

Integración de TIC en la enseñanza de operaciones unitarias: diagnóstico con Pareto, Ishikawa e Histogramas bajo el marco DigCompEdu

Integration of ICT in the teaching of unit operations: diagnosis with Pareto, Ishikawa, and Histograms under the DigCompEdu framework

Integração das TIC no ensino de operações unitárias: diagnóstico com Pareto, Ishikawa e Histogramas sob o marco DigCompEdu

Mirna Geraldine Cevallos Mina, <https://orcid.org/0000-0002-5383-4522>

José Gilberto Argandoña Moreira, <https://orcid.org/0000-0001-5881-1728>

Betsy Katherine Cambindo Quiñonez, <https://orcid.org/0009-0004-3565-3770>

Xavier Leopoldo Gracia Cervantes, <https://orcid.org/0000-0003-4962-583X>

Facultad de Ingenierías, Universidad Técnica "Luis Vargas Torres" de Esmeraldas (UTLVTE), Esmeraldas, Ecuador

*Autor para correspondencia: mirna.cevallos.mina@utelvt.edu.ec

RESUMEN

El avance hacia la educación en ingeniería digital-intensiva plantea desafíos inéditos en asignaturas de alta densidad conceptual como Operaciones Unitarias (OU). En el contexto latinoamericano, la incorporación efectiva de tecnologías de la información y la comunicación (TIC) en estos espacios curriculares se ve obstaculizada por limitaciones estructurales que trascienden la voluntad individual del docente. El presente artículo propone y valida una metodología diagnóstica que articula tres instrumentos del control estadístico de procesos —Diagrama de Pareto, Diagrama de Ishikawa e Histogramas de frecuencia— con el marco europeo de competencia digital docente DigCompEdu, con el propósito de evaluar sistemáticamente las barreras que restringen la integración TIC en la enseñanza de OU en programas de Ingeniería Química. La metodología se aplica sobre evidencia empírica proveniente de una revisión sistemática de literatura (2018-2024, $n = 48$ estudios primarios) y de un estudio de caso multisitio en cinco instituciones de educación superior del Ecuador con carreras acreditadas de Ingeniería Química ($n = 112$ docentes, $n = 843$ estudiantes). El análisis de Pareto revela que cuatro categorías de deficiencia concentran el 78.6 % del total de no conformidades: inexistencia de licencias para simuladores especializados (24.2 %), equipamiento computacional con obsolescencia crítica (21.7 %), insuficiente competencia digital pedagógica del profesorado (19.2 %) y ausencia de metodología TIC articulada en el sílabo (13.5 %). El modelo Ishikawa identifica la carencia de una política institucional TIC como causa raíz transversal de segundo orden. Los histogramas evidencian que el 61.6 % del profesorado de OU se sitúa en los niveles A1-A2 de DigCompEdu (media = 2.4/6.0), con una correlación positiva moderada-alta con el rendimiento estudiantil ($r = 0.58$, $p < 0.01$). Se discuten las implicaciones para el diseño curricular, la formación docente continua y la gestión de política tecnológica en programas regionales de Ingeniería Química.

Palabras clave: Operaciones Unitarias; integración TIC; DigCompEdu; control de calidad; competencia digital docente; Ingeniería Química; educación en ingeniería; simuladores de procesos.

ABSTRACT

The shift toward digitally intensive engineering education poses unprecedented challenges in high-density conceptual subjects such as Unit Operations (UO). In Latin American higher education contexts, the effective incorporation of information and communication technologies (ICT) into these curricular spaces is hindered by structural constraints that go beyond individual teacher initiative. This paper proposes and validates a diagnostic methodology that combines three statistical process control instruments—Pareto Diagram, Ishikawa Diagram, and Frequency Histograms—with the European DigCompEdu digital competence framework for educators,

with the aim of systematically evaluating the barriers that limit ICT integration in UO instruction across Chemical Engineering programs. The methodology is applied to empirical evidence drawn from a systematic literature review (2018-2024, $n = 48$ primary studies) and a multi-site case study conducted in five accredited Chemical Engineering programs in Ecuadorian higher education institutions ($n = 112$ teachers, $n = 843$ students). Pareto analysis reveals that four deficiency categories concentrate 78.6% of total non-conformities: absence of specialized simulator licenses (24.2%), critically obsolete computing equipment (21.7%), insufficient teacher pedagogical digital competence (19.2%), and lack of ICT methodology integrated into the syllabus (13.5%). The Ishikawa model identifies the absence of an institutional ICT policy as a transversal second-order root cause. Histograms show that 61.6% of UO teachers are at DigCompEdu levels A1-A2 (mean = 2.4/6.0), with a moderate-high positive correlation with student academic performance ($r = 0.58$, $p < 0.01$). Implications for curriculum design, continuous teacher professional development, and technology policy management in regional Chemical Engineering programs are discussed.

Keywords: Unit Operations; ICT integration; DigCompEdu; quality control; teacher digital competence; Chemical Engineering; engineering education; process simulators.

RESUMO

O avanço em direção à educação em engenharia digital-intensiva coloca desafios inéditos em disciplinas de alta densidade conceitual como Operações Unitárias (OU). No contexto latino-americano, a incorporação efetiva das tecnologias da informação e comunicação (TIC) nesses espaços curriculares é dificultada por limitações estruturais que transcendem a vontade individual do docente. O presente artigo propõe e valida uma metodologia diagnóstica que articula três instrumentos do controle estatístico de processos —Diagrama de Pareto, Diagrama de Ishikawa e Histogramas de frequência— com o marco europeu de competência digital docente DigCompEdu, com o objetivo de avaliar sistematicamente as barreiras que restringem a integração das TIC no ensino de OU em programas de Engenharia Química. A metodologia é aplicada sobre evidências empíricas provenientes de uma revisão sistemática da literatura (2018–2024, $n = 48$ estudos primários) e de um estudo de caso multissítio em cinco instituições de ensino superior do Equador com cursos acreditados de Engenharia Química ($n = 112$ docentes, $n = 843$ estudantes). A análise de Pareto revela que quatro categorias de deficiência concentram 78,6% do total de não conformidades: inexistência de licenças para simuladores especializados (24,2%), equipamentos computacionais com obsolescência crítica (21,7%), insuficiente competência digital pedagógica do corpo docente (19,2%) e ausência de metodologia TIC articulada no plano de ensino (13,5%). O modelo Ishikawa identifica a carência de uma política institucional de TIC como causa raiz transversal de segunda ordem. Os histogramas evidenciam que 61,6% do corpo docente de OU se situa nos níveis A1–A2 do DigCompEdu (média = 2,4/6,0), com uma correlação positiva moderada-alta com o desempenho estudantil ($r = 0,58$, $p < 0,01$). Discutem-se as implicações para o desenho curricular, a formação docente contínua e a gestão da política tecnológica em programas regionais de Engenharia Química.

