los operadores diferenciales para su solución aproximada (series de Taylor) usando Diferencias Finitas. El proceso de discretización genera un sistema de ecuaciones algebraicas (lineal o no lineal) que debe resolverse convenientemente (Gauss-Jordan, Factorización LU, Newton-Raphson). En el caso de las EDP parabólicas, el malleo y discretización en las coordenadas espaciales originará un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias con valores iniciales, que deberá resolverse con un método de integración hacia adelante como el método de Euler o los más recomendados métodos de Runge-Kutta en sus diferentes versiones. Los resultados obtenidos en ambos casos (Tablas de valores de la variable dependiente en función de coordenadas espaciales y del tiempo) deberán interpretarse mediante la construcción de gráficas o animaciones usando el software apropiado.

La unidad 2 inicia con una visión global de los fenómenos de transporte de momentum, calor y masa, continuando con los conceptos básicos que requieren la adecuada comprensión del transporte de cantidad de movimiento (fluido, cantidad de movimiento, hipótesis del medio continuo, esfuerzo). La explicación del concepto de esfuerzo (cortante y normal) requiere de la habilidad del profesor para la comprensión de este concepto por su naturaleza tensorial (tres orientaciones para cada dirección espacial, lo que resulta en 9 componentes), para que el estudiante comprenda las restricciones físicas y geométricas de los casos de estudio que se van a tratar en clase para empezar a resolver problemas unidireccionales (1-D). Posteriormente se describe el experimento clásico del fluido entre dos placas paralelas para la obtención de la versión escalar de la Ley de Newton, en donde se aprecia que el Flux (esfuerzo cortante) es proporcional a un gradiente de velocidades e inversamente proporcional a la distancia, regido por el parámetro de transporte que es la viscosidad del fluido.

Con la descripción (usando un video o prototipo) del experimento de Reynolds se establece el concepto de régimen de un fluido (laminar, transición y turbulento) y que los modelos y casos de estudio se harán primero en régimen laminar. La manera cuantitativa de establecer el régimen de un fluido está dada por el número de Reynolds, por lo que se sugiere la elaboración de diversos ejercicios para su estimación, haciendo énfasis que el rango de laminar-turbulento depende del sistema geométrico analizado y de las propiedades reológicas del fluido.

La ley de Newton de la viscosidad conlleva a describir el comportamiento esfuerzo cortante vs velocidad de corte para definir a los fluidos newtonianos y los no newtonianos. Estos últimos son objeto de estudio de la Reología, por lo que existen diversos modelos que explican el comportamiento no newtoniano (Ley de la Potencia, Herschel-Bulkley, Casson, Ellis, Bingham, entre otros), resaltando que la mayoría de los fluidos de origen biológico exhiben comportamiento no newtoniano.

En la caracterización reológica de fluidos se describen los diversos sistemas para medir viscosidad (viscosímetros) aplicables a fluidos newtonianos y los aparatos empleados para evaluar fluidos no newtonianos (reómetros) y el uso de los datos experimentales para obtener, mediante mínimos cuadrados, los valores de los parámetros del modelo reológico propuesto. En el caso de fluidos newtonianos existen en la literatura (ver referencia 3) muchos métodos reportados para estimar viscosidad a partir de otras propiedades

termodinámicas más fundamentales, por lo que se sugiere abordar inicialmente los métodos clásicos para estimar viscosidad en gases como los de Chapman-Enskog y la teoría de Eyring para el caso de la estimación de viscosidad en líquidos. Es recomendable que algunos otros métodos sean abordados por los estudiantes a manera de seminarios.

Con esta base de conocimientos, se podrá iniciar en la unidad 3 con los balances de velocidad de cantidad de movimiento (aplicación microscópica de la segunda ley de Newton) en problemas con sistemas geométricos clásicos como el flujo entre dos placas paralelas y el flujo por el interior de un tubo, haciendo énfasis de que el transporte viscoso es el que prevalece en el sistema analizado, ya que el transporte convectivo de cantidad de movimiento solamente será importante en fluidos compresibles, movimiento multidireccional del fluido o cambios de área normal a la dirección del fluido.

Con el perfil de velocidad obtenido se podrá derivar una serie de propiedades útiles en el diseño de sistemas de transporte de fluidos como: Velocidad máxima, velocidad promedio, número de Reynolds, flujo volumétrico, fuerza que ejerce el fluido sobre las paredes del ducto que lo contiene, entre otras. Posteriormente se puede abordar el análisis de flujo en estado transitorio o dinámico, tomando como casos de estudio el experimento que dio origen a la deducción de la ley de Newton de la viscosidad y al flujo por el interior de un tubo bajo un gradiente de presión cuya solución está dada en términos de funciones de Bessel. Por último, con el balance de masa global en un elemento de volumen de fluido en coordenadas cartesianas, se obtiene la ecuación de continuidad, mientras que un balance de cantidad de movimiento sin considerar restricciones, originará las ecuaciones de balance microscópico de momentum, que se reducen, para el caso de fluidos newtonianos de densidad y viscosidad constantes a las ecuaciones de Navier-Stokes, que serán útiles para la solución de problemas más complejos en los tres sistemas de coordenadas principales (cartesianas, cilíndricas y esféricas) y cualquier otro sistema de coordenadas ortogonales. En este punto, el estudiante debe reconocer para un problema en específico, que es más conveniente, si aplicar el balance usando un elemento diferencial apropiado o la utilización de las ecuaciones de Navier-Stokes.

