Project-Based Learning in Chemical Engineering: Integrating analytical modeling and simulation for competency enhancement

María Alejandra Rodríguez
Universidad Metropolitana, Venezuela, marodriguezded@unimet.edu.ve

Abstract– ***To address the tendency in Chemical Engineering of prioritizing numerical computation over physical understanding, this study evaluates an active learning model combining Project-Based Learning (PBL), the CDIO framework, and the flipped classroom in a Separation processes course (33 students, 11 teams). Teams conceptually designed a multicomponent distillation column using both the Fenske-Underwood-Gilliland (FUG) shortcut method and PRO/II rigorous simulation, evaluated through ABET-mapped rubrics. Results revealed high student mastery in FUG calculations and PRO/II simulations (90.9% excellent for both), alongside key technical deviations—41.5% in minimum reflux and 35.3% in ideal stages—caused by thermodynamic non-idealities. Although techno-economic contextualization presented room for improvement (18.2% unsatisfactory), the strategy successfully shifted student learning toward high-level engineering judgment. Ultimately, this approach advances SDG 4 (Quality education) and prepares future engineers for sustainable process design, aligning with SDG 7 (Affordable and clean energy), SDG 8 (Decent work and economic growth), SDG 9 (Industry, innovation, and infrastructure), SDG 12 (Responsible consumption and production), and SDG 13 (Climate action).***

Keywords-- ***Separation processes, Multicomponent distillation, Project-Based Learning, ABET competencies, Educational innovation.***

Aprendizaje Basado en Proyectos en Ingeniería Química: Integración de modelado analítico y simulación para el fortalecimiento de competencias

María Alejandra Rodríguez
Universidad Metropolitana, Venezuela, marodriguezded@unimet.edu.ve

Resumen– ***Para abordar la tendencia en Ingeniería Química de priorizar el cálculo numérico sobre la comprensión física, este estudio evalúa un modelo de aprendizaje activo que combina el Aprendizaje Basado en Proyectos (ABP), el marco CDIO y el aula invertida en un curso de Procesos de Separación (33 estudiantes, 11 equipos). Los equipos diseñaron conceptualmente una columna de destilación multicomponente utilizando tanto el método simplificado de Fenske-Underwood-Gilliland (FUG) como la simulación rigurosa en PRO/II, evaluados mediante rúbricas alineadas con los criterios ABET. Los resultados revelaron un alto dominio técnico en los cálculos FUG y en las simulaciones con PRO/II (90,9% excelente en ambos), junto con desviaciones clave —41,5% en reflujo mínimo y 35,3% en etapas ideales— causadas por no idealidades termodinámicas. Aunque la contextualización tecno-económica presentó margen de mejora (18,2% insatisfactorio), la estrategia logró transformar el aprendizaje hacia un juicio de ingeniería de alto nivel. En última instancia, este enfoque impulsa el ODS 4 (Educación de calidad) y prepara a futuros ingenieros para el diseño de procesos sostenibles, alineándose con el ODS 7 (Energía asequible y no contaminante), el ODS 8 (Trabajo decente y crecimiento económico), el ODS 9 (Industria, innovación e infraestructura), el ODS 12 (Producción y consumo responsables) y el ODS 13 (Acción por el clima).***

Palabras clave-- ***Procesos de separación, Destilación multicomponente, Aprendizaje Basado en Proyectos, Competencias ABET, Innovación educativa.***

I. Introducción

La enseñanza de los Procesos de separación en la carrera de Ingeniería Química, particularmente en temas como la destilación continua binaria y multicomponente, enfrenta desafíos significativos debido a la naturaleza abstracta de sus fundamentos termodinámicos y la desconexión que los estudiantes suelen percibir entre la teoría y la práctica industrial [1]. Tradicionalmente, este contenido se ha impartido mediante clases magistrales donde el docente es el protagonista y el alumno un receptor pasivo, lo que frecuentemente deriva en apatía, falta de motivación y una tendencia a memorizar procedimientos para resolver problemas sin comprender el comportamiento físico del sistema [2]. En el caso específico de la destilación multicomponente en múltiples etapas, el aprendizaje se ve obstaculizado por la complejidad de los cálculos, donde el tiempo dedicado a la resolución matemática a menudo supera la capacidad del alumno para analizar y discutir los resultados obtenidos, restando valor formativo a la actividad [3, 4].

Frente a esta problemática, las metodologías activas emergen como una solución para centrar el proceso en el estudiante y fomentar el desarrollo de competencias profesionales. El Aprendizaje Basado en Proyectos (ABP) se consolida como una estrategia fundamental que permite a los estudiantes involucrarse en retos del mundo real, integrando la planificación y ejecución de proyectos vinculados a su futura disciplina [5, 6, 7]. Por su parte, el marco CDIO (Concebir, Diseñar, Implementar, Operar) se alinea con la necesidad de formar ingenieros capaces de gestionar procesos químicos completos, desde la definición de premisas de diseño y el uso de métodos analíticos modernos hasta la implementación de herramientas computacionales avanzadas [7, 8, 9, 10]. Adicionalmente, el aula invertida redefine la dinámica tradicional al trasladar la asimilación de contenidos teóricos fuera del aula mediante recursos multimedia, permitiendo que el tiempo presencial se dedique a la práctica, el debate y la resolución colaborativa de problemas complejos [10, 11].

