



UNIVERSIDAD PERUANA
CAYETANO HEREDIA

IMPLEMENTACIÓN DE GEMELO
DIGITAL EN EL CURSO DE
INTRODUCCIÓN A LA
MINERALURGIA DE UNA
UNIVERSIDAD PRIVADA DE LIMA,
2025

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN PARA
OPTAR EL GRADO DE MAESTRO EN
EDUCACIÓN CON MENCIÓN EN
DOCENCIA E INVESTIGACIÓN EN
EDUCACIÓN SUPERIOR

JOSE LUIS GUERRERO GUEVARA
FERNANDO ENRIQUE ZAMUDIO SALINAS

LIMA – PERÚ

2025

ASESOR

Mg. Alejandro Charre Montoya

JURADO DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

MG. EFRAIN TICONA AGUILAR

PRESIDENTE

MG. MARINA FANY POBLETE ROBLES

VOCAL

MG. LIDIA SERRANO MIRANDA DE AGUILAR

SECRETARIO (A)

DEDICATORIA.

A Dios por todo el amor que me da.

A mi bebé Ignacio, cuya curiosidad por descubrir el mundo me
inspira cada día a ser un mejor padre y profesor.

A mi amada esposa Fati por ser una gran maestra para nuestro
bebé y una compañera de vida para mí.

A mis padres Benedicto y María por ser mis primeros maestros y
enseñarme que la educación cambia al mundo.

A mi hermano gemelo Miguel por acompañarme desde siempre
en la vida y en la pasión por la educación superior.

José Luis Guerrero Guevara

DEDICATORIA.

A Jesús y María por concederme la bendición de conocerlos y sembrar en mí las ganas de trabajar por la salvación de mis semejantes.

A mi madre Merlini, quien es siempre esa incansable luchadora preocupada por mi espiritualidad, salud y desarrollo personal

A mi hija Helen de Jesús, quien cambió mi vida y prioridades con su existencia y es mi gran orgullo como padre y ser humano

A Verónica, quien es mi compañera de vida y quien me ha enseñado que hay tantas otras formas de vivir una buena vida y ser

felices al mismo tiempo

Fernando Enrique Zamudio Salinas

AGRADECIMIENTOS

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a nuestro asesor Mg. Alejandro Charre, cuya guía, compromiso y amplia experiencia fueron fundamentales para el desarrollo y culminación de este trabajo de investigación.

A la Universidad de Ingeniería y Tecnología (UTEC), por brindarnos el respaldo institucional necesario para el desarrollo de esta propuesta, y en especial a la Directora PhD. Eunice Villicaña, por facilitarnos los materiales y recursos académicos que hicieron posible la realización de este trabajo de investigación.

A la Universidad Peruana Cayetano Heredia (UPCH) y a los docentes de las Maestría en Educación que nos otorgaron valiosas competencias para poder desarrollar cualquier tipo de investigación y propuesta por el bien de la educación superior del Perú.

FUENTES DE FINANCIAMIENTO.

Trabajo de investigación Autofinanciado.



IMPLEMENTACIÓN DE GEMELO
DIGITAL EN EL CURSO DE
INTRODUCCIÓN A LA
MINERALURGLA DE UNA
UNIVERSIDAD PRIVADA DE LIMA,
2025

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN PARA
OPTAR EL GRADO DE MAESTRO EN
EDUCACIÓN CON MENCIÓN EN
DOCENCIA E INVESTIGACIÓN EN
EDUCACIÓN SUPERIOR

JOSE LUIS GUERRERO GUEVARA
FERNANDO ENRIQUE ZAMUDIO SALINAS

LIMA – PERÚ

2025



Informe estándar ⓘ

Informe en inglés no disponible [Más información](#)

8% Similitud estándar

Filtros

Fuentes

Mostrar las fuentes solapadas ⓘ

1	Internet	repositorio.upch.edu.pe	1%
9	bloques de texto	150	palabra que coinciden
2	Internet	www.coursehero.com	<1%
9	bloques de texto	97	palabra que coinciden
3	Internet	mecamex.net	<1%
4	bloques de texto	76	palabra que coinciden
4	Trabajos del estudiante	Universidad Privada del Norte	<1%
1	bloques de bloques	73	palabra que coinciden