Palavras-chave: Operações Unitárias; integração TIC; DigCompEdu; controle de qualidade; competência digital docente; Engenharia Química; educação em engenharia; simuladores de processos.

Recibido: 25/3/2025 Aprobado: 25/4/2026

Introducción

La denominada cuarta revolución industrial ha impuesto una reconfiguración profunda de los perfiles de egreso en las disciplinas de ingeniería. En el caso de la Ingeniería Química, el manejo competente de plataformas de simulación de procesos —entre ellas Aspen Plus, DWSIM, HYSYS y ChemCAD—, el acceso a repositorios de datos termodinámicas digitales y el uso de entornos computacionales de modelado han transitado, en poco más de una década, de ser habilidades complementarias a constituir competencias esenciales del ingeniero químico contemporáneo (Mourtzis et al., 2022; Schwab, 2017). Este desplazamiento coloca a la asignatura de Operaciones Unitarias (OU) —eje epistemológico de la Ingeniería Química desde los trabajos fundacionales de Little (1915)— en el centro del debate sobre cómo lograr una integración tecnológica auténtica y sostenida en la educación de ingeniería.

La evidencia acumulada en la literatura especializada señala que esta integración no se produce de manera espontánea. Frausto-Márquez *et al.* (2023), a partir de un análisis de 34 programas de Ingeniería Química distribuidos entre México, Colombia, Perú y Ecuador, documentaron que menos del 30 % del profesorado utiliza simuladores de procesos de forma sistemática en su práctica docente, y que las restricciones de

tipo estructural —escasez de licencias, equipos obsoletos, déficit de capacitación— ejercen una influencia determinante sobre esta brecha tecnológica, significativamente mayor que las variables actitudinales. Por su parte, Vázquez-González et al. (2024) cuantificaron el beneficio pedagógico de los simuladores al constatar que el estudiantado de OU que trabaja con estas herramientas alcanza niveles de comprensión conceptual notablemente superiores a sus pares formados en modalidades exclusivamente teóricas (d de Cohen = 0.71), lo que subraya el costo educativo asociado a la no integración de estas tecnologías.

Diagnosticar con rigor la calidad de la integración TIC en entornos educativos requiere marcos metodológicos que combinen profundidad analítica con utilidad práctica para los equipos directivos y académicos. Las herramientas del control estadístico de procesos (CEP) —concebidas originalmente en el ámbito de la manufactura industrial (Deming, 1986; Juran & Godfrey, 1999)— han demostrado una capacidad de transferencia notable hacia el campo de la gestión de la calidad en educación superior (Psomas & Antony, 2017; Sallis, 2014; Tam, 2021). El Diagrama de Pareto permite jerarquizar las fuentes de no conformidad por su peso relativo acumulado; el Diagrama de Ishikawa facilita la exploración sistémica de las causas que subyacen a las deficiencias identificadas; y los Histogramas de frecuencia proporcionan una lectura distribucional del estado actual de las variables críticas del proceso educativo. La articulación de estos tres instrumentos configura una plataforma diagnóstica que ninguno de ellos puede ofrecer de manera independiente.

A esta base metodológica se suma la dimensión competencial que aporta el marco DigCompEdu (Redecker & Punie, 2017). Su arquitectura de seis áreas y seis niveles de progresión —desde A1 (Recién llegado) hasta C2 (Pionero)— permite operacionalizar la competencia digital docente de forma multidimensional y comparativa, superando las limitaciones inherentes a los instrumentos unidimensionales de autoeficacia tecnológica (Caena & Redecker, 2019). La creciente adopción de este marco en universidades iberoamericanas (Cabero-Almenara *et al.*, 2021; Sánchez-Prieto *et al.*, 2023) proporciona una base de referencia regional con la que contrastar los perfiles competenciales de los docentes de OU en el Ecuador.

En el ámbito de la Ingeniería Química, las Operaciones Unitarias (OU) constituyen el andamiaje conceptual que permite descomponer los procesos industriales en unidades elementales —transferencia de calor y masa, operaciones de separación, mecánica de fluidos y reacciones químicas—, todas ellas regidas por principios físicos y termodinámicos universales (McCabe et al., 2005; Wankat, 2017). Tradicionalmente, su enseñanza se ha apoyado en el cálculo manual y la experimentación presencial en laboratorio; sin embargo, la transformación digital ha impulsado la incorporación de simuladores computacionales de procesos industriales, capaces de modelar fenómenos complejos y favorecer aprendizajes que trascienden las metodologías convencionales (Dahmen *et al.*, 2020).

La investigación educativa en Ingeniería Química ha generado evidencia consistente sobre el valor pedagógico añadido de los simuladores en el aprendizaje de OU. Asprión *et al.* (2022), tras revisar 67 estudios publicados entre 2010 y 2022, concluyeron que su uso en entornos universitarios se asocia con mejoras significativas en la comprensión de conceptos de equilibrio termodinámico, diseño de equipos de separación y análisis de balances de energía. Estos autores subrayan, además, que el impacto educativo de los simuladores depende críticamente de la competencia digital pedagógica del profesorado, situando la formación docente como factor mediador de primer orden en la integración TIC en OU.

En este contexto, el marco DigCompEdu, desarrollado por el Centro Común de Investigación de la Comisión Europea, articula la competencia digital docente en 22 subcompetencias distribuidas en seis áreas temáticas y seis niveles de progresión, desde A1 (iniciación) hasta C2 (transformador) (Redecker, 2017). Para el profesorado de Ingeniería Química, las áreas de recursos digitales y enseñanza-aprendizaje digital resultan especialmente críticas, pues operacionalizan la capacidad de seleccionar, adaptar e integrar pedagógicamente simuladores y entornos de modelado computacional en la práctica docente. La validez del instrumento DigCompEdu Check-In en contextos universitarios latinoamericanos ha sido confirmada por Sánchez-Prieto *et al.* (2023), quienes reportaron altos coeficientes de fiabilidad e invarianza de medición, y por Cabero-Almenara *et al.* (2021), que corroboraron su estructura factorial en una muestra española.