Al aplicar estas metodologías, se busca evaluar competencias ABET asociadas a la ingeniería. ABET (*Accreditation Board for Engineering and Technology*) es una reconocida organización internacional de acreditación universitaria, la cual define estándares mínimos de formación en resultados de aprendizaje que garantizan la preparación profesional del egresado [12]. Para la asignatura Procesos de Separación I se consideraron tres resultados de aprendizaje fundamentales [4, 5, 12]:

1) *Resolución de problemas de ingeniería*: capacidad para comprender, definir y resolver problemas de análisis de ingeniería en el campo de estudio pertinente, con el uso de conocimientos básicos y avanzados de métodos analíticos modernos.
2) *Ingeniería práctica*: capacidad para analizar, diseñar y gestionar procesos químicos aplicando principios fundamentales de ingeniería, herramientas computacionales avanzadas y metodologías de simulación, integrando criterios económicos, ambientales y sociales para garantizar eficiencia, seguridad y cumplimiento normativo en entornos industriales.

3) *Especialización y enfoque en el mercado laboral*: capacidad para aplicar conocimientos avanzados de ingeniería química en la resolución de problemas del sector industrial, desarrollando proyectos y soluciones que respondan a las necesidades del mercado laboral y las expectativas empresariales.

En la asignatura Procesos de Separación I, el abordaje de la destilación multicomponente exige al estudiante transitar desde métodos cortos como Fenske-Underwood-Gilliland (FUG) hacia simulaciones rigurosas empleando programas como PRO/II [13, 14]. Esta transición es crítica para entender cómo las variaciones en las propiedades termodinámicas de las mezclas repercuten en las suposiciones del método FUG, aspectos fundamentales a considerar en el dimensionamiento de la columna de destilación [15, 16].

El método FUG es una metodología analítica de diseño utilizada para el diseño preliminar de columnas de destilación multicomponente. Sus siglas corresponden a los apellidos de los autores de las ecuaciones fundamentales que lo componen: Fenske, Underwood y Gilliland, donde frecuentemente se incorpora la ecuación de Kirkbride (FUG-K). Este método permite obtener parámetros operativos cuantitativos a través de la determinación de [9, 10, 11, 13, 14]:

1) *Ecuación de Fenske*, permite calcular el número mínimo de etapas teóricas (N_{min}) requeridas para una separación, operando a reflujo total.
2) *Ecuación de Underwood*, determina la relación de reflujo mínima (R_{min}), parámetro que define el consumo energético mínimo de la columna.
3) *Correlación de Gilliland*, estima el número real de etapas teóricas (N) necesarias para una relación de reflujo operativa específica (usualmente entre 1.05 y 1.5 veces la R_{min}).
4) *Ecuación de Kirkbride*, predice la ubicación óptima del plato de alimentación.

Este método se basa en dos suposiciones principales [9, 10, 11, 13, 14]:

1) Volatilidad relativa constante, donde se asume que la facilidad de separación entre los componentes no cambia a lo largo de la columna.
2) Flujo molar constante (CMO), al asumir que las tasas de flujo de vapor y líquido son constantes en cada sección de la columna de destilación.

PRO/II (*AVEVA PRO/II Process Engineering*) es un software de simulación de procesos en estado estacionario ampliamente utilizado en la Ingeniería Química, en diversas áreas como la industria del petróleo, el gas y la petroquímica. Es una herramienta estándar en la industria para optimizar plantas operativas, diseñar nuevos equipos y analizar la viabilidad técnica de procesos químicos [15]. Dentro de sus principales capacidades e implicaciones se encuentran:

1) Balances de materia y energía, que permiten diseñar y evaluar procesos industriales complejos al realizar balances termodinámicos rigurosos.
2) Modelado de operaciones unitarias que incluyen algoritmos avanzados para simular columnas de destilación fraccionada, reactores químicos, intercambiadores de calor, compresores y sistemas de tuberías.
3) Biblioteca termodinámica que cuenta con una de las bases de datos de componentes puros y mezclas más extensas del mercado, lo que facilita predecir con precisión el equilibrio de fases (líquido-vapor, líquido-líquido).

En función a lo planteado, este estudio busca evaluar en qué medida la implementación de un proyecto de diseño basado en la metodología ABP y el marco CDIO, apoyado por una estrategia de aula invertida, mejora la capacidad crítica de los estudiantes de Procesos de Separación I para identificar y justificar las desviaciones termodinámicas entre el método de diseño analítico FUG y la simulación rigurosa en casos industriales reales.

Esta propuesta de innovación educativa se alinea directamente con el Objetivo de Desarrollo Sostenible ODS 4 (Educación de Calidad) al transformar el proceso de enseñanza-aprendizaje, e indirectamente con los ODS 7, 8, 9, 12 y 13 al formar ingenieros capacitados para diseñar procesos industriales energéticamente eficientes, sostenibles y responsables.

II. Marco Metodológico

La metodología de esta experiencia educativa se fundamenta en un diseño instruccional orientado al desarrollo de competencias profesionales, integrando el aprendizaje activo con herramientas de ingeniería de vanguardia.