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Antecedentes	1
1.1.1. Antecedentes Nacionales	1
1.1.2. Antecedentes Internacionales	4
1.2. Planteamiento del Problema	8
1.3. Justificación del Estudio	12
1.4. Pregunta de Investigación	13
2. OBJETIVOS	14
2.1. Objetivo General	14
2.2. Objetivos Específicos	14
3. DESARROLLO DEL ESTUDIO	15
3.1. Método, Técnicas e Instrumentos	15
3.2. Fundamentos Teóricos y Prácticos del Estudio.	16
3.2.1. Gemelo Digital	16
3.2.2. Simulación	22
3.2.3. Mineralurgia	23
3.2.4. Curso de Introducción a la Mineralurgia	25
3.3. Desarrollo del Estudio	27
3.3.1. Referente y Recursos Necesarios para la Implementación del Gemelo Digital	27
3.3.1.1. Referente Curricular para la Implementación del Gemelo Digital	27

3.3.1.2. Selección de Referente Productivo para la Implementación del Gemelo Digital	31
3.3.1.3. Recursos Tecnológicos Necesarios para la Implementación del Gemelo Digital	33
3.3.2. Proceso Didáctico de Implementación del Gemelo Digital	36
3.3.2.1. Planificación Pedagógica (Fase Preparatoria)	37
3.3.2.2. Integración Curricular (Fase de Diseño Pedagógico)	38
3.3.2.3. Desarrollo de Sesiones de Aprendizaje (Fase de Aplicación Práctica)	41
3.3.2.4. Evaluación del Aprendizaje (Fase de Valoración Formativa y Sumativa)	43
3.3.2.5. Retroalimentación y Mejora Continua (Fase de Ajuste)	49
3.3.3. Ruta de Institucionalización para la Implementación del Gemelo Digital	51
3.3.3.1. Aprobación Académica Inicial	53
3.3.3.2. Piloto de Implementación	53
3.3.3.3. Evaluación y Sistematización	54
3.3.3.4. Incorporación en el Plan de Estudios	54
3.3.3.5. Escalamiento y Transferencia	54
4. CONCLUSIONES	55
5. RECOMENDACIONES	57
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Comparativo y evolución de conceptos de gemelo digital	21
Tabla 2 Costos de implementación del gemelo digital	35
Tabla 3 Plan de clases y sesiones con aplicación del gemelo digital	40
Tabla 4 Matriz de planificación de sesiones con gemelo digital	42
Tabla 5 Lista de cotejo para semana 3, simulación general de conminución	44
Tabla 6 Lista de Cotejo semana 4, Análisis: trituración y clasificación	45
Tabla 7 Semana 5 – Rúbrica de Evaluación del Informe Técnico Grupal	46
Tabla 8 Semana 6 – Rúbrica de Evaluación de Exposición Oral	47
Tabla 9 Resumen de las evaluaciones	48
Tabla 10 Escala de evaluación usada	49

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Conceptos de gemelo digital	19
Figura 2 Esquema de un gemelo digital	20
Figura 3 Conceptos de mineralurgia	24
Figura 4 Diagrama típico de un sistema de conminución	33
Figura 5 Proceso de implementación de las 5 fases didácticas	37
Figura 6 Diagrama de retroalimentación y mejora continua	51
Figura 7 Diagrama para la implementación del gemelo digital	53