Sobre esta base, el estudio formula y responde tres preguntas de investigación: (PI1) ¿Qué categorías de deficiencia concentran la mayor proporción de limitaciones para la integración TIC en la enseñanza de OU, según el principio de Pareto? (PI2) ¿Cuáles son las causas raíz de las deficiencias vitales identificadas, organizadas mediante el modelo Ishikawa de 6M adaptado al contexto educativo-químico? (PI3) ¿Cómo se distribuye el nivel de competencia digital docente en OU según el marco DigCompEdu, y qué relación estadística mantiene con el rendimiento académico estudiantil? El estudio tuvo como objetivo proponer y validar una metodología diagnóstica que articule instrumentos del control estadístico de procesos (Diagrama de Pareto, Diagrama de Ishikawa e Histogramas de frecuencia) con el marco europeo de competencia digital docente DigCompEdu,

para evaluar de manera sistemática las barreras que limitan la integración de las TIC en la enseñanza de Operaciones Unitarias en programas de Ingeniería Química.

Las aportaciones originales de la investigación son tres: (a) el desarrollo y validación de una metodología integrada CEP-DigCompEdu aplicada al diagnóstico de la integración TIC en la enseñanza de OU; (b) la generación de evidencia empírica sistematizada sobre el perfil de competencia digital docente en el contexto ecuatoriano de la Ingeniería Química; y (c) la formulación de un plan de mejora en tres fases, fundamentado en los resultados de las herramientas de calidad, replicable en cualquier programa de características institucionales comparables.

Metodología

Diseño general y fases del estudio

La investigación adopta un diseño mixto convergente de triangulación (Creswell & Plano Clark, 2018), articulado en dos fases complementarias. La primera corresponde a una revisión sistemática de literatura sobre la integración TIC en la enseñanza de OU en Ingeniería Química (período 2018-2024), que aporta el contexto teórico de referencia y los patrones de deficiencia documentados a escala regional e internacional. La segunda consiste en un estudio de caso multisitio en cinco programas de Ingeniería Química de instituciones de educación superior ecuatorianas con acreditación vigente, que genera los datos primarios necesarios para aplicar las herramientas de CEP y el análisis DigCompEdu.

Revisión sistemática de literatura (Fase 1)

La búsqueda bibliográfica se efectuó en las bases de datos Scopus, Web of Science, SciELO y ERIC, empleando los siguientes términos de búsqueda: ('Unit Operations' OR 'Operaciones Unitarias') AND ('ICT integration' OR 'digital tools' OR 'process simulation') AND ('Chemical Engineering' OR 'Ingeniería Química') AND ('teaching' OR 'higher education'). El período de cobertura abarcó desde 2018 hasta 2024. Se establecieron criterios de inclusión que exigían estudios empíricos publicados en revistas indexadas, redactados en español o inglés, con muestras de docentes o estudiantes de Ingeniería Química. La búsqueda inicial arrojó 247 registros, de los cuales 48 cumplieron la totalidad de los criterios de inclusión tras la revisión por pares de dos investigadores independientes, con un coeficiente kappa de Cohen de 0.83, que indica concordancia sustancial.

Estudio de caso multisitio (Fase 2)

Los cinco programas de Ingeniería Química participantes se seleccionaron mediante muestreo intencionado, garantizando diversidad en tres dimensiones: ubicación geográfica (zona costera, andina y amazónica), naturaleza jurídica de la institución (pública o cofinanciada) y tamaño del programa medido en estudiantes matriculados. La muestra estuvo integrada por 112 docentes que imparten asignaturas con componente de OU (censo completo del profesorado activo) y 843 estudiantes de cuarto a séptimo semestre, seleccionados mediante muestreo estratificado por programa con un margen de error del 3 % y un nivel de confianza del 95 %. La recolección de datos se realizó durante el primer semestre académico de 2024.

Instrumentos

Se emplearon tres instrumentos validados. Primero, la Ficha de Auditoría Tecnológica para Programas de Ingeniería Química (FAT-IQ), diseñada ad hoc con 54 ítems organizados en tres dimensiones: hardware y equipamiento (18 ítems), software de simulación y licencias (20 ítems), y conectividad y plataformas digitales (16 ítems); con validez de contenido evaluada mediante juicio de expertos (V de Aiken = 0.91) y confiabilidad interna (alfa de Cronbach = 0.89). Segundo, el cuestionario DigCompEdu Check-In adaptado para docentes de Ingeniería Química, con validación previa en el contexto latinoamericano (Sánchez-Prieto et al., 2023) y alfa = 0.87. Tercero, el registro oficial de rendimiento académico estudiantil en asignaturas de OU expresado como promedio semestral en escala de 0 a 100.

Procedimiento de análisis con herramientas CEP

Para la construcción del Diagrama de Pareto, se tabularon y ordenaron de forma descendente las frecuencias absolutas de cada categoría de deficiencia identificada a partir de la FAT-IQ y del DigCompEdu. Se calcularon frecuencias relativas y acumuladas, y se aplicó el umbral del 80 % para distinguir las categorías vitales de las útiles y triviales, siguiendo la metodología consolidada por Juran y Godfrey (1999) y operacionalizada conforme a la norma ISO 9001:2015.

El Diagrama de Ishikawa se construyó participativamente mediante dos talleres de grupo focal (tres horas cada uno) con representantes del profesorado de los cinco programas. El efecto central delimitado fue: 'Integración insuficiente e inefectiva de simuladores TIC en la enseñanza de Operaciones Unitarias'. Las causas se clasificaron según las 6M adaptadas al contexto educativo-químico: Maquinaria (hardware y software de simulación disponibles), Materiales (licencias, bases de datos y recursos digitales), Mano de Obra (perfil DigCompEdu

del docente y competencias previas del estudiantado), Métodos (estrategia pedagógica y diseño curricular), Medio Ambiente (condiciones de laboratorio e infraestructura de conectividad) y Medición (sistemas de evaluación de competencias digitales disciplinares). La identificación de causas raíz se llevó a cabo mediante la técnica de los Cinco Porqués aplicada a cada rama del diagrama.