A. Diseño Instruccional

La experiencia se desarrolló en la asignatura Procesos de Separación I del Departamento de Energía y Automatización, perteneciente a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Metropolitana en Caracas (Venezuela), durante el periodo académico 2526-3. La cohorte estuvo conformada por 33 estudiantes de nivel intermedio de Ingeniería Química, organizados en 11 equipos de 3 integrantes. Los participantes contaban con formación previa en balances de materia, energía y termodinámica del equilibrio de fases, encontrándose en la etapa de transición hacia el modelado analítico complejo y el uso de simuladores industriales como PRO/II

El proyecto se estructura en seis etapas secuenciales de complejidad creciente:

1) *Selección del proceso productivo*, donde cada grupo elige un caso de estudio real de una lista de 15 procesos industriales (petroquímica, refinación, gas natural o química fina). En la Tabla I se pueden observar los distintos procesos ofertados.
2) *Investigación del proceso seleccionado*, con relación a la relevancia económica, ambiental y técnica del proceso industrial real, así como características técnicas relacionadas con el diseño de la columna y condiciones de operación.

3) *Aplicación del método FUG*, con el fin de llevar a cabo el diseño analítico empleando el método Fenske-Underwood-Gilliland para determinar etapas mínimas (Nmin), reflujo mínimo (Rmin), etapas ideales (N), localización de la alimentación (Nalim) y balances de energía, empleando como herramientas Excel o Matlab.
4) *Simulación en PRO/II*, para ello se realiza la simulación rigurosa de la columna de destilación, seleccionando y justificando el modelo termodinámico (Peng-Robinson, SRK, NRTL, UNIQUAC, entre otros).
5) *Dimensionamiento de la columna*: Uso de herramientas de *Tray Sizing/Rating* de PRO/II para definir parámetros físicos (diámetro, altura estableciendo el tipo de internos, según la investigación previa realizada).
6) *Elaboración del informe técnico*, para la entrega de la memoria de cálculo, archivo de simulación y Hoja de Especificación técnica que incluya el análisis crítico de desviaciones y sostenibilidad.

TABLA I
PROCESOS INDUSTRIALES OFERTADOS PARA EL ESTUDIO DE LA DESTILACIÓN MULTICOMPONENTE EN MÚLTIPLES ETAPAS.

Nº	Proceso Industrial	Componentes
Petroquímica, Refinación y Gas Natural		
1	Desetanizadora en una Planta de Extracción de LGN.	Etano, Propano, i-Butano, n-Butano.
2	Fraccionamiento de Isómeros de Butano (Deisobutanizadora).	Propano, i-Butano, n-Butano, i-Pentano.
3	Separación BTX - División de Benceno y Tolueno.	Benceno, Tolueno, o-Xileno, p-Xileno.
4	Tren de Gasolina de Pirólisis (Separación de C5 / C6+)	n-Pentano, i-Pentano, Benceno, Tolueno.
5	Estabilizadora de Condensados de Gas en Alta Mar (FPSO)	Metano, Etano, Propano, n-Butano, n-Pentano, n-Hexano.
Industria Química y de Solventes		
6	Purificación de Metanol para Grado Formaldehído	Éter metílico, Metanol, Agua, Etanol.
7	Recuperación de Acetona en la Industria Farmacéutica	Acetona, Agua, Metanol, Isopropanol.
8	Separación en la Producción de Clorometanos	Cloruro de Metilo, Diclorometano, Cloroformo, Tetracloruro de Carbono.
9	Deshidratación de Alcohol Isopropílico (IPA) Comercial	Agua, Acetona, Isopropanol, n-Propanol.
10	Separación de Acetato de Etilo y Etanol	Acetato de Metilo, Acetato de Etilo, Etanol, n-Butanol.
Industrias Especializadas (Alimentos, Gases y Renovables)		
11	Fraccionamiento de Ácidos Grasos de Aceite de Palma	Ácido Láurico C12, Ácido Mierístico C14, Ácido Palmítico C16, Ácido Estearílico C18.
12	Destilación Criogénica de Aire	Nitrógeno, Argón, Oxígeno.
13	Purificación de Limoneno a partir de Aceite Esencial de Naranja	alpha-Pineno, Sabineno, Limoneno, Linalool, Citral.
14	Concentración de Biobutanol por Destilación Abreviada	Acetona, Etanol, Agua, n-Butanol.
15	Separación de Gas de Síntesis Licuado (Eliminación de CO_2)	Hidrógeno, Monóxido de Carbono, Metano, Dióxido de Carbono.

B. Rúbricas de evaluación

La evaluación de los proyectos se realiza mediante una rúbrica alineada con los criterios establecidos para medir los resultados de aprendizaje ABET. En la Tabla II se presenta el criterio de evaluación, ponderación y resultado de aprendizaje asociado.

Los niveles de logro evaluados sobre 20 puntos fueron: Excelente (18-20 pts), Bueno (14-17 pts), Regular (10-13 pts) e Insuficiente (<10 pts).

TABLA II
CRITERIOS DE EVALUACIÓN PARA LOS RESULTADOS DE APRENDIZAJE.