En la unidad cuatro se recomienda iniciar con videos de flujos turbulentos para explicar la importancia de su modelación y poder apreciar las características de un flujo turbulento (formación de remolinos y efectos de retromezclado). A partir de la consideración de velocidad promedio, es posible sustituir este concepto en las ecuaciones de Navier-Stokes para obtener las ecuaciones de momentum para régimen turbulento, originándose un término extra que se conoce como *Esfuerzos de Reynolds*, el cual tiene una dependencia no solo de las propiedades del fluido sino también del flujo por lo que, a la fecha, no existe un modelo riguroso para definir los esfuerzos de Reynolds (y dar *cerradura (closure)* al problema), sino que existen una serie de modelos aproximados, entre los más sencillos que han sido utilizados en el diseño en Ingeniería (teoría de capa límite, factor de fricción) hasta los más complejos, que requieren solución numérica y que son objeto de estudio de la Dinámica Computacional de Fluidos. Debe tenerse en mente que ambas concepciones aplicadas en una situación específica deberían producir soluciones similares.

En este punto es necesario explicar el procedimiento para hacer cálculos de diseño en sistemas de transporte de fluidos tanto en la vertiente laminar como en la turbulenta, haciendo hincapié que el factor de fricción en este régimen debe determinarse experimentalmente (o resolver el problema por Dinámica Computacional de Fluidos). Lo anterior conlleva a la definición de factor de fricción y su dependencia (teórica) del número de Reynolds en régimen laminar o su dependencia (experimental) del número de Reynolds y de comportamiento hidráulico del ducto (pared lisa o rugosa) en el régimen turbulento. En

este punto, la técnica del análisis dimensional podrá explicar la definición del factor de fricción, resaltando las diversas correlaciones para estimarlo tanto para fluidos newtonianos como no newtonianos y la construcción del diagrama de Moody.

En la unidad cinco, por aplicación de un balance de fuerzas en un elemento de volumen de fluido que circula por el interior de un tubo y la posterior integración de la ecuación resultante, darán el balance de energía mecánica para transporte de fluidos isotérmicos, que se empleará en el diseño termodinámico de sistemas de transporte de fluidos. Si no se considera el efecto de pérdidas por transporte viscoso, se obtiene la conocida ecuación de Bernoulli. En el balance de energía mecánica aparece el término de “*sumatoria de pérdidas de energía*” que contiene a los efectos del factor de fricción de Fanning, los ensanchamientos y contracciones bruscas de la tubería y las pérdidas de energía causadas por la presencia de diversos accesorios en la tubería. En este punto se podrá hacer diseño termodinámico al calcular potencia de la bomba requerida para impulsar el fluido, flujo volumétrico, velocidad promedio, diámetro de la tubería, entre otros parámetros de diseño que tienen como base el estudio del transporte de momentum y las propiedades reológicas de los fluidos. El profesor debe estimular que el estudiante extrapole este conocimiento para aplicarse en otros sistemas geométricos como transporte de gases, agitación, mezclado y almacenamiento de fluidos, entre otros, para favorecer la adquisición de las competencias específicas asociadas.

Por otra parte, el estudio del flujo de fluidos a través de medios porosos ha adquirido una importancia creciente en función de las diversas aplicaciones en los bioprocesos como: biorreactores de lecho fijo y fluidizado, biorreactores de burbujeo, tratamientos de aguas residuales, secado y almacenamiento de granos u otros materiales biológicos, procesos de difusión y reacción en biopelículas, biofiltración, entre otros. La ecuación de cantidad de movimiento característica de estos medios bifásicos es la ley de Darcy o alguna de sus modificaciones (corrección de Brinkman, que incluye un término viscoso) o la ecuación de Forchheimer que también incluye un término inercial (convectivo). En este tema se revisan las aplicaciones importantes del medio poroso como el transporte de un fluido a través de un lecho fijo o fluidizado, analizando sus principales propiedades como porosidad, permeabilidad, caída de presión, flujo volumétrico, factores de fricción.

En este punto, el estudiante ha descubierto y adquirido una serie de competencias que le servirán de base para la asignatura de Fenómenos de Transporte II (estudio de los balances microscópicos de calor y de masa para un componente A), Operaciones Unitarias y los cursos de Ingeniería posteriores, a la vez que el estudiante ha reforzado su capacidad analítica e integradora del conocimiento.