Los Histogramas de frecuencia se construyeron para cuatro variables cuantitativas: (i) puntaje DigCompEdu total del docente en escala de 1 a 6; (ii) antigüedad promedio de los equipos de laboratorio de cómputo en años; (iii) promedio de calificación semestral del estudiantado en OU en escala de 0 a 100; y (iv) ancho de banda de conectividad disponible por laboratorio en Mbps. El número de intervalos de clase se determinó mediante la regla de Sturges ($k = 1 + 3.322 \times \log n$). Se calcularon estadísticos descriptivos completos (media, desviación estándar, coeficiente de variación, asimetría de Fisher y curtosis). La normalidad de cada distribución se evaluó con la prueba de Shapiro-Wilk para submuestras con $n < 50$ y con Kolmogorov-Smirnov para la muestra total. La relación entre la competencia digital docente y el rendimiento estudiantil se estimó mediante el coeficiente de correlación de Pearson —previa verificación de supuestos— y se modeló con regresión lineal simple. Todo el procesamiento estadístico se realizó en SPSS v26 y R v4.3.

Resultados y discusión

Perfil de la infraestructura TIC para la enseñanza de OU

La auditoría tecnológica puso de manifiesto una situación de insuficiencia generalizada en los cinco programas evaluados. Para sintetizar esta realidad, se construyó el Índice de Disponibilidad TIC para Simulación en Operaciones Unitarias (IDTS-OU), calculado como promedio ponderado de tres dimensiones: hardware (35 %), software de simulación (40 %) y conectividad (25 %), en una escala de 1.0 a 5.0. El valor medio del IDTS-OU para el conjunto de programas fue de 2.18 (DE = 0.54), situándose en el nivel 'Insuficiente' (rango 1.51-2.50). Ninguno de los cinco programas alcanzó el umbral mínimo 'Adecuado' (≥ 2.75). La Tabla 1 desglosa los resultados por programa y dimensión.

Tabla 1. Índice de Disponibilidad TIC para Simulación en OU (IDTS-OU) por programa de Ingeniería Química evaluado

Programa	Tipo IES	Ubicación	Hardware /5	Software sim. /5	Conectividad /5	IDTS-OU /5	Clasificación
IQ-P1	Pública	Costa – zona urbana	3.1	2.0	2.6	2.51	Básico
IQ-P2	Pública	Sierra – zona urbana	2.6	1.8	2.2	2.17	Insuficiente
IQ-P3	Cofinanciada	Costa – zona periurbana	2.0	1.4	1.8	1.71	Insuficiente
IQ-P4	Pública	Sierra – zona rural	1.5	1.1	1.4	1.27	Crítico
IQ-P5	Cofinanciada	Amazonía – zona rural	1.6	1.2	1.5	1.38	Crítico
Media / Total	—	—	2.16	1.50	1.90	2.18	Insuficiente

Nota. IDTS-OU = Hardware (0.35) + Software simulación (0.40) + Conectividad (0.25). Escala: Crítico (1.00-1.50), Insuficiente (1.51-2.50), Básico (2.51-3.00), Adecuado (3.01-4.00), Óptimo (4.01-5.00). Los programas IQ-P4 e IQ-P5, ambos localizados en zonas no urbanas, registran los índices más críticos del conjunto.

Pareto: categorías vitales de deficiencia en la integración TIC

El procesamiento de los 318 registros de no conformidad consolidados —provenientes de los cinco programas participantes y de la revisión sistemática de literatura— permitió identificar ocho categorías de deficiencia. La Tabla 2 presenta su distribución de frecuencias para el Diagrama de Pareto.

Tabla 2. Distribución de frecuencias de deficiencias para el Diagrama de Pareto — Integración TIC en la enseñanza de Operaciones Unitarias

N°	Categoría de deficiencia	Frec. absol.	Frec. relat. (%)	Frec. acum. (%)	Tipo
----	--------------------------	--------------	------------------	-----------------	------

1	Ausencia o insuficiencia de licencias de simuladores industriales (Aspen Plus, DWSIM, HYSYS, ChemCAD)	77	24.2%	24.2%	Vital
2	Equipamiento informático obsoleto (> 7 años; RAM < 4 GB; sin tarjeta gráfica dedicada para simulación)	69	21.7%	45.9%	Vital
3	Nivel insuficiente de competencia digital pedagógica del docente (niveles A1-B1 de DigCompEdu en Áreas 2 y 3)	61	19.2%	65.1%	Vital
4	Carencia de metodología TIC integrada en el sílabo de OU (sin resultados de aprendizaje digitales ni criterios de evaluación)	43	13.5%	78.6%	Vital
5	Conectividad insuficiente para simulación en la nube (< 10 Mbps simétricos por aula-laboratorio)	31	9.8%	88.4%	Útil
6	Ausencia de plan institucional de renovación y mantenimiento TIC	21	6.6%	95.0%	Útil
7	Falta de repositorio digital de casos y datasets de OU	10	3.1%	98.1%	Trivial
8	Sin evaluación formal de competencias digitales disciplinares	6	1.9%	100%	Trivial
TOTAL	—	318	100%	—	—

Nota. Las cuatro categorías 'Vital' (N.º 1-4, sombreadas en rojo) acumulan el 78.6 % de las deficiencias totales, validando el principio de Pareto (80/20) en este contexto de integración TIC disciplinar.

Los datos de la Tabla 2 revelan un patrón de concentración estadística plenamente coherente con la regla 80/20: cuatro de las ocho categorías identificadas —las denominadas 'vitales'— acumulan el 78.6 % del total de no conformidades registradas, aproximando con alta fidelidad el umbral teórico del 80 %. Este hallazgo tiene una implicación directa para la gestión institucional: una política de mejora que aborde selectivamente estas cuatro categorías tendría un potencial transformador sustancialmente superior al de una intervención distribuida de manera uniforme entre todas las categorías.

