

Presentación de Proyecto de Investigación ante Consejo Divisional de la DCNI

Fecha de presentación del proyecto	
Sesión de Consejo de aprobación	
Clave del proyecto asignada por Consejo Divisional	

Título del Proyecto:

Tecnologías Emergentes en Ingeniería de Procesos Químicos y Biológicos

Líneas de investigación del Grupo de Investigación:

- Modelado y Simulación de Bioprocesos,
- Optimización de Procesos Químicos y Biológicos,
- Estudios de Sistemas Dinámicos y de Control,
- Desarrollo de Herramientas Computacionales para el Modelado y Simulación,
- Uso eficiente de recursos: Exergoeconomía circular.

Responsable y participantes:

Responsable: Dr. Alfonso Mauricio Sales Cruz (DPT)
Participantes: Dra. María Teresa López Arenas (DPT)
Dra. Helen Denise Lugo Méndez (DPT)
Dr. José Javier Valencia López (DPT)

Orientación:

- Investigación básica (x)
- Investigación aplicada (x)
- Desarrollo o adaptación ()
- Transferencia de tecnología ()
- Desarrollo de tecnología (x)
- Otros (), especificar: _____

Fecha de inicio:

1º de octubre de 2025

Duración:

4 años

Propuesta

1. Resumen

La ingeniería de procesos químicos y biológicos se ha transformado en las últimas décadas gracias a la integración de conocimientos tecnológicos esenciales, necesarios en un mundo en constante evolución. Las tendencias tecnológicas actuales mejoran la comprensión y aplicabilidad de los conceptos de la ingeniería a la industria, y contribuyen al desarrollo de habilidades científicas y pedagógicas. Este proyecto estudiará estas tecnológicas emergentes, destacando la transición hacia enfoques prácticos y digitales que se alinean con las cambiantes demandas de la industria y los objetivos de sostenibilidad. Se presta especial atención a las herramientas de modelado y simulación computacional, el uso de herramientas digitales e inteligencia artificial (IA), el desarrollo de habilidades dirigidas hacia la Industria 5.0, el proceso de diseño sostenible y la economía circular para valorizar residuos orgánicos, así como la transición energética mediante el uso de residuos agroindustriales y biomásas con impacto ambiental.

2. Antecedentes

El Cuerpo Académico (CA) “Ingeniería de Sistemas de Bioprocesos: Modelado y Simulación” del Departamento de Procesos y Tecnología (DPT) fue fundado en 2013, a partir de esa fecha y hasta el 2019 fue reconocido como CA en proceso de consolidación. Desde 2019 cambió su estatus a CA consolidado, y su última vigencia otorgada por el PRODEP ha sido para el período 2024-2029. Actualmente cuenta con cuatro miembros activos, quienes son los participantes y el responsable de este proyecto. Este CA cultiva cinco LGCA (Líneas de Generación y Aplicación del Conocimiento): (1) modelado y simulación de bioprocesos, (2) optimización de procesos químicos y biológicos, (3) estudios de sistemas dinámicos y de control, (4) desarrollo de herramientas computacionales para el modelado y simulación, y (5) uso eficiente de recursos: exergoeconomía circular.

El área de investigación central del CA es la ingeniería de sistemas de procesos (PSE, por sus siglas en inglés, *Process System Engineering*), la cual aborda las operaciones unitarias a diferentes escalas (industrial, piloto, microescala o nanoescala) para fines de síntesis química y/o bioquímica, basado en fenómenos como la termodinámica, reacciones (conversiones químicas, bioquímicas o térmicas) y transporte (masa, calor y momento). De manera que las técnicas de PSE están relacionadas a tareas de síntesis, diseño, operación, optimización y control de procesos químicos y bioquímicos, necesarias para fabricar los productos requeridos por la sociedad. Esto implica que el alcance de PSE es potencialmente amplio. En las últimas décadas, a medida que ha aumentado la demanda de productos más eficientes y versátiles, también ha aumentado la necesidad de mayor conocimiento sobre las demandas de nuevas tecnologías de PSE, como los avances en modelado híbrido (usando primeros principios e IA), optimización a nivel industrial, síntesis y diseño de procesos asistido por computadora, integración del diseño de productos y procesos, análisis tecno-económico-ambiental, y el aprendizaje automático (*machine learning*). Además, la sociedad se enfrenta actualmente a importantes desafíos, como el cambio climático, el crecimiento poblacional y la escasez de recursos, que exigen soluciones innovadoras en el diseño

de productos y procesos para mitigar el cambio climático y la gestión sostenible de los recursos sociedad (Pistikopoulos et al., 2021). Por lo que las herramientas y aplicaciones de PSE también deben evolucionar con estas necesidades.