En el transcurso de las actividades programadas es muy importante que el estudiante aprenda a valorar las actividades que lleva a cabo y entienda cabalmente que está construyendo su carrera y en consecuencia actúe de una manera profesional; de igual manera, aprecie la importancia del conocimiento y los hábitos de trabajo; desarrolle la precisión y la curiosidad, la puntualidad, el entusiasmo y el interés, la tenacidad, la flexibilidad y la autonomía. Es necesario que el profesor ponga atención y cuidado en estos aspectos con su quehacer en el aula ya que el curso exige capacidad de abstracción y de pensamiento analítico para poder comprender los temas involucrados, particularmente los relacionados al esfuerzo (cortante y normal), la velocidad de deformación o de corte y las formas de transferencia de cantidad de movimiento (viscoso que se relaciona con los esfuerzos (τ_{ij} y convectivo que se relaciona con la cantidad de movimiento global del fluido ($\rho v_i v_j$) y el manejo matemático básico de estos conceptos ya que son tensores de segundo orden.

3.- COMPETENCIAS A DESARROLLAR

<p>Competencias específicas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Caracterizar y resolver las ecuaciones diferenciales parciales elípticas y parabólicas asociadas al estudio de los fenómenos de transporte • Deducir y resolver los balances microscópicos de cantidad de movimiento para efectuar diseño termodinámico en sistemas de transporte de fluidos • Caracterizar reológicamente diversos fluidos biológicos y reconocer la importancia de la Reología en el diseño de sistemas de transporte de fluidos. • Utilizar las ecuaciones de variación de momentum (Ecuación de continuidad, Ecuaciones de esfuerzos y ecuaciones de Navier-Stokes) en la obtención de los modelos diferenciales asociados a diversos sistemas en donde interviene el movimiento de fluidos. • Aplicar el balance de energía mecánica para efectuar el diseño termodinámico de sistemas de transporte de fluidos. • Reconocer que el estudio de los fenómenos de transporte es fundamental para el diseño termodinámico de los bioprocesos. 	<p>Competencias genéricas:</p> <p>Competencias instrumentales</p> <ul style="list-style-type: none"> • Capacidad de análisis y síntesis • Capacidad de organizar y planificar • Comunicación oral y escrita • Manejo de software como hoja electrónica y lenguajes de programación • Habilidad para buscar y analizar información proveniente de fuentes diversas (Gestión de la información) • Solución de problemas • Toma de decisiones en diversas circunstancias, inclusive adversas. <p>Competencias interpersonales</p> <ul style="list-style-type: none"> • Capacidad crítica y autocrítica • Trabajo en equipo • Habilidades interpersonales • Trabajo con ética y sustentabilidad. <p>Competencias sistémicas</p> <ul style="list-style-type: none"> • Capacidad de aplicar los conocimientos en la práctica • Habilidades de investigación • Capacidad de aprender • Capacidad de generar nuevas ideas (creatividad) • Habilidad para trabajar en forma autónoma • Búsqueda permanente del logro • Habilidad para el autoaprendizaje cuando sea necesario.
--	---

4.- HISTORIA DEL PROGRAMA

Lugar y fecha de elaboración o revisión	Participantes	Observaciones (cambios y justificación)
Instituto Tecnológico de Villahermosa, Villahermosa, Tab., 7-11 de Septiembre de 2009	Representantes de los Institutos Tecnológicos de Celaya, Culiacán, Durango, Mérida, Morelia, Tehuacán, Tepic, Tijuana, Tuxtepec Veracruz y Villahermosa	Reunión Nacional de Diseño e Innovación Curricular para la Formación y Desarrollo de Competencias Profesionales de la carrera de Ingeniería Bioquímica del Sistema Nacional de Educación Superior Tecnológica.
Instituto Tecnológico de	Representante de la	Análisis, enriquecimiento y

Lugar y fecha de elaboración o revisión	Participantes	Observaciones (cambios y justificación)
Celaya del 14 de septiembre de 2009 al 5 de febrero de 2010	Academia de Ingeniería Bioquímica.	elaboración del programa de estudio sintético propuesto en la Reunión Nacional de Diseño Curricular de la carrera de Ingeniería Bioquímica, empleando el enfoque de competencias.
Instituto Tecnológico de	Enero de 2010	Reunión Nacional de Consolidación del Diseño e Innovación Curricular para la Formación y Desarrollo de Competencias Profesionales de la carrera de Ingeniería Bioquímica del Sistema Nacional de Educación Superior Tecnológica.

5.- OBJETIVO(S) GENERAL(ES) DEL CURSO (competencia específica a desarrollar en el curso)

- Comprender y aplicar los principios de los balances microscópicos de cantidad de movimiento en los procesos de transporte de fluidos.
- Obtener los parámetros reológicos de los fluidos y diseñar sistemas de flujo de fluidos.