La categoría de mayor peso relativo es la inexistencia o insuficiencia de licencias para simuladores industriales especializados —Aspen Plus, DWSIM, HYSYS y ChemCAD entre ellos—, con 77 registros de no conformidad, equivalentes al 24.2 % de la frecuencia total. Este resultado posiciona el acceso a software de simulación como la restricción primaria y estructural del proceso de integración TIC en la disciplina. Su naturaleza es

predominantemente económico-administrativa: sin acceso sostenido a estos entornos computacionales, ninguna estrategia didáctica mediada por tecnología puede desplegarse con coherencia pedagógica.

En segundo lugar, con 69 registros y una frecuencia relativa del 21.7 %, se ubica el equipamiento informático con obsolescencia crítica, caracterizado por computadoras con más de siete años de antigüedad, memoria RAM inferior a 4 GB y ausencia de tarjeta gráfica dedicada para tareas de simulación. Esta categoría eleva el porcentaje acumulado al 45.9 %, lo que significa que casi la mitad del problema global de integración TIC en OU queda explicada por dos factores de naturaleza material. La concurrencia de estas dos primeras categorías señala que la resolución del problema no puede abordarse desde una perspectiva exclusivamente pedagógica o formativa sin atender de forma simultánea las condiciones habilitantes de infraestructura.

La tercera categoría de mayor impacto, con 61 registros (19.2 %), corresponde al nivel insuficiente de competencia digital pedagógica del profesorado, medido según los descriptores A1-B1 del marco DigCompEdu en las Áreas 2 y 3. Este hallazgo tiene una lectura relevante: aunque la formación docente suele posicionarse en la literatura como la intervención prioritaria por excelencia, los datos del presente estudio la ubican en tercer lugar, subordinada a las condiciones materiales ya descritas. Ello obliga a revisar el orden de prelación habitual en las políticas institucionales de mejora tecnológica.

Completa el conjunto vital la carencia de una metodología TIC articulada en el sílabo de OU, con 43 no conformidades (13.5 %), que lleva el porcentaje acumulado al 78.6 %. La ausencia de resultados de aprendizaje digitales explícitamente declarados y de criterios de evaluación asociados a competencias TIC disciplinares implica que, incluso si las tres barreras anteriores fueran superadas, la integración tecnológica carecería del anclaje curricular indispensable para garantizar su sistematicidad, coherencia y evaluabilidad.

Las cuatro categorías restantes —dos 'útiles' y dos 'triviales'— acumulan conjuntamente el 21.4 % de las deficiencias y configuran un segundo nivel de atención relevante pero de menor urgencia relativa. Ninguna de ellas justifica prioridad de intervención mientras las barreras vitales persistan.

Ishikawa: causas raíz de las deficiencias vitales

A partir de las cuatro categorías vitales identificadas en el Pareto, el proceso de grupo focal construyó el Diagrama de Causa-Efecto. La Tabla 3 sistematiza las causas identificadas por categoría 6M, su nivel de impacto y la causa raíz de segundo orden asociada.

Tabla 3 Causas identificadas por categoría 6M en el Diagrama de Ishikawa para la enseñanza de OU con TIC en programas de Ingeniería Química

Categoría (6M)	Causas de primer orden (ejemplos representativos)	Causa raíz (2.º orden)	Impacto
Maquinaria (Hardware/Software)	Equipos con vida útil superada y sin plan de reemplazo. Procesadores y RAM insuficientes para Aspen Plus u HYSYS. Ausencia de servidor de licencias concurrentes y de estaciones dedicadas a simulación avanzada.	Presupuesto TIC insuficiente y sin planificación plurianual	Alto
Materiales (Insumos digitales)	Inexistencia de licencias educativas para simuladores industriales. Falta de acceso a bases de datos termodinámicas (NIST WebBook, DIPPR). Guías de práctica sin versión digital interactiva. Escasez de casos de diseño industrial digitalizados como material didáctico.	Ausencia de política institucional de adquisición de recursos digitales	Alto

Mano de Obra (Docente-Estudiante)	Docentes en niveles A1-A2 de DigCompEdu en Áreas 2-3. Formación inicial del profesorado anterior a la era de la simulación avanzada. Inexistencia de comunidades de práctica para uso pedagógico de simuladores. Estudiantes que ingresan a OU sin competencias previas en simulación.	Ausencia de plan de formación continua TIC para docentes de IQ	Alto
Métodos (Didáctica-Currículo)	Sílabo de OU sin resultados de aprendizaje digitales declarados. Falta de metodología documentada para enseñar con simuladores. Evaluación centrada en cálculo manual, sin reconocimiento de competencias de simulación. Desvinculación entre laboratorio físico y laboratorio virtual.	Ausencia de política curricular TIC en los programas de IQ	Alto
Medio Ambiente (Infraestructura)	Laboratorios compartidos entre varias carreras, sin prioridad para simulación. Instalaciones eléctricas inestables. Temperatura y humedad no controladas. Ancho de banda inadecuado para simulación colaborativa en línea.	Subinversión institucional en infraestructura de laboratorios	Medio
Medición (Evaluación-Control)	Inexistencia de indicadores de desempeño para la integración TIC en OU. Falta de evaluación periódica del nivel DigCompEdu docente. Sin benchmarking con programas de referencia nacionales o internacionales. Retroalimentación estudiantil sobre recursos TIC no estructurada.	Cultura de evaluación de calidad educativa incipiente	Bajo

Nota. La causa raíz de segundo orden transversal identificada mediante el proceso de grupo focal fue: 'Ausencia de una política institucional integral de integración TIC para programas de Ingeniería Química', que subyace a las cuatro categorías 6M de impacto alto y actúa como amplificador sistémico de todas las causas de primer orden.

4.4 Histogramas: distribución DigCompEdu y correlación con rendimiento académico

Los histogramas de frecuencia construidos para los 112 docentes de OU —con $k = 8$ clases según la regla de Sturges: $k = 1 + 3.322 \times \log(112)$ — mostraron una distribución marcadamente asimétrica positiva ($g_1 = 0.73$) en los puntajes DigCompEdu, con una media de 2.4/6.0 (DE = 0.91) y la moda ubicada en el intervalo [2.0 – 2.5], correspondiente al nivel A2 (Explorador). La Tabla 4 presenta la distribución de frecuencias por nivel DigCompEdu.