La denominada Industria 4.0, o Cuarta Revolución Industrial, en conjunto con la digitalización masiva, ha posibilitado la recopilación y el procesamiento de grandes volúmenes de datos, lo que a su vez ha favorecido el desarrollo de marcos metodológicos basados en datos orientados a la generación de conocimiento. Con el aumento exponencial de la cantidad de datos disponibles, el modelado híbrido requiere nuevos marcos y herramientas que combinen los principios básicos de PSE con el conocimiento inducido por los datos. Así que el desarrollo del modelado híbrido debe atender la búsqueda del equilibrio óptimo entre complejidad y dominio bidimensional de los enfoques de modelado de caja blanca y caja negra (Sansana et al., 2021). Y el nuevo escenario de la Industria 5.0, que adicional a los pilares de la Industria 4.0, fomenta las relaciones colaborativas entre humanos y máquinas es esencial para aumentar la innovación, la productividad y la sostenibilidad en los procesos industriales (Akundi et al., 2022).

De forma similar, a nivel educativo, la educación superior debe responder a los retos y oportunidades que plantean estas nuevas tendencias emergentes. Por lo que en las próximas generaciones de ingenieros de procesos (incluyendo ingenieros químicos, biológicos, industriales, etc.), su formación académica será un reto constante, especialmente en el ámbito industrial. Por lo cual se requiere una preparación y formación significativas del alumnado de ingeniería para que tengan la capacidad de resolver problemas y afrontar los retos de esta nueva era digital.

En este proyecto evaluaremos tecnologías sustentables orientadas al diseño, la automatización, la integración de datos y la intensificación de procesos, con el fin de asegurar el óptimo desempeño de los procesos químicos y biológicos, tanto desde una perspectiva formativa como de investigación.

3. Objetivo general y objetivos particulares.

Objetivo general:

Implementar nuevas tecnologías para el modelado, diseño, operación, optimización, monitoreo y el control de procesos químicos y biológicos mediante casos de estudios.

Objetivos particulares:

- Evaluar el secado por microondas como alternativa no convencional para optimizar el deshidratado de productos agroindustriales.
- Diseñar un sensor virtual basado en la Industria 5.0 para monitorear temperatura, pH y concentración en un biorreactor.
- Evaluar el proceso de cogeneración de bioenergía como una alternativa de valorización de los residuos agroindustriales.
- Desarrollo de herramientas de optimización de procesos basadas en IA y manejo de datos a gran escala.

4. Descripción

4.1 Hipótesis

La incorporación sinérgica de herramientas computacionales avanzadas, IA, principios de Industria 5.0, economía circular y estrategias de eficiencia y transición energética permitirá diseñar y operar procesos industriales químicos y biológicos más sostenibles, resilientes y personalizados, logrando una reducción significativa en el consumo energético, la generación de residuos y las emisiones de gases de efecto invernadero, al mismo tiempo que se incrementa la productividad, la rentabilidad y la competitividad global de los procesos bio(químicos) industriales.

4.2 Metodologías

Uso de herramientas computacionales, inteligencia artificial (IA) e Industria 5.0

Por una parte, el uso de lenguajes de programación (como MATLAB o COMSOL), simuladores de procesos basados en ecuaciones (como gPROMS) y simuladores de procesos modulares (como ASPEN o SuperPro Designer) es altamente recomendable como herramientas asistidas por computadora para modelado y simulación de procesos (bio)químicos. Estas herramientas permiten conectar conceptos teóricos con aplicaciones del mundo real, lo que lleva a una mejor comprensión de los sistemas (bio)químicos y proponer alternativas óptimas de resolución de problemas. Estas herramientas ayudan a comprender sistemas bioquímicos complejos, la experimentación sin restricciones, la optimización de procesos, el desarrollo de habilidades analíticas y de resolución de problemas, la aceleración del diseño y la innovación, el escalado de bioprocesos, la integración de conocimiento multidisciplinario, la visualización de datos y procesos, la evaluación de riesgos y seguridad, y el desarrollo de habilidades relevantes para la industria (Pistikopoulos et al., 2021). Además, las herramientas asistidas por computadora también pueden hacer que el proceso de investigación sea más eficiente; en lugar de requerir mucho tiempo en el laboratorio, se pueden ejecutar múltiples simulaciones en un período corto, lo que permite experimentar con una amplia gama de escenarios. En este proyecto, además de utilizar las herramientas computacionales tradicionales se propone desarrollar modelos híbridos basados en IA, los cuales deben incorporar aspectos como la economía, el impacto ambiental, la operatividad, la seguridad y la sostenibilidad de los bio(procesos). Esto se hará integrando métodos de generación automatizados lo suficientemente flexibles como para incorporar el conocimiento del dominio y permitir la formulación de diagramas de flujo de procesos innovadores para una amplia gama de aplicaciones (Mann et al., 2024).