6.- COMPETENCIAS PREVIAS

- Comprender y aplicar el Principio Fundamental del Cálculo
- Diferenciar e integrar funciones.
- Aplicar las operaciones del álgebra vectorial.
- Comprender y aplicar los sistemas de coordenadas cartesianas, cilíndricas y esféricas.
- Resolver ecuaciones diferenciales ordinarias tanto con valores iniciales como con valores en la frontera.
- Aplicar la primera y segunda Ley de la Termodinámica.
- Realizar balances macroscópicos de materia y energía.
- Aplicar los métodos numéricos.
- Usar software o lenguaje de programación para el planteamiento y resolución de problemas.
- Aplicar la transformada de Laplace para resolver ecuaciones diferenciales ordinarias

7.- TEMARIO

Unidad	Temas	Subtemas
1	Ecuaciones diferenciales parciales (EDP)	1.1 Introducción a la modelación matemática. Aplicaciones en la Ingeniería Bioquímica 1.2 Caracterización, importancia, condiciones de entorno, solución de EDP y aplicaciones. EDP elípticas, parabólicas e hiperbólicas. 1.3 Métodos analíticos de solución de EDP elípticas: Separación de variables, problema de Sturm-Liouville, valores y funciones propias, integrales ortogonales. Superposición de

Unidad	Temas	Subtemas
		soluciones 1.4 Métodos analíticos de solución de EDP parabólicas: Transformada de Laplace. 1.5 Soluciones de EDP en coordenadas cilíndricas y esféricas. Ecuación diferencial de Bessel, funciones de Bessel $J_n(X)$, $Y_n(X)$ y funciones modificadas de Bessel $I_n(X)$, $K_n(X)$ 1.6 Métodos numéricos de solución de EDP: Malleo y discretización, Diferencias Finitas para EDP elípticas y Diferencias finitas acoplada a métodos de Runge-Kutta para EDP parabólicas 1.7 Ejemplos de aplicación.
2	Balances microscópicos de cantidad de movimiento	2.1 Balance microscópico en un volumen de control, empleo del principio fundamental del cálculo y procesos de transferencia de momentum, calor y masa. Concepto de densidad de flujo o Flux. 2.2 Concepto y propiedades de un fluido, presión estática e hidrostática, hipótesis de medio continuo. Cantidad de movimiento, Esfuerzo y deformación. 2.3 Ley de Newton de la viscosidad. Deducción, definición y dimensiones. Concepto de viscosidad 2.4 Régimen de un fluido (Experimento de Reynolds). Régimen laminar, transición y turbulento. Número de Reynolds. 2.5 Fluidos newtonianos y no newtonianos. Reología 2.6 Modelos reológicos. Viscosidad aparente 2.7 Caracterización reológica y estimación de parámetros de modelos reológicos 2.8 Estimación de viscosidad en gases y líquidos
3	Análisis en flujo laminar	3.1 Ecuación general del balance de cantidad de movimiento. Condiciones de frontera usuales. 3.2 Balance microscópico de cantidad de movimiento 1-D. Condiciones de frontera típicas. 3.3 Obtención de perfiles de velocidad y de Esfuerzo Cortante en un fluido contenido entre placas planas 3.4 Obtención de perfiles de velocidad en un fluido que se transporta por el interior de un tubo. 3.5 Problemas diversos de transporte de un fluido en régimen laminar tanto con fluidos newtonianos como no newtonianos 3.6 Introducción al estado dinámico. 3.7 Deducción de las ecuaciones de variación: Ecuación de continuidad, balances

Unidad	Temas	Subtemas
		microscópicos de momentum, ecuaciones de Navier-Stokes. Ley de Newton generalizada.
4	Análisis en flujo turbulento	<p>4.1 Turbulencia: Definición, características, propiedades promedio.</p> <p>4.2 Modelos de turbulencia. Dinámica computacional de fluidos</p> <p>4.3 Metodología del diseño de sistemas de transporte de fluidos</p> <p>4.4 La teoría de capa límite. Ecuación de Von-Karman para tubos lisos.</p> <p>4.5 Definición de factor de fricción de Fanning.</p> <p>4.6 Análisis dimensional. Teorema de Buckingham.</p> <p>4.7 Factor de fricción para flujo en conducciones hidráulicamente lisas o rugosas.</p> <p>4.8 Factor de fricción en otros sistemas geométricos.</p>
5	La ecuación de energía mecánica y sus aplicaciones	<p>5.1 La Ecuación General de Energía Mecánica en sistemas isotérmicos. Deducción y características. Ecuación de Bernoulli.</p> <p>5.2 Cálculo de las pérdidas por fricción y trabajo necesario para transportar un fluido en tuberías. Pérdidas de energía por la presencia de accesorios y/o cambios bruscos en la sección transversal de la tubería.</p> <p>5.3 Flujo en lechos empacados fijos. Medio poroso. Ley de Darcy, concepto de permeabilidad. Ecuación de Ergun.</p> <p>5.4 Fluidización. Conceptos, curva característica, caída de presión. Transporte neumático. Aplicaciones.</p>