Resultado de Aprendizaje	Criterio de Evaluación	Ponderación
Especialización y enfoque en el mercado laboral	**Definición del Problema:** Explicación del proceso industrial con justificación económica y técnica.	15%
Resolución de problemas de ingeniería.	**Cálculo Analítico FUG:** Aplica Fenske, Underwood y Gilliland sin errores matemáticos. Identifica claves correctamente.	25%
Ingeniería Práctica	**Simulación en PRO/II:** Selecciona el método termodinámico correcto. Convergencia exitosa de la columna rigurosa.	30%
Resolución de problemas de ingeniería. Ingeniería Práctica.	**Análisis Comparativo:** Analiza críticamente las desviaciones entre FUG y PRO/II basándose en la termodinámica.	20%
Especialización y enfoque en el mercado laboral	**Documentación Técnica:** Entrega una Hoja de Especificación profesional y cumple con normas de redacción técnica.	10%

C. *Diseño de Investigación Educativa*

Se adoptó un enfoque mixto descriptivo-explicativo y transversal, donde el componente cuantitativo analiza las calificaciones de las rúbricas y las desviaciones numéricas de diseño.

Por otra parte, el componente cualitativo evalúa la capacidad analítica de los estudiantes para argumentar las discrepancias termodinámicas en los informes técnicos y memorias de cálculo.

III. Resultados y Discusión

La estructura de esta sección tiene un enfoque mixto ya que integra los datos técnicos generados en los proyectos con el desempeño académico medido por las rúbricas ABET.

A. *Análisis del desempeño académico*

A continuación, se presenta el nivel de logro de los estudiantes en función de los resultados de aprendizaje basándose tanto en las calificaciones obtenidas como en el desempeño en cada criterio evaluado en la rúbrica de los 11 grupos de trabajo.

En la Fig. 1, se presentan las calificaciones obtenidas en base a 20 puntos, donde la nota sobre 18 puntos considera que el trabajo es excelente.

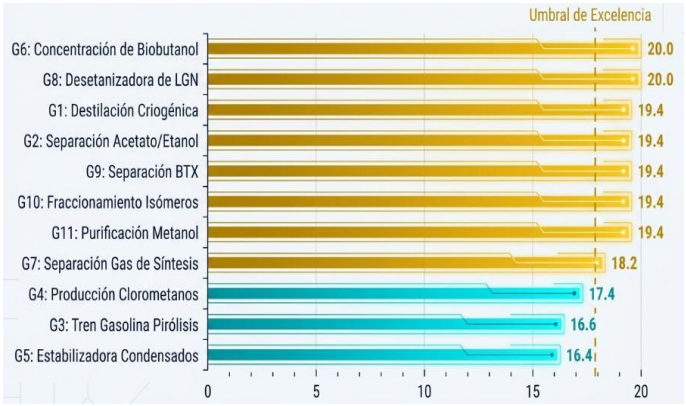


Fig. 1. Calificaciones obtenidas en el proyecto realizado por los distintos grupos/temas de trabajo.

El rendimiento de los 11 grupos de trabajo refleja un nivel de logro predominantemente excelente en las competencias técnicas principales. Este alto desempeño respalda los hallazgos de Prince [16] y Edström & Kolmos [17], quienes demuestran que la integración del Aprendizaje Basado en Proyectos (ABP) con el marco CDIO potencia el compromiso estudiantil y la retención conceptual frente a métodos de enseñanza tradicionales.

De igual forma, en la Fig. 2 se aprecia los resultados asociados a la rúbrica aplicada con relación a la *Resolución de problemas de ingeniería*, donde se evalúa la precisión en la aplicación del método FUG y la capacidad para definir premisas de diseño.

La leyenda de colores empleada es la siguiente: Excelente (verde oscuro); Bueno (verde claro); Regular (amarillo ocre); Insatisfactorio (rojo).

Resultado de Aprendizaje	Criterio de Evaluación	Ponderación	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9	G10	G11	Excelente (%)
Resolución de problemas de ingeniería.	**Cálculo Analítico FUG:** Aplica Fenske. Underwood y Gilliland sin errores matemáticos. Identifica claves correctamente.	25%												90.9
	Análisis Comparativo: Analiza críticamente las desviaciones entre FUG y PRO/II basándose en la termodinámica.	10%												72.7

Fig. 2. Resultados asociados a la Resolución de problemas de ingeniería.

En esta figura se observa que el 90.9% de los grupos alcanzó un nivel excelente en el cálculo analítico del método FUG, demostrando un alto dominio en el manejo de herramientas computacionales (Excel/Matlab).

En el análisis comparativo FUG vs. PRO/II, los grupos alcanzaron un 72.7% de excelencia, evidenciando una sólida capacidad de argumentación termodinámica, aunque un 27.3% requiere mayor profundidad en la interpretación de las desviaciones encontradas.

Seguidamente el resultado de aprendizaje asociado a la *Ingeniería práctica*, el cual se orienta al análisis del éxito en la convergencia de la simulación rigurosa en PRO/II y el dimensionamiento de internos (*Tray Sizing*); estos resultados se aprecian en la Fig. 3.