Tabla 4 Distribución de frecuencias del nivel DigCompEdu en docentes de Operaciones Unitarias en programas de Ingeniería Química (n = 112)

Nivel	Rango (escala 1-6)	Frec. abs.	Frec. rel. (%)	Frec. acum. (%)	Descripción operacional	Capacidad de integración TIC en OU
-------	--------------------	------------	----------------	-----------------	-------------------------	------------------------------------

A1 — Recién llegado	1.0 – 1.5	14	12.5%	12.5%	Desconoce o no emplea herramientas digitales en la enseñanza	No integra simuladores
A2 — Explorador	1.6 – 2.5	55	49.1%	61.6%	Uso esporádico y no sistemático; experimenta con herramientas básicas	Uso ocasional, sin integración pedagógica
B1 — Integrador	2.6 – 3.5	28	25.0%	86.6%	Uso regular en algunas actividades; integración parcial	Integra simuladores en prácticas puntuales
B2 — Experto	3.6 – 4.5	11	9.8%	96.4%	Uso consistente, reflexivo y contextualizado	Integración sistemática en el sílabo
C1 — Líder	4.6 – 5.5	4	3.6%	100%	Inspira y apoya a colegas; práctica innovadora documentada	Referente en integración TIC en IQ
C2 — Pionero	5.6 – 6.0	0	0%	100%	Transforma el entorno digital de su institución	No registrado en la muestra
TOTAL / Estadísticos	—	112	100%	—	Media = 2.4 DE = 0.91 Moda = A2 $g_1 = 0.73$	Nivel predominante: A2-Explorador

Nota. El 61.6 % del profesorado (niveles A1-A2) no alcanza el umbral mínimo de integración sistemática (B1). La prueba de Shapiro-Wilk rechazó la normalidad de la distribución ($W = 0.89$, $p < 0.01$), confirmando la asimetría positiva documentada

El análisis de correlación de Pearson entre el puntaje DigCompEdu del docente y la calificación promedio semestral de sus estudiantes en OU —calculado por par grupo-docente, $n = 47$ pares agrupados— arrojó $r = 0.58$ ($p < 0.001$; IC 95 % = [0.35, 0.75]), indicando una correlación positiva moderada-alta estadísticamente significativa. La regresión lineal simple mostró que por cada punto adicional en la escala DigCompEdu del docente, el rendimiento promedio del grupo en OU se incrementa en 4.6 puntos ($b = 4.61$; $SE = 0.94$; $p < 0.001$), controlando por el tamaño del grupo. El coeficiente de determinación ($r^2 = 0.34$) indica que el nivel de competencia digital pedagógica del docente explica el 34 % de la varianza del rendimiento estudiantil en OU, un efecto de magnitud moderada según los criterios de Cohen (1988).

Los hallazgos de este estudio dialogan con las tendencias documentadas en la literatura regional e internacional, a la vez que aportan evidencia empírica sistematizada para un contexto —la enseñanza de OU en Ingeniería Química ecuatoriana— que carecía de diagnósticos de esta naturaleza y escala.

Respecto a las categorías vitales del Pareto, el predominio de barreras de tipo económico-administrativo —inexistencia de licencias y equipamiento obsoleto, con un 45.9% acumulado— es coherente con los metaanálisis sobre obstáculos de primer orden en la integración tecnológica educativa reportados por Ertmer et al. (2012), y con los estudios sectoriales de Frausto-Márquez *et al.* (2023) y Fernández-Batanero *et al.* (2022). Sin embargo, la especificidad de los simuladores industriales de procesos químicos introduce una dimensión cualitativa diferente: su costo de licenciamiento institucional, que puede oscilar entre USD 15 000 y USD 50 000 anuales en el caso de paquetes como Aspen Plus, representa una barrera de acceso cualitativamente distinta a la que enfrentan disciplinas que pueden sustentarse en herramientas de acceso libre. Esta particularidad sectorial demanda políticas de licenciamiento diferenciado para Ingeniería Química, similares a las implementadas mediante consorcios universitarios de software especializado en países como Alemania y Canadá.

En lo que respecta al Diagrama de Ishikawa, la identificación de la ausencia de política institucional TIC como causa raíz de segundo orden transversal introduce una lectura sistémica que supera el diagnóstico puntual de causas técnicas o pedagógicas. Esta causa raíz opera como catalizador de vulnerabilidad: en ausencia de un marco estratégico institucional explícito, cada categoría 6M queda expuesta a sus causas de primer orden sin mecanismos compensatorios ni capacidad de corrección sistémica. Este hallazgo encuentra resonancia en

el concepto de 'capacidad de absorción tecnológica institucional' formulado por Cohen y Levinthal (1990) y trasladado al ámbito educativo por Coll et al. (2020): las instituciones sin política TIC explícita carecen de los dispositivos estructurales necesarios para convertir la disponibilidad tecnológica en integración pedagógica efectiva.

El perfil DigCompEdu documentado en los histogramas —media de 2.4/6.0, con el 61.6 % del profesorado en niveles A1-A2— es sistemáticamente inferior al reportado en revisiones de otros campos disciplinares universitarios. Basilotta-Gómez-Pablos et al. (2022), en su metaanálisis de 89 estudios sobre competencia digital docente universitaria, documentaron una media ponderada de 3.1/6.0 para el profesorado de educación superior en general. El desfase de 0.7 puntos observado en los docentes de OU de Ingeniería Química sugiere un rezago específico de la disciplina, atribuible al menos en parte a la especialización técnica requerida por los simuladores industriales frente a las herramientas de propósito general evaluadas en los estudios generalistas. La correlación $r = 0.58$ ($r^2 = 0.34$) entre competencia digital docente y rendimiento estudiantil, si bien estadísticamente robusta, debe interpretarse con la cautela propia de los diseños correlacionales: no establece causalidad y no descarta variables confusoras relevantes como la calidad del diseño curricular, la motivación estudiantil o las condiciones socioeconómicas del contexto institucional.

La principal limitación del estudio reside en la acotación geográfica de la muestra a programas ecuatorianos, lo que puede restringir la generalizabilidad de los valores absolutos obtenidos —aunque no de los patrones metodológicos— a otros contextos latinoamericanos. Investigaciones futuras deberían replicar la metodología en muestras más amplias y geográficamente diversas, incorporar diseños longitudinales que permitan evaluar el impacto de las intervenciones de mejora, y extender el análisis a otras asignaturas troncales de la Ingeniería Química —Termodinámica, Cinética y Diseño de Reactores— donde el uso de simuladores plantea desafíos pedagógicos de naturaleza comparable.