Por otra parte, la Industria 5.0 se centra en digitalización, automatización, internet de las cosas, IA y big data, buscando la colaboración humano-máquina, sostenibilidad y resiliencia. La integración de la Industria 5.0 y las herramientas de automatización de procesos facilita el desarrollo de procesos inteligentes, sostenibles y éticos, acortando la distancia entre la academia y la industria (Sansana et al., 2021). En particular, se abordarán casos de estudio para el monitoreo y control automático de bioprocesos (como es el proceso de sacarificación de biomásas lignocelulósicas). Como marco teórico se hará énfasis en un sensor virtual que es un algoritmo que permite utilizar la información disponible para calcular o estimar variables con la finalidad de reducir el número de sensores físicos en un proceso determinado, empleando modelado y conceptos de la Industria 5.0. Esto puede ser útil o necesario en casos en los que existan dificultades técnicas para realizar

mediciones de magnitudes físicas directamente con un sensor físico y significar una reducción de los costos de la automatización de los procesos.

Economía circular, eficiencia y transición energética

Los efectos del cambio climático a nivel global visibilizan la necesidad de desarrollar y evaluar procesos alternativos para la producción de energía eléctrica y combustibles, con el fin sustituir la demanda de las fuentes convencionales de manera gradual. En este contexto, los procesos agroindustriales generan residuos orgánicos (biomasas) con características que pueden ser aprovechadas para generar bioenergía y biocombustibles. Por lo que la economía circular, que involucra la eliminación o reducción de residuos mediante el rediseño de los sistemas de producción, es una opción para mejorar o mantener la rentabilidad. Este modelo enfatiza la longevidad de los productos, el reciclaje, la reutilización y la recuperación de residuos. La economía circular promueve prácticas sostenibles, la eficiencia de los recursos y la gestión ambiental (Glavic et al., 2021). En particular, la integración de los principios de la economía circular en la educación puede tener beneficios de gran alcance, como: aumentar la conciencia ambiental, fomentar la innovación, desarrollar habilidades interdisciplinarias (como ingeniería, economía, diseño y ciencias sociales), promover prácticas empresariales sostenibles y una mentalidad orientada al futuro, y empoderar a las comunidades locales (Alfaro et al., 2021)

La eficiencia energética optimiza el uso de recursos, reduce costos y emisiones, mientras que la transición energética permite cambiar hacia un modelo sostenible, resiliente y competitivo. Para México, ambas son clave para reducir su vulnerabilidad energética, mejorar su competitividad industrial, cumplir compromisos climáticos y aprovechar su enorme potencial renovable. En México, más del 70% de la energía primaria proviene de combustibles fósiles (petróleo, gas natural y carbón), por lo que existe un potencial enorme para energías renovables.

Como caso de estudio de eficiencia energética se abordará un método de secado por microondas como alternativa no convencional para deshidratar productos agroindustriales, principalmente frutos ricos en antioxidantes, comparando su cinética y eficiencia energética frente a referencias de la literatura con aire caliente. El calentamiento dieléctrico volumétrico de las microondas promete reducciones sustanciales en tiempo y consumo de energía, preservando color, aroma, textura y compuestos bioactivos. El estudio abarcará desde la caracterización de materia prima (frutos ricos en antioxidantes de producción nacional como son arándano y capulín) hasta el modelado cinético y la optimización de parámetros operativos (potencia–tiempo–modo por pulsos), con evaluación integral de calidad y seguridad alimentaria. Se realizará un modelado numérico en COMSOL Multiphysics, que permitirá simular la distribución de temperatura, los gradientes internos de humedad y la cinética de secado, validando los resultados experimentales a través del ajuste de curvas de reducción de humedad.