Resultado de Aprendizaje	Criterio de Evaluación	Ponderación	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9	G10	G11	Excelente (%)
Ingeniería práctica	**Simulación en PRO/II:** Selecciona el método termodinámico correcto. Convergencia exitosa de la columna rigurosa.	30%												90.9
	Análisis Comparativo: Analiza críticamente las desviaciones entre FUG y PRO/II basándose en la termodinámica.	10%												72.7

Fig. 3. Resultados asociados a la Ingeniería práctica.

Los resultados de la figura indican que el 90.9% de los grupos fueron calificados como excelente en la simulación con el programa de PRO/II; mientras que el 72.7% obtuvo la misma evaluación en el análisis comparativo de los métodos empleados (FUG y Simulación); llama la atención el hecho de que un grupo (9.1%) presentó dificultades de convergencia debido a una selección inadecuada del modelo de coeficientes de actividad en un sistema polar azeotrópico.

En cuanto al resultado de aprendizaje asociado a la *Especialización y enfoque en el mercado laboral*, el cual se orienta a la calidad de las hojas de especificación y memorias de cálculo entregadas, los resultados de la rúbrica son presentados en la Fig. 4.

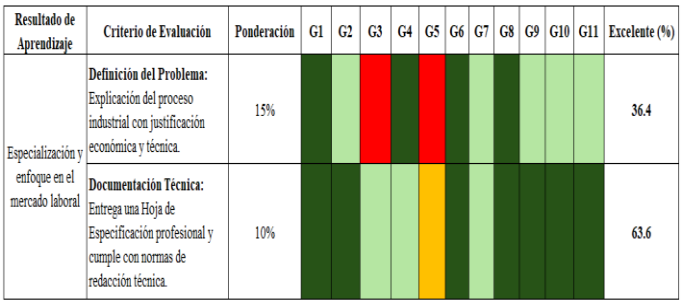


Fig. 4. Resultados asociados a la Especialización y enfoque en el mercado laboral.

Estos resultados señalan las principales oportunidades de mejora instruccional, ya que un 18.2% de los grupos obtuvo una calificación insatisfactoria en la definición del problema debido a una insuficiente contextualización tecno-económica del proceso industrial en la memoria técnica, mientras que en documentación técnica se alcanzó un 63.6% de excelencia y un 9.1% regular. Estos hallazgos coinciden con lo señalado por Turton et al. [18], quienes destacan que la vinculación entre las especificaciones técnicas y la viabilidad económica suele ser el aspecto de mayor curva de aprendizaje para los estudiantes de ingeniería de procesos.

B. Resultados técnicos del diseño: método FUG vs. simulación en PRO/II

Los resultados técnicos obtenidos en el desarrollo de los proyectos demuestran que, si bien el método FUG (Fenske-Underwood-Gilliland) es una herramienta valiosa para el diseño conceptual, presenta desviaciones significativas al compararse con la simulación rigurosa en PRO/II, especialmente en sistemas con alta no idealidad o componentes con puntos de ebullición cercanos.

En la Tabla III se consolidan las desviaciones promedio calculadas para su comparación entre los parámetros fundamentales de diseño (Rmin, N, Nalim), reflejando la brecha entre las suposiciones de idealidad analítica y el cálculo riguroso plato a plato, los cuales dependen directamente de las características de la mezcla a separar.

TABLA III
DESVIACIONES PROMEDIO PARA LOS PARÁMETROS FUNDAMENTALES DE DISEÑO.

Parámetro de Diseño	Desviación Promedio (%)	Rango de Variación (%)
Reflujo Mínimo (Rmin)	**41.5**	10.1 - 89.9
Etapas Ideales (N)	**35.3**	4.2 - 152.9
Localización de Alimentación (Nalim)	**23.2**	0.0 - 95.3

En los sistemas con mezclas de hidrocarburos no polares (Desisobutanizadora, Fraccionamiento de Aire, BTX), Fenske asume volatilidad relativa constante (α), lo cual falla en separaciones de puntos de ebullición muy cercanos o en condiciones de alta presión operacional donde las fugacidades reales difieren notablemente de las leyes ideales [18].

En mezclas polares (Metanol-Agua, Biobutanol, Acetato de Etilo-Etanol), las desviaciones alcanzaron picos de más del 150% en etapas ideales debido a la presencia de azeótropos y puentes de hidrógeno, los cuales son ignorados por FUG pero que son considerados en PRO/II mediante modelos de coeficientes de actividad como NRTL y UNIQUAC, tal como argumentan Kontogeorgis & Folas [19].

Asimismo, la ecuación de Kirkbride presentó errores de hasta 95% en la localización del plato de alimentación en sistemas complejos, ya que esta ecuación solo evalúa composiciones globales, mientras que PRO/II ejecuta balances entálpicos integrales que consideran la condición térmica (q) de la corriente de entrada y minimizan el consumo energético del rehervidor [20].

C. Justificación de las decisiones de diseño

La metodología ABP y el marco CDIO impulsaron a los estudiantes a justificar sus decisiones técnicas con criterio profesional, apoyándose en árboles de decisión termodinámica como el diagrama de Carlson [21], los grupos fundamentaron la selección de ecuaciones de estado (Peng-Robinson, SRK) [22] para hidrocarburos no polares y modelos de coeficientes de actividad (NRTL, UNIQUAC) para mezclas heterogéneas y polares [19].