8.- SUGERENCIAS DIDÁCTICAS

El profesor o facilitador del curso de Fenómenos de Transporte I debe poseer un amplio conocimiento del estado del arte inherente a los temas del curso y, de preferencia, realizar investigación asociada a los fenómenos de transporte en la ingeniería Bioquímica. Este soporte académico, junto con su experiencia docente servirán de manera sinérgica para favorecer la adquisición de las competencias específicas enunciadas en el programa de estudios, fomentar tanto el trabajo en equipo como el esfuerzo individual y practicar y fomentar con el ejemplo las diversas competencias genéricas que forman el perfil profesional del ingeniero. Algunas de las estrategias sugeridas para estos fines son:

- Organizar talleres de resolución de problemas relacionados con cada uno de los temas del programa, empleando computadora.
- Realzar las diversas aplicaciones que tiene el análisis del transporte de cantidad de movimiento en el campo de la Ingeniería Bioquímica: Transporte de fluidos no newtonianos, biorreactores de burbujeo, agitación y mezclado, biofiltración, biocatálisis, entre otros ejemplos.

- Ubicar la asignatura dentro de un contexto integrador del conjunto de conocimientos, habilidades y aptitudes que forman el título de Ingeniero Bioquímico, utilizando mapas conceptuales.
- Fomentar durante todo el curso, la visión integradora de los conocimientos, habilidades y aptitudes para la solución de problemas de la práctica de la Ingeniería Bioquímica.
- Emplear recursos audiovisuales como computadora, proyector digital e Internet, usando presentaciones, videos, búsqueda de información, recursos en línea, prototipos, entre otros.
- Promover la lectura y discusión de artículos científicos apropiados, en donde se apliquen los fenómenos de transporte de cantidad de movimiento.
- Utilización de software apropiado (Excel, Mathematica, MathCad, CFD, software local, software libre (Open Office), recursos en línea, entre otros) para el análisis y solución de problemas.
- Elaboración de trabajos de investigaciones documentales y exposición ejecutiva de los mismos
- Seminarios de temas puntuales impartidos por los estudiantes con una duración de 15-20 minutos, en donde se aprecie la calidad de la presentación, la expresión oral y corporal y la defensa del tema
- Análisis descriptivo de casos de estudio en donde se apliquen los fenómenos de transporte de momentum en la Ingeniería Bioquímica: Flujo de fluidos no newtonianos, biorreactores de burbujeo, caracterización reológica de sustancias biológicas, entre otros.
- Búsqueda, exhibición y análisis de videos y animaciones existentes en Internet relacionadas con transporte de fluidos, experimento de Reynolds, propiedades de fluidos newtonianos, cantidad de movimiento, método científico, entre otros temas afines
- Propiciar en el estudiante la participación en eventos académicos (Concursos de creatividad, congresos, entre otros) para fomentar el interés por la investigación y el desarrollo de proyectos.
- Relacionar constantemente los contenidos de esta asignatura con las otras asignaturas del plan de estudios a las que les proporciona soporte (Fenómenos de Transporte 2, Operaciones Unitarias, Bioingeniería) para desarrollar en el estudiante una visión integral e interdisciplinaria que fortalezca sus competencias. Ejemplos: Caracterización reológica de medios de cultivo, comprender los fenómenos de transporte acoplados en diversas operaciones unitarias (secado, calentamiento o enfriamiento de fluidos, esterilización de alimentos), caracterizar el proceso difusión-reacción en microorganismos inmovilizados o en la operación de un biofiltro entre otros, teniendo en mente que, en muchos casos reales, los fenómenos de transporte ocurren de manera acoplada.

9.- SUGERENCIAS DE EVALUACIÓN

La evaluación deber hacerse de manera cotidiana armonizando la evaluación de diversos aspectos enunciados a continuación con la reglamentación vigente.

- Trabajos de investigación en donde se evalúa la calidad del contenido, pertinencia y presentación del mismo, de preferencia en formato digital.
- Exámenes dentro y fuera del aula. Algunos de los exámenes pueden ser con consulta de material bibliográfico y uso de computadora, para apreciar la capacidad del estudiante para búsqueda e integración de información específica.
- Participación del estudiante durante el desarrollo del curso.
- Sesiones de preguntas y respuestas profesor-estudiante, estudiante-estudiante.
- Seminarios de temas selectos impartidos por los estudiantes

- Presentación y defensa de un proyecto propio de la asignatura.
- Talleres de resolución de problemas por equipos de trabajo.
- Planteamiento de problemas selectos cuya resolución (opcional) acreditará puntos extra a la evaluación en turno.