Como caso de estudio de la transición energética se estudiará el uso de residuos agroindustriales para la cogeneración que se refiere a la producción simultánea de energía eléctrica y térmica a partir de combustión directa de una biomasa, será evaluado en simuladores (*SuperPro Designer* y *Aspen Plus*). La cogeneración es un proceso probado y confiable que se utiliza principalmente en plantas de energía centralizadas a gran escala, y se ha aplicado durante más de 100 años (Chakraborty et al., 2014). Algunas de las ventajas de los sistemas de cogeneración incluyen alta eficiencia, ahorro de costos, mayor seguridad energética y amplia aplicabilidad geográfica.

5. Formación de recursos humanos.

El alumnado participante tendrá la posibilidad de involucrarse activamente en la investigación, adquiriendo habilidades técnicas y metodológicas, desarrollando su capacidad de análisis y resolución de problemas de ingeniería de procesos. Se espera dirigir por lo menos cuatro servicios sociales y ocho proyectos terminales a nivel licenciatura, así como dirigir por lo menos dos tesis de posgrado en las áreas de modelado y simulación de ingeniería de procesos químicos y biológicos. Los alumnos podrán ser procedentes de la UAM o de otras instituciones de estudios superiores.

6. Productos esperados.

Los resultados de este proyecto se publicarán en artículos científicos y artículos de divulgación. Además, se participará en eventos de difusión (como conferencias, congresos nacionales e internacionales) para intercambio de ideas con la comunidad académica, así como en eventos de divulgación para fomentar el interés por la ciencia a las vocaciones científicas y público en general.

Como parte de la formación de recursos humanos se planea dirigir proyectos de investigación a nivel licenciatura y posgrado, cuyos productos serán los reportes finales de proyectos terminales o servicios sociales, y tesis de posgrado.

7. Impacto esperado del proyecto (problemática nacional abordada).

Este proyecto de investigación se alinea con los siguientes Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU:

- *ODS 2 Hambre Cero*, al disminuir las pérdidas postcosecha y mejora disponibilidad de alimentos mediante la deshidratación productos agroindustriales;
- *ODS 4 Educación de calidad*, al incorporar el uso de herramientas computacionales, inteligencia artificial (IA) y conceptos de la Industria 5.0 en UEAs de licenciatura y posgrado, así como en la participación de conferencias y eventos de difusión y divulgación;
- *ODS 7 Energía asequible y no contaminante*, al aportar con el desarrollo procesos de cogeneración usando residuos agroindustriales para la producción de energía térmica y eléctrica;
- *el ODS 9 Industria, innovación e infraestructura*, al contribuir en el desarrollo de tecnología de secado y tecnologías de economía circular para PYMES (Pequeñas y Medianas Empresas) agroindustriales;
- *ODS 12 Producción y consumo responsable*, al implementar estrategias de economía circular que permitan reducir la generación de residuos y contaminantes, mejorando la economía individual e industrial.
- *ODS 13 Acción por el clima*, al reducir los gases efecto invernadero, el consumo de agua y energía mediante el diseño de biorrefinerías y economía circular.

8. Recursos necesarios para el proyecto:

Financiamiento

Cada uno de los participantes cuenta con un presupuesto individual asignado por la Jefatura del DPT, la cual será empleada para el desarrollo de este proyecto divisional mediante adquisiciones y/o renovaciones de software, compra de equipo para laboratorios de cómputo y experimentales, gastos de asistencias a congresos, y consumibles en general. Y durante el desarrollo se buscará el financiamiento externo mediante convocatorias de Secihti, UAM u otras.

Presupuesto anual	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4
Presupuesto departamental UAM	\$85,000-\$100,000	\$85,000-\$100,000	\$85,000-\$100,000	\$85,000-\$100,000
Financiamiento externo	Por definir	Por definir	Por definir	Por definir

Infraestructura física actual

El CA se cuenta con los siguientes programas computacionales especializados:

- ANSYS Academic CFD (V 17.1)
- COMSOL Multiphysic (V 5.2)
- MATLAB con toolboxes (R2017a)
- ASPEN Engineering Suite (V 9.1)
- SUPERPRO DESIGNER (V 14.0)
- MATHEMATICA (V 14)

Equipo de cómputo:

- Workstation Dell Precisión Tower 7910 CTO (32 GB de memoria RAM, disco duro 2TB, 2 procesadores Intel Xeon con 12 núcleos c/u)
- Servidor virtual UAM-C
- El Laboratorio Virtual de Ingeniería de Procesos (L-730, piso 7, UAM-Cuajimalpa) cuenta con 8 computadores con procesadores Intel Core i7.