Adicionalmente, los estudiantes identificaron la presión de operación como la variable crítica de enlace entre la termodinámica y la viabilidad económica, ya que en procesos volátiles justificaron operar a presiones elevadas (hasta 50 atm) para elevar el punto de burbuja del condensador y utilizar agua de enfriamiento en lugar de refrigeración criogénica, mientras que en sistemas térmicamente sensibles (gasolina de pirólisis) seleccionaron operación al vacío (0.5 bar) para evitar reacciones de polimerización indeseadas, siguiendo las recomendaciones de diseño industrial planteadas por Luyben [20] y Smith [23].

D. Impacto Ambiental y Económico

El análisis de sostenibilidad integrado en las rúbricas permitió evaluar la capacidad de los estudiantes para cuantificar el impacto ambiental de sus propuestas de diseño, atendiendo a las reflexiones pedagógicas sobre educación para la sostenibilidad en ingeniería [24]:

1) *Compromiso entre consumo energético y costo de capital,* dónde la selección de variables operativas influyó en la viabilidad económica del proyecto. En los sistemas volátiles ajustaron la presión operativa con el fin de elevar el punto de burbuja del condensador para utilizar agua de enfriamiento estándar en lugar de sistemas criogénicos de alto costo de capital y consumo energético. De igual forma, en mezclas térmicamente sensibles operaron al vacío (0.5 bar) para evitar polimerización. Por otra

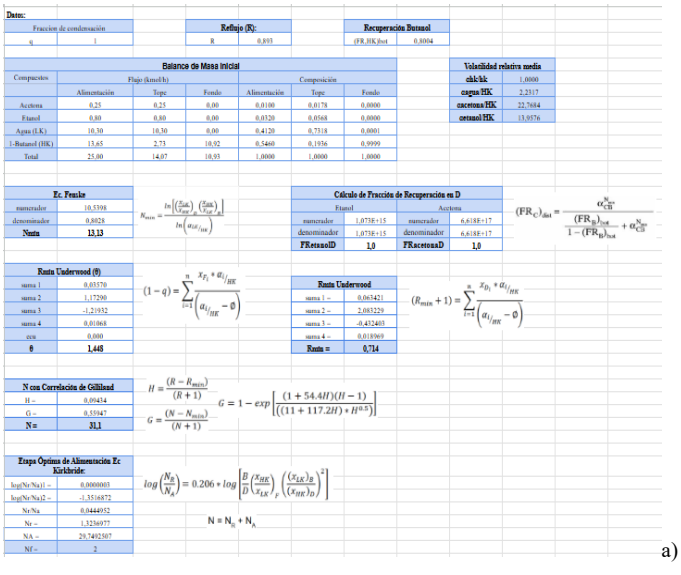
parte, llevaron a cabo una mejora térmica, ya que el ajuste de la relación de reflujo en PRO/II generó ahorros del 15% al 25% en la carga térmica del rehervidor frente al método FUG, reduciendo directamente el consumo de vapor industrial y la huella de carbono (CO_2) operacional.

2) *Impacto comunitario, local y regulatorio:* en este aspecto, el análisis técnico incluyó restricciones de ubicación geográfica real. En proyectos ubicados en plataformas *offshore* (FPSO), los estudiantes debieron justificar bucles cerrados de enfriamiento con agua de mar para cumplir con normativas locales de vertidos térmicos y evitar alterar los ecosistemas marinos comunitarios.

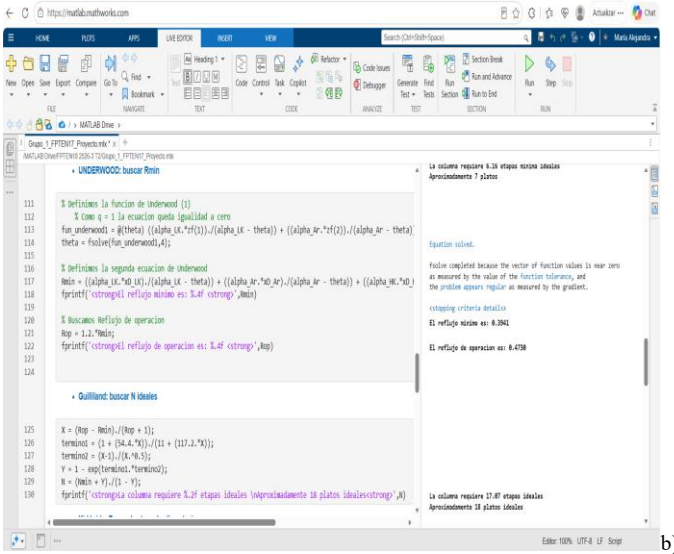
3) *Reconocimiento de oportunidades de mejora y emprendimiento basado en capacidades:* dado que la contextualización tecno-económica fue el punto con mayor margen de mejora en las rúbricas evaluadas (18.2% insatisfactorio en la definición del problema), se deben abordar estas brechas con el fin de fortalecer la capacidad de los futuros ingenieros para evaluar proyectos desde el emprendimiento industrial responsable y el desarrollo regional, garantizando que el diseño de procesos no solo sea técnicamente factible, sino económicamente viable y socialmente sostenible (alineado con los ODS 7, 8, 9, 12 y 13).