10.- UNIDADES DE APRENDIZAJE

Unidad 1: Ecuaciones diferenciales parciales (EDP)

Competencia específica a desarrollar	Actividades de Aprendizaje
<ul style="list-style-type: none"> • Caracterizar una ecuación diferencial parcial que modele una situación de la Ingeniería Bioquímica • Resolver ecuaciones diferenciales parciales relacionadas con el campo de la Ingeniería Bioquímica, decidiendo la metodología más apropiada al problema planteado. 	<ul style="list-style-type: none"> • Usando una presentación multimedia establecer los conceptos de modelo y modelos matemáticos, características y aplicaciones. Tipos de ecuaciones y métodos de solución • A partir de la forma canónica de la EDP lineal de segundo orden, establecer los criterios para la clasificación de las EDP en elípticas, parabólicas e hiperbólicas y el concepto de curvas características. • Discutir que problemas clásicos de la ingeniería se modelan con ecuaciones diferenciales parciales. • Realizar una serie de ejercicios en donde se proporcione la solución de la EDP y que el estudiante verifique que satisface a la EDP propuesta y sus condiciones de frontera e iniciales. • Realizar las soluciones de los problemas de manera digital usando un editor de ecuaciones, para favorecer la comprensión de la metodología de solución. • Describir ejemplos de la ingeniería Bioquímica que sean modelados por EDP y que tengan solución analítica o solamente solución numérica. • Discutir los tres tipos de condiciones de frontera clásicos: Dirichlet (sin resistencia interfacial), Neumann (valor del flux) y Robbins (resistencia interfacial) y su interpretación física. • Emplear la ecuación de Laplace del calor 2-D como caso de estudio para la explicación del método de separación de variables, Hacer talleres para que el estudiante aplique el método en diversas ubicaciones de la condición de frontera no homogénea. • Emplear la ecuación de difusión 1-D como caso de estudio para la explicación del método de la Transformada de Laplace en EDP

Competencia específica a desarrollar	Actividades de Aprendizaje
	<ul style="list-style-type: none"> • Utilizar Excel o software en línea para el graficado de las funciones de Bessel. • Utilizar las referencias 9 ó 10 o referencias equivalentes para aplicar las diversas propiedades e identidades de las funciones de Bessel. • Utilizar software como MatLab, Femlab o programas hechos en el Tecnológico para la resolución y graficación de soluciones de EDP. • Promover talleres en donde los estudiantes agrupados en equipos de 3-4 integrantes resuelvan casos de estudio tanto analíticamente como numéricamente y comparen las soluciones mediante gráficas (de contornos) o el error relativo promedio obtenido. • Utilización de códigos desarrollados por los estudiantes y/o subrutinas disponibles en internet para los métodos de Newton-Raphson y Runge-Kutta y emplearlas en la solución de las ecuaciones de discretización de diferencias finitas.

Unidad 2: Balances microscópicos de cantidad de movimiento.

Competencia específica a desarrollar	Actividades de Aprendizaje
<ul style="list-style-type: none"> • Comprender los diferentes tipos de fenómenos de transferencia y sus analogías. • Deducir la ley de Newton de la Viscosidad y conceptualizar a la viscosidad como el parámetro de transporte de momentum. • Caracterizar reológicamente un fluido • Estimar la viscosidad de gases y líquidos usando correlaciones y otras propiedades básicas del fluido problema. 	<ul style="list-style-type: none"> • Explicar el principio de los mecanismos de transferencia y definir la analogía entre la transferencia de momentum, calor y masa. • Ilustrar con una animación la fase dinámica de los patrones de velocidad en el problema que da origen a la ley de Newton. • Utilizar un prototipo (un cubo por ejemplo) para ilustrar los diversos esfuerzos que puede estar sujeto un elemento diferencial del fluido. • Hacer una visita a una industria local para apreciar en el proceso observado la influencia de los fenómenos de transporte, particularmente el de cantidad de movimiento. • Realizar búsquedas en Internet de videos acerca del experimento de Reynolds y el artículo original de Osborne Reynolds y los discutan en clase. • Investigar los diferentes tipos de fluidos no Newtonianos y sus modelos matemáticos (plástico de Bingham, pseudoplásticos, dilatante, tixotrópicos, reopéticos y viscoelásticos) y relacionarlos con diversos fluidos biológicos.

Competencia específica a desarrollar	Actividades de Aprendizaje
	<ul style="list-style-type: none"> • Investigar y discutir tablas con valores publicados de parámetros reológicos de fluidos biológicos (alimentos entre otros) • Elaborar diversas formulaciones publicadas para diversos fluidos no newtonianos y que sean presentadas <i>in situ</i> para su apreciación y discusión. • Investigar las diversas correlaciones para determinar la viscosidad en líquidos, gases y mezclas y sus criterios de validez. • Estimar la viscosidad de gases a baja y alta densidad, líquidos y mezclas y compararlas con los valores experimentales reportados. Construir en Excel o lenguaje de programación algoritmos seleccionados para la estimación de viscosidad en gases y líquidos.