Equipo experimental:

- El Laboratorio de Instrumentación y Control (L-852a, Piso 8, UAM-Cuajimalpa) cuenta con sistemas modulares de adquisición de datos (modelo NI-CompactDAQ) y de control embebido (modelo NI-CompactRIO) para medir y manipular señales de manera rápida y exacta; un reactor de 2 L automatizado con sistema de calentamiento/enfriamiento, y diversos sensores en línea (temperatura, pH, oxígeno disuelto, índice de refracción y densidad).

Infraestructura humana actual

Además de los investigadores participantes se cuenta actualmente con dos alumnos que iniciarán su proceso de ingreso al posgrado, y durante el desarrollo del proyecto se planea la participación activa de alumnado de la licenciatura en Ingeniería Biológica.

9. Calendario de actividades en períodos trimestrales.

Periodo	Año 1			Año 2			Año 3			Año 4		
Actividades	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Revisión de literatura												
Modelos de cinéticas de secado												
Pruebas en microondas												
Modelado CFD del proceso de secado												
Modelado de cogeneración												
Caracterización de materias primas para cogeneración												
Evaluación de casos de estudio de cogeneración												
Modelado de un biorreactor de sacarificación												
Diseño de sensores virtuales para biorreactores												
Implementación de sensores virtuales												
Diseño de herramientas basadas en IA												
Desarrollo de casos de estudios usando IA												
Evaluación de casos de estudios usando IA												

10. Información para el seguimiento del proyecto:

Calendarización de productos esperados a lo largo del proyecto.

Producto	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4
Formación de recursos humanos nivel licenciatura				
Servicio Social	1	1	1	1
Proyecto terminal	2	2	2	2
Tesis de licenciatura				
Formación de recursos humanos posgrado				
Especialización				
Maestría			1	1
Doctorado				1
Publicaciones				
Artículos	2	2	2	2
Capítulos de libro				
Memorias o Proceedings	2	2	2	2
Difusión o Divulgación	1	1	1	1
Congresos	2	2	2	2
Conferencias	1	1	1	1

11. Resultados esperados

Metas científicas (entregables)

- Publicación de artículos en revistas nacionales e internacionales.
- Presentación de resultados en eventos de difusión y divulgación.

Metas académicas

- Mantener la consolidación del CA “Ingeniería de Sistemas de Bioprocesos: Modelado y Simulación”.
- Fortalecimiento de la docencia en las áreas de matemáticas e ingeniería utilizando casos de estudio de este proyecto.
- Formación de alumnos de licenciatura y posgrado en el área de Ingeniería de Sistemas de Procesos.

12. Bibliografía

Alfaro L, Rivera C, Luna-Urquizo J, Castaneda E, Zuniga-Cueva J, Rivera-Chavez M. New Trends in e-Technologies and e-Learning. IEEE World Conference on Engineering Education. (2021) doi:10.1109/edunine51952.2021.9429120

Akundi A, Euresti D, Luna S, Ankobiah W, Lopes A, Edinbarough I. State of Industry 5.0 - Analysis and Identification of Current Research Trends. Applied System Innovation 5: 2022, 27. <https://doi.org/10.3390/asi5010027>

Chakraborty, A., Joshi, M., Manjare, S., Karimi, I.A., An industrial perspective of cogeneration – A comprehensive review, Chemical Engineering and Processing - Process Intensification, 205, 109974 (2024) <https://doi.org/10.1016/j.cep.2024.109974>

Glavic P, Pintaric ZN, Bogataj M. Process Design and Sustainable Development - A European Perspective. Processes 9: 148 (2021) <https://doi.org/10.3390/pr9010148>

Mann, V., Sales-Cruz, M., Gani, R., Venkatasubramanian, V., eSFILES: Intelligent process flowsheet synthesis using process knowledge, symbolic AI, and machine learning. Computers & Chemical Engineering (ISSN 0098-1354) 2024, 181, 108505, <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2023.108505>

Pistikopoulos EN, Barbosa-Povoa A, Lee JH, Misener R, Mitsos A, Reklaitis GV, Venkatasubramanian V, You F, Gani R. Process systems engineering – The generation next? Computers & Chemical Engineering 147: 107252 (2021) <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2021.107252>

Sansana J, Joswiak MN, Castillo I, Wang Z, Rendall R, Chiang LH, Reis, S. Recent trends on hybrid modeling for Industry 4.0, Computers & Chemical Engineering 151: 2021. 107365, <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2021.107365>