E. Evidencias del proceso

En el desarrollo del proyecto, los estudiantes emplearon herramientas como Excel y Matlab para realizar los cálculos asociados al método FUG, tal como puede apreciarse en la Fig. 5.



a)

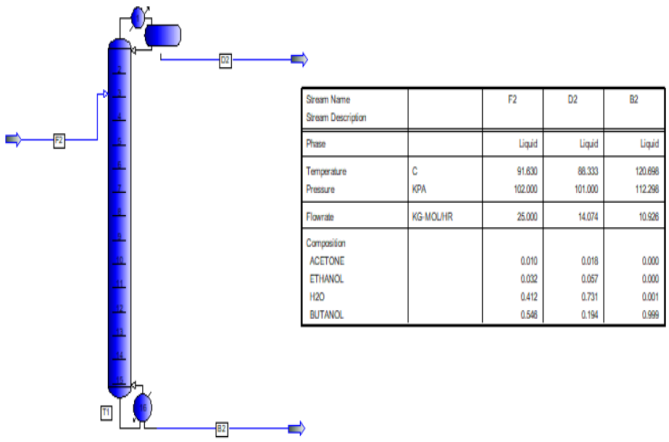


b)

Fig. 5. Cálculos para la aplicación del método FUG. a) Excel (G6). b) Matlab (G1).

En relación con las herramientas empleadas (Excel/Matlab) para el proyecto, se puede afirmar que los estudiantes tienen un buen dominio de estas.

En este mismo orden de ideas, el uso de la simulación con el programa de PRO/II fue otra herramienta importante para el análisis del proceso de destilación en el proyecto. En la Fig. 6, se aprecia parte de esta la simulación.



Stream Name / Stream Description		F2	D2	B2
Phase		Liquid	Liquid	Liquid
Temperature	C	91.630	88.333	120.698
Pressure	KPA	102.000	101.000	112.298
Flowrate	KG-MOL/HR	25.000	14.074	10.926
Composition				
ACETONE		0.010	0.018	0.000
ETHANOL		0.032	0.057	0.000
H2O		0.412	0.731	0.001
BUTANOL		0.546	0.194	0.999

Fig. 6. Simulación rigurosa en PRO/II (G6: Concentración de biobutanol).

Se identificó que, en el uso del simulador los grupos lograron un desempeño muy bueno en la simulación rigurosa con PRO/II. Esta herramienta fue clave para que los estudiantes superaran las limitaciones del método analítico de FUG, permitiéndoles emplear modelos termodinámicos avanzados y realizar dimensionamientos reales con criterio profesional.

Las evidencias recolectadas en los portafolios (memorias en Excel/Matlab y archivos de simulación) demuestran que la combinación de cálculo y simulación rigurosa fortalece el

aprendizaje profundo y la autonomía técnica, permitiendo a los estudiantes validar hipótesis y explorar alternativas de diseño en tiempo real.

Desde la perspectiva de la innovación educativa, los hallazgos principales de este estudio se resumen a continuación.

1) Cambio de paradigma instruccional, donde el enfoque integrado logró desplazar la enseñanza tradicional centrada en el cálculo algebraico repetitivo hacia una dinámica de aprendizaje activo centrada en el estudiante. Al asumir proyectos industriales reales, los estudiantes pasaron de ser ejecutores de algoritmos manuales a tomadores de decisiones de diseño con criterio técnico y económico.
2) Desarrollo de pensamiento crítico e integrador, ya que la confrontación sistemática entre el método aproximado FUG y la simulación rigurosa en PRO/II permitió a los estudiantes desarrollar una sólida capacidad para cuestionar premisas de idealidad, interpretar desviaciones termodinámicas complejas y seleccionar adecuadamente modelos termodinámicos.
3) Formación integral en sostenibilidad y mercado laboral, debido a la inclusión en la investigación de procesos reales y el análisis de impacto ambiental en la rúbrica, lo que reforzó la conciencia ética y técnica del estudiante sobre la eficiencia energética, la minimización de emisiones de CO_2 y el cumplimiento normativo (alineado a los ODS 4, 7, 9 y 12), atendiendo directamente a las demandas del sector productivo.
4) Transferibilidad de la metodología, ya que el diseño instruccional estructurado en fases (selección, cálculo manual, simulación, dimensionamiento y hoja de especificación) demuestra ser escalable y transferible a otras asignaturas de las operaciones unitarias y el diseño de reactores en Ingeniería Química.

Como oportunidades de mejora instruccional, se identificó la necesidad de ampliar las sesiones previas de nivelación en programación (Matlab/Excel) para optimizar el tiempo dedicado al análisis conceptual, así como reforzar la tutoría en la contextualización tecno-económica del informe técnico desde el inicio del proyecto.