Unidad 3: Análisis en Flujo Laminar

Competencia específica a desarrollar	Actividades de Aprendizaje
<ul style="list-style-type: none"> • Aplicar el balance microscópico de cantidad de movimiento junto con un modelo reológico del fluido para obtener perfiles de velocidad en diversas situaciones en donde intervenga el movimiento de un fluido. • Calcular, usando como punto de partida, el perfil de velocidad, velocidad máxima, flujo volumétrico, flujo másico, velocidad promedio, fuerza que ejerce el fluido sobre las paredes que están en contacto con el fluido, número de Reynolds, en diversos sistemas geométricos clásicos de movimiento de fluidos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Realizar comparaciones de resultados en el flujo de un fluido por el interior de un tubo, cuando se emplean los modelos de la Ley de Newton, Ley de la Potencia y Herschel-Bulkley. • Construir en Excel un simulador sencillo del flujo de un fluido por el interior de un tubo, graficando su perfil de velocidad, apreciando el efecto de la variación del radio, de la caída de presión de la viscosidad, entre otros. • Exponer en seminario la metodología de solución de problemas complejos como flujo de la ley de la Potencia en tubos concéntricos. • Obtener la ley de Hagen-Poiseuille modificada para otros sistemas geométricos y/o reologías del fluido y comparar con la ecuación original. • Explicar mediante diapositivas la deducción del balance microscópico de cantidad de movimiento,, su generalización en notación vectorial, la obtención de las ecuaciones de Navier-Stokes y su desarrollo en sistemas de coordenadas cartesianas, cilíndricas y esféricas, • Usando las ecuaciones de Navier-Stokes, obtener las ecuaciones diferenciales de cantidad de movimiento para diversos casos en 1-D y 2-D. Por ejemplo: obtener las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento para un fluido que circula por una tobera y analizar las consideraciones hechas.

Unidad 4: Análisis en Flujo Turbulento

Competencia específica a desarrollar	Actividades de Aprendizaje
<ul style="list-style-type: none">• Establecer las características de un flujo turbulento• Describir la metodología del diseño termodinámico de sistemas de transporte de fluidos• Calcular el factor de fricción (analítica o numéricamente, según corresponda) en el flujo de fluidos.	<ul style="list-style-type: none">• Emplear videos o animaciones disponibles en Internet para explicar las propiedades flujo turbulento.• Usando diapositivas diseñadas convenientemente, explicar la obtención de las ecuaciones modificadas de Navier-Stokes para régimen turbulento, haciendo hincapié en el término de los esfuerzos de Reynolds y las diversas maneras para estimarlo para dar cerradura al problema.• Presentar y discutir un diagrama del proceso de diseño termodinámico de sistemas de transporte de fluidos, teniendo en cuenta la reología y el régimen del fluido.• Efectuar una investigación sobre el software CFD (comercial y libre) existente. Si se tiene acceso a licencia de Femlab 3.0 (o superior) es posible hacer simulaciones demostrativas de flujo de fluidos en régimen turbulento o utilizar demos disponibles en Internet.• Presentar un seminario sobre análisis dimensional y los métodos disponibles (igualación de potencias y Teorema Pi) para hallar los principales grupos adimensionales que caracterizan al flujo de un fluido por el interior de un tubo.• Hacer una investigación sobre las diversas correlaciones que existen para estimar el factor de fricción de Fanning y la manera experimental de calcularlo.• Actualmente, aunque la ciencia de CFD está muy desarrollada, todavía se publican artículos referentes al cálculo del factor de fricción en diversas situaciones. Hacer y presentar una recopilación del tema.• Construir un código usando lenguaje de programación o el software Eureka o Engineering Equation Solver (EES) para calcular factor de fricción en régimen turbulento.

Unidad 5: La Ecuación de Energía Mecánica y sus Aplicaciones

Competencia específica a desarrollar	Actividades de Aprendizaje
<ul style="list-style-type: none">• Diseñar termodinámicamente un sistema de transporte de un fluido en una tubería simple o compuesta.• Explicar las características del	<ul style="list-style-type: none">• Construir un simulador en Excel para estimar la potencia de la bomba requerida para impulsar un flujo volumétrico conocido de un fluido newtoniano, a través de una serie de tramos de tubería. Discutir cómo sería rediseñado el simulador para calcular el flujo volumétrico producido por una bomba de