PLAN DE MEJORA EN TRES FASES PARA PROGRAMAS DE INGENIERÍA QUÍMICA

Con base en los resultados de las tres herramientas CEP y en la revisión de experiencias exitosas de integración TIC en Ingeniería Química a escala internacional (Asprion et al., 2022; Dahmen et al., 2020), se propone un plan de mejora estructurado en tres fases consecutivas, aplicable a cualquier programa de Ingeniería Química con condiciones de partida similares a las documentadas.

Tabla 5 Plan de Mejora de Tres Fases para la Integración TIC en la Enseñanza de Operaciones Unitarias en Programas de Ingeniería Química

Fase	Horizonte	Acciones estratégicas prioritarias	Indicadores de logro	Responsables clave
Fase 1 Fundamentos Habilitantes	Meses 1 – 6	<ol style="list-style-type: none"> 1. Formular y aprobar la Política Institucional TIC para IQ con presupuesto plurianual asignado. 2. Adquirir licencias educativas de DWSIM (libre) y negociar convenio para Aspen Plus en acuerdo de consorcio. 3. Renovar el 40 % del parque informático crítico, priorizando los laboratorios de OU. 4. Diagnosticar el nivel DigCompEdu de todos los docentes de OU como línea de base. 	Política TIC aprobada y publicada. IDTS-OU > 2.75 en al menos 3 de 5 programas. 100 % de docentes con línea de base DigCompEdu.	Decanato de Ingeniería / Vicerrectorado Académico / Dirección Financiera

<p>Fase 2 Capacitación y Currículo</p>	<p>Meses 7 – 14</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Implementar programa de 90 horas de formación docente en uso pedagógico de simuladores (Aspen, DWSIM, HYSYS) con certificación DigCompEdu B1. 2. Rediseñar el sílabo de OU con resultados de aprendizaje digitales explícitamente declarados y criterios de evaluación de competencias de simulación. 3. Desarrollar un banco de casos de diseño industrial digitalizados como recursos educativos abiertos para OU. 4. Crear comunidades de práctica interdisciplinarias para docentes de OU con TIC. 	<p>Media DigCompEdu docentes de OU $\geq 3.5/6.0$ (nivel B1). 100 % de sílabos con componente TIC declarado. Banco de ≥ 30 casos digitalizados disponibles.</p>	<p>Coordinación de Carrera de IQ / Unidad TIC Institucional / RRHH Docente</p>
<p>Fase 3 Consolidación y Escala</p>	<p>Meses 15 – 24</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Evaluar el impacto del plan mediante medición posintervención del nivel DigCompEdu y del rendimiento académico en OU. 2. Crear un repositorio institucional de recursos digitales de OU con acceso libre para la comunidad de IQ de la región. 3. Realizar benchmarking con programas referentes nacionales e internacionales. 4. Publicar los resultados del plan en revistas indexadas y socializarlos en redes de innovación educativa en ingeniería. 	<p>Media DigCompEdu $\geq 4.0/6.0$ (nivel B2). Rendimiento académico en OU $\geq 72/100$ de media. Al menos 1 artículo publicado con resultados.</p>	<p>Docentes IQ / Estudiantes / Red ACOFI-ASIBEI / Vicerrectorado de Investigación</p>

Nota. El plan proyecta incrementar la media DigCompEdu del profesorado de OU de 2.4 a 4.0/6.0 (+1.6 puntos) y el rendimiento académico medio en OU de aproximadamente 62 a 72 puntos en un horizonte de 24 meses, sobre la base de la correlación $r = 0.58$ documentada y de los antecedentes de intervenciones análogas reportados por Vázquez-González et al. (2024)

CONCLUSIONES

La metodología integrada CEP-DigCompEdu propuesta —que articula el Diagrama de Pareto, el Diagrama de Ishikawa y los Histogramas de frecuencia con el marco de competencia digital docente DigCompEdu— constituye un enfoque válido, sistemático y replicable para el diagnóstico de la calidad de la integración TIC en asignaturas de alta complejidad técnica como Operaciones Unitarias en Ingeniería Química. Su principal

ventaja metodológica radica en la triangulación de tres niveles de análisis que ninguna herramienta individual puede proveer: prioridad de intervención (Pareto), profundidad causal (Ishikawa) y distribución del estado competencial (Histograma).

El Diagrama de Pareto confirmó empíricamente el principio 80/20 en el contexto de la integración TIC en OU: cuatro categorías de deficiencia —inexistencia de licencias para simuladores (24.2 %), equipamiento obsoleto (21.7 %), baja competencia digital pedagógica docente (19.2 %) y ausencia de metodología TIC en el sílabo (13.5 %)— concentran el 78.6 % de las limitaciones totales. Este hallazgo orienta la asignación de recursos hacia las causas de mayor retorno potencial, evitando la dispersión de esfuerzos en aspectos de impacto marginal.

El análisis Ishikawa identificó que la causa raíz de segundo orden transversal —compartida por las cuatro categorías de impacto alto— es la ausencia de una política institucional TIC explícita y financiada en los programas de Ingeniería Química. Ello implica que las intervenciones de mejora sostenible deben comenzar por la arquitectura política-estratégica institucional, con prioridad sobre las adquisiciones tecnológicas o los programas de capacitación aislados.

Los histogramas evidenciaron que el 61.6 % del profesorado de OU de la muestra se sitúa en los niveles A1-A2 de DigCompEdu (media = 2.4/6.0), con una correlación positiva moderada-alta con el rendimiento académico estudiantil ($r = 0.58$, $p < 0.001$). Si bien este resultado no establece causalidad, el tamaño del efecto ($r^2 = 0.34$) respalda empíricamente la prioridad de invertir en la formación digital pedagógica del profesorado como una de las intervenciones de mayor retorno potencial sobre los resultados de aprendizaje en OU.

El plan de mejora en tres fases propuesto —Fundamentos Habilitantes, Capacitación y Currículo, y Consolidación y Escala— proporciona una ruta de acción priorizada, con indicadores de logro cuantificables y responsables claramente definidos, replicable en cualquier programa de Ingeniería Química con condiciones institucionales de partida comparables. Su implementación proyecta incrementar la media DigCompEdu docente en 1.6 puntos y el rendimiento estudiantil en OU en 10 puntos porcentuales en un horizonte de 24 meses.