IV. Conclusiones

La experiencia de innovación educativa implementada en la asignatura Procesos de Separación I demuestra que la integración del Aprendizaje Basado en Proyectos (ABP), el marco CDIO y el aula invertida transforma sustancialmente el proceso de enseñanza-aprendizaje en Ingeniería Química, orientándolo hacia la adquisición de competencias profesionales acreditables bajo estándares ABET. Por lo que, la estrategia propuesta constituye un modelo pedagógico efectivo y replicable para elevar la calidad de la educación en ingeniería y formar profesionales altamente competitivos.

Agradecimiento/Reconocimiento

A la Universidad Metropolitana por el financiamiento e impulso a las iniciativas de innovación educativa y actualización tecnológica en la formación de los futuros ingenieros en Venezuela.

Referencias

[1] E. M. Morales-Morgado, S. Ruiz-Torres, and S. Rodero-Cilleros, "Metodologías activas en educación superior, mediadas por tecnologías en diversas disciplinas," Aula, vol. 29, pp. 295-311, 2023.

[2] D. Jiménez Hernández, J. J. González Ortiz, and M. Tornel Abellán, "Metodologías activas en la universidad y su relación con los enfoques de enseñanza," Profesorado. Revista de Currículum y Formación del Profesorado, vol. 24, no. 1, pp. 76-94, 2020.

[3] J. Silva Quiroz and D. Maturana Castillo, "Una propuesta de modelo para introducir metodologías activas en educación superior," Innovación Educativa, vol. 17, no. 73, pp. 117-131, 2017.

[4] O. Pérez, "La influencia de la innovación educativa utilizando las metodologías ABP en la cultura institucional de los posgrados de tres universidades paraguayas," ACADEMO (Asunción), vol. 9, no. 1, pp. 23-37, 2022.

[5] P. Ponsa, B. Amante, et al., "Higher education challenges: introduction of active methodologies in engineering curricula," International Journal of Engineering Education, vol. 25, no. 4, pp. 799-813, 2009.

[6] M. Daher, A. Rosati, et al., "TIC y metodologías activas para promover la educación universitaria integral," Revista electrónica de investigación educativa, vol. 24, e08, 2022.

[7] E. M. Sánchez Fernández, "Nuevas estrategias en el proceso de enseñanza-aprendizaje de la asignatura Experimentación Química II del Grado en Ingeniería Química Industrial," in Monográfico V Jornadas de Formación e Innovación Docente del Profesorado, 2018, pp. 766-783.

[8] F. Barrera, J. Venegas-Muggli, and L. Ibacache, "A Project-Based Learning Approach for Enhancing Learning Skills and Motivation in Software Engineering," in Proc. SIGCSE '20, Portland, OR, 2020.

[9] J. D. Seader, E. J. Henley, and D. K. Roper, Separation Process Principles: Chemical and Biochemical Operations, 3rd ed. John Wiley & Sons, 2010.

[10] P. C. Wankat, Separation Process Engineering: Includes Mass Transfer Analysis, 3rd ed. Prentice Hall, 2012.

[11] C. J. Geankoplis, A. A. Herschel, and D. H. Lepek, Transport Processes and Separation Process Principles, 5th ed. Prentice Hall, 2018.

[12] ABET Engineering Accreditation Commission, "Criteria for Accrediting Engineering Programs, 2024–2025," ABET, Baltimore, MD, 2024.

[13] W. L. McCabe, J. C. Smith, and P. Harriott, Operaciones Unitarias en Ingeniería Química, 7th ed. McGraw-Hill, 2004.

[14] H. Z. Kister, Distillation Design, 1st ed. McGraw-Hill, 1992.

[15] AVEVA Group, AVEVA PRO/II Process Engineering, version 2024. AVEVA, 2024. [Online]. Available: https://www.aveva.com/en/products/pro-ii-process-engineering/

[16] M. Prince, "Does active learning work? A review of the research," Journal of Engineering Education, vol. 93, no. 3, pp. 223-231, 2004.

[17] K. Edström and A. Kolmos, "PBL and CDIO: complementary or competing approaches to engineering education reform?" European Journal of Engineering Education, vol. 39, no. 5, pp. 539-555, 2014.

[18] R. Turton, J. A. Shaeiwitz, D. Bhattacharyya, and W. B. Whiting, Analysis, Synthesis, and Design of Chemical Processes, 5th ed. Boston, MA: Pearson Education, 2018.

[19] G. M. Kontogeorgis and G. K. Folas, Thermodynamic Models for Industrial Applications: From Classical and Advanced Mix Rules to Association Theories. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2010.

[20] W. L. Luyben, Distillation Design and Control Using Aspen Simulation, 2nd ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2013.

[21] E. C. Carlson, "Don't gamble with physical properties for simulations," Chemical Engineering Progress, vol. 92, no. 10, pp. 35-46, 1996.

[22] D. Y. Peng and D. B. Robinson, "A New Two-Constant Equation of State," Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals, vol. 15, no. 1, pp. 59-64, 1976.

[23] R. Smith, Chemical Process Design and Integration, 2nd ed. John Wiley & Sons, 2016.
[24] J. Segalàs, D. Ferrer-Balas, and K. F. Mulder, "What do engineering students learn in sustainability courses? The effect of the pedagogical approach," Journal of Cleaner Production, vol. 18, no. 3, pp. 275-284, 2010.