<p>flujo de un fluido a través de un medio poroso</p>	<p>potencia conocida.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Hacer una presentación con diapositivas sobre la ingeniería de detalle de los sistemas de conducción de fluidos como: calibres normalizados de tubería, tipos de válvulas y otros accesorios como cople, bridas, niples, codos, entre otros; tipos de bombas, materiales de construcción de los tubos. • Discutir cómo se puede extrapolar la información anterior para el diseño de sistemas de mezclado y/o almacenamiento de fluidos. • Hacer una reseña histórica de la obtención de la Ley de Darcy (propuesta por el ingeniero francés Henri Darcy en 1857). • Discutir el problema de flujo newtoniano a través de un medio poroso empleando la ley de Darcy con la corrección de Brinkman. • Hacer un experimento demostrativo del efecto de la permeabilidad sobre el flujo. Probeta llena con diversos medios porosos por la cual se deja fluir agua con un colorante. • Utilizar un video o una animación para explicar los diversos estadios de la fluidización. • Discutir las aplicaciones de la fluidización como el secado de chicharos, biorreactores de lecho fluidizado. • Efectuar una investigación sobre las diversas maneras publicadas para estimar la permeabilidad de un medio poroso y como puede medirse experimentalmente.
---	--

11.- FUENTES DE INFORMACIÓN

1. Bird, R. B., Warren E. Stewart, Edwin N. Lightfoot. 2002. Transport Phenomena, 2nd edition. New York: John Wiley & Sons, Inc.
2. Brodkey Robert S., Hershey Harry C. 1988. Transport Phenomena: A Unified Approach. USA: Mc. Graw-Hill.
3. Bruce E. Poling, John M. Prausnitz, John P. O'Connell. 2000. The Properties of Gases and Liquids. 5th edition. USA: Mc. Graw-Hill Professional.
4. Christie J. Geankoplis. 2003. Transport Processes and Separation Process Principles. Fourth USA: Prentice Hall PTR.
5. Kreyszig, E. Advanced Engineering Mathematics. 9th edition. 2006. John Wiley and Sons Inc. International Edition. Singapore.
6. McCabe, W., Smith, J., Harriott, P. Unit Operations of Chemical Engineering. 7th edition. Mc Graw-Hill Book Co.
7. Ochoa-Tapia, A. 2004. Métodos Matemáticos Aplicados a la Ingeniería Química. Departamento de Ingeniería de Procesos e Hidráulica. UAM-Iztapalapa.
8. Richard G. Rice, Duong D. Do. 1995. Applied Mathematics and Modeling for Chemical Engineers. John Wiley & Sons, Inc.
9. Spiegel, M.R. 1998. Manual de Fórmulas y Tablas matemáticas. McGraw-Hill Book Co. México.
10. Spiegel, M.R. 2005. Manual de Fórmulas y Tablas de Matemática Aplicada. 3^a edición. McGraw-Hill Book. Co. México.

11. Steffe, J.F. 1996. Rheological Methods in Food Engineering. Second Edition. Freeman Press.
12. Steffe, J.F., Daubert, C.R. 2006. Bioprocessing Pipelines: Rheology and Analysis. Freeman Press.
13. Welty, J., Wicks, C.E., Wilson, R.E., Rorrer, G.L. 2007 Fundamentals of Momentum, Heat, and Mass Transfer. 5th edition. John Wiley & Sons. Inc..
14. Fuentes de Internet. Nota: se consideran como fuentes serias de información en Internet a los sitios web de universidades e instituciones de educación superior de prestigio, centros de investigación (no comercial), organismos gubernamentales tanto nacionales como internacionales y organismos sin fines de lucro.

12.- PRÁCTICAS PROPUESTAS

- Solución analítica y numérica de la ecuación de transporte dinámico de un fluido newtoniano por el interior de un tubo. Comparación entre ambas soluciones y analizar el efecto de variación de diversos parámetros como la caída de presión, radio del tubo, viscosidad sobre los patrones de velocidad.
- Experimento de Reynolds. Visualización del régimen laminar, transición y turbulento. Si no se dispone del equipo adecuado, se puede solicitar el desarrollo de un prototipo.
- Medición de viscosidad en fluidos newtonianos (jarabes a baja concentración) y evaluación de la dependencia de la temperatura y concentración y construcción de modelos matemáticos.
- Medición de esfuerzo cortante vs velocidad de corte en fluidos no newtonianos y cálculo de parámetros reológicos. Ley de la Potencia, Modelo de Herschel-Bulkley
- Medición del factor de fricción en tubos lisos, tomando como base la medición de flujos volumétricos y caídas de presión.
- Desarrollo de un simulador para cálculo de la potencia requerida por una bomba para impulsar un fluido en un sistema de tuberías.
- Demostración de las diversas propiedades de flujo de fluidos no newtonianos (pseudo-plásticos, dilatantes y viscoelásticos).
- Utilización de software CFD para visualización y análisis de patrones de flujo en diversos sistemas en régimen turbulento

Atentamente

Academia del Instituto Tecnológico de Celaya