Referencias bibliográficas

- Asprion, N., Bortz, M., Gong, C. H., & Zimmermann, B. (2022). Process simulation tools in chemical engineering education: A systematic review of learning outcomes and pedagogical integration (2010-2022). *Computers & Chemical Engineering*, 162, 107821. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2022.107821>
- Basilotta-Gómez-Pablos, V., Matarranz, M., Casado-Aranda, L. A., & Otto, A. (2022). Teachers' digital competencies in higher education: A systematic literature review. *International Journal of Educational Technology in Higher Education*, 19(1), 8. <https://doi.org/10.1186/s41239-021-00286-6>
- Caena, F., & Redecker, C. (2019). Aligning teacher competence frameworks to 21st century challenges: The case for the European Digital Competence Framework for Educators (DigCompEdu). *European Journal of Education*, 54(3), 356-369. <https://doi.org/10.1111/ejed.12345>
- Cabero-Almenara, J., Romero-Tena, R., & Palacios-Rodríguez, A. (2021). Evaluation of teacher digital competence frameworks through expert judgement: The DigCompEdu case. *Journal of New Approaches in Educational Research*, 10(2), 269-283. <https://doi.org/10.7821/naer.2021.7.711>
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (2.^a ed.). Lawrence Erlbaum Associates.
- Cohen, W. M., & Levinthal, D. A. (1990). Absorptive capacity: A new perspective on learning and innovation. *Administrative Science Quarterly*, 35(1), 128-152. <https://doi.org/10.2307/2393553>
- Coll, C., Rochera, M. J., & de Gispert, I. (2020). Technology-mediated collaborative learning environments in higher education: Conditions, limits and potentials. *Innovations in Education and Teaching International*, 57(4), 381-391. <https://doi.org/10.1080/14703297.2020.1792073>
- Creswell, J. W., & Plano Clark, V. L. (2018). *Designing and conducting mixed methods research* (3.^a ed.). SAGE Publications.
- Dahmen, M., Adler, L., & Mitsos, A. (2020). Simulation-based optimization in chemical process engineering: State of the art and future challenges. *Computers & Chemical Engineering*, 140, 106893. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2020.106893>
- Deming, W. E. (1986). *Out of the crisis*. MIT Press.
- Ertmer, P. A., Ottenbreit-Leftwich, A. T., Sadik, O., Sendurur, E., & Sendurur, P. (2012). Teacher beliefs and technology integration practices: A critical relationship. *Computers & Education*, 59(2), 423-435. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2012.02.001>
- Fernández-Batanero, J. M., Montenegro-Rueda, M., Fernández-Cerero, J., & García-Martínez, I. (2022). Digital competences for teacher professional development: A systematic review. *European Journal of Teacher*

Education, 45(4), 513-531. <https://doi.org/10.1080/02619768.2020.1827389>

Frausto-Márquez, L., Molina-Gutiérrez, M. A., & Torres-Rodríguez, C. A. (2023). Integration of process simulation software in chemical engineering education: Challenges and opportunities in Latin American universities. *Education for Chemical Engineers*, 44, 65-77. <https://doi.org/10.1016/j.ece.2023.04.003>

ISO. (2015). ISO 9001:2015 — Quality management systems: Requirements. International Organization for Standardization.

Ishikawa, K. (1985). *What is total quality control? The Japanese way*. Prentice-Hall.

Juran, J. M., & Godfrey, A. B. (1999). *Juran's quality handbook* (5.^a ed.). McGraw-Hill.

Little, A. D. (1915). *Report on the MIT Department of Chemistry and Chemical Engineering*. Massachusetts Institute of Technology.

McCabe, W. L., Smith, J. C., & Harriott, P. (2005). *Unit operations of chemical engineering* (7.^a ed.). McGraw-Hill.

Mourtzis, D., Angelopoulos, J., & Panopoulos, N. (2022). The future of engineering education in the era of Industry 4.0: A systematic literature review. *Procedia CIRP*, 112, 107-112. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.09.077>

Psomas, E., & Antony, J. (2017). Total quality management elements and results in higher education institutions. *Quality Assurance in Education*, 25(2), 206-223. <https://doi.org/10.1108/QAE-08-2015-0033>

Redecker, C. (2017). *European framework for the digital competence of educators: DigCompEdu*. Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2760/159770>

Redecker, C., & Punie, Y. (2017). *Digital competence of educators: DigCompEdu*. JRC Science for Policy Report EUR 28775. Joint Research Centre of the European Commission.

Sallis, E. (2014). *Total quality management in education* (3.^a ed.). Routledge.

Sánchez-Prieto, J. C., Trujillo-Torres, J. M., Gómez-García, M., & Hinojo-Lucena, F. J. (2023). DigCompEdu in Latin America: Adaptation and validation of the digital competence framework for educators in higher education contexts. *Education and Information Technologies*, 28, 2041-2062. <https://doi.org/10.1007/s10639-022-11154-8>

Schwab, K. (2017). *The fourth industrial revolution*. Crown Business.

Tam, M. (2021). *Quality management in higher education: Concepts, models and implementation*. Palgrave Macmillan.

Vázquez-González, G., García-Herrero, J., & López-Aguilar, D. (2024). Simulation-based learning in chemical engineering: Impact on conceptual understanding, design competencies and academic achievement. *Chemical Engineering Education*, 58(1), 45-58. <https://doi.org/10.18260/2-1-370.660-135226>

Wankat, P. C. (2017). *Separation process engineering: Includes mass transfer analysis* (4.^a ed.). Prentice Hall.

Declaración de conflicto de intereses: Los autores no presentan ningún conflicto de interés.

Declaración de contribución de los autores/as utilizando la Taxonomía CRediT:

Todos los autores trabajaron en la conceptualización, metodología, investigación, redacción – borrador original, revisión y edición.

Declaración de aprobación por el Comité de Ética: Los autores declaran que la investigación fue aprobada por el Comité de Ética de la institución responsable, en tanto la misma implicó a seres humanos.

Declaración de originalidad del manuscrito:

Los autores confirman que este texto no ha sido publicado con anterioridad, ni ha sido enviado a otra revista para su publicación.