RESUMEN

La enseñanza del curso mineralurgia suele apoyarse en métodos tradicionales con escasa aplicación, por lo que la transformación digital representa una oportunidad para innovar en este ámbito mediante herramientas como el gemelo digital, una tecnología con uso en la industria pero aún poco explorada en contextos educativos. En relación a lo expuesto, en el presente estudio se desarrolló una propuesta didáctica de aplicación de gemelo digital en cinco fases: planificación pedagógica, integración curricular, desarrollo de sesiones prácticas, evaluación del aprendizaje y retroalimentación. Además, se identificaron los recursos necesarios y se diseñó una ruta de institucionalización de la innovación. La propuesta se basa en el diseño conceptual de un gemelo digital que simula virtualmente las operaciones clave del procesamiento de minerales, permitiendo un aprendizaje más dinámico y efectivo. Metodológicamente, la investigación se fundamenta en la revisión de literatura científica, el análisis de tecnologías aplicables y la formulación de un modelo de implementación pertinente. Los resultados del estudio permiten sustentar que la propuesta de incorporación del gemelo digital en el curso constituye un aporte a la modernización de la enseñanza mediante la simulación, promover el aprendizaje activo, mejorar la comprensión de los procesos de conminución y desarrollar competencias digitales alineadas con las demandas actuales de la industria. Se concluye que la implementación de gemelo digital es viable, pertinente y pedagógicamente valiosa. Se recomienda a los docentes incorporar herramientas de simulación en otros cursos, a la institución asignar recursos para su implementación sostenible, y a futuros investigadores ampliar su estudio a otras áreas del procesamiento de minerales y contextos educativos.

PALABRAS CLAVES

Gemelo Digital, Mineralurgia, Curso introducción a la mineralurgia, Planta Concentradora, Ingeniería Química.

ABSTRACT

The teaching of the Mineral Processing course is often based on traditional methods with limited practical application; therefore, digital transformation represents an opportunity to innovate in this field through tools such as digital twins, a technology widely used in industry but still underexplored in educational contexts. In response to this, the present study developed a didactic proposal for applying a digital twin in five phases: pedagogical planning, curricular integration, development of practical sessions, learning assessment, and feedback. In addition, the necessary resources were identified, and a roadmap for the institutionalization of the innovation was designed. The proposal is based on the conceptual design of a digital twin that virtually simulates key mineral processing operations, enabling a more dynamic and effective learning experience. Methodologically, the study is grounded in the review of scientific literature, the analysis of applicable technologies, and the formulation of a relevant implementation model. The findings indicate that the proposed incorporation of a digital twin into the course contributes to the modernization of teaching by enabling process simulation, fostering active learning, enhancing the understanding of comminution, and developing digital competencies aligned with current demands of the mining industry. It is concluded that the implementation of a digital twin is viable, relevant, and pedagogically valuable. It is recommended that instructors integrate simulation tools into other courses, institutions allocate resources for sustainable implementation, and future researchers expand the study to other areas of mineral processing and educational contexts.

KEYWORDS

Digital Twin, Mineral Processing, Introduction to Mineral Processing Course,
Concentrator Plant, Chemical Engineering.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

1.1.1. Antecedentes Nacionales

Ramos et al. (2023), en su tesis de maestría titulada *Metodología basada en inteligencia artificial en la gestión del mantenimiento 4.0*, presentada en la Universidad de Piura (UDEP), tuvo como objetivo analizar cómo el uso de gemelos digitales y redes neuronales artificiales puede mejorar la gestión del mantenimiento predictivo en una planta industrial, enfocándose en el sistema de enfriamiento del agua de proceso. La investigación empleó un diseño exploratorio y experimental, utilizando técnicas avanzadas de inteligencia artificial, incluyendo redes neuronales recurrentes de memoria a corto y largo plazo (LSTM) y el modelo estadístico ARIMA, para procesar datos históricos de sensores de vibración y temperatura. El gemelo digital permitió replicar virtualmente las condiciones de la planta, simulando el comportamiento de los componentes críticos, lo que facilitó la predicción de la vida útil remanente (RUL) de los rodamientos del motor eléctrico de una bomba de proceso. La muestra consistió en datos recopilados de sensores instalados en los activos de la planta. Los resultados mostraron que la metodología aplicada permitió anticipar fallas con precisión, optimizar los tiempos de mantenimiento y mejorar la toma de decisiones, destacando el valor del gemelo digital en la gestión del mantenimiento industrial inteligente. Como conclusión, el estudio resalta que la combinación de inteligencia artificial y gemelos digitales mejora la confiabilidad de los sistemas, reduce costos operativos y facilita la planificación del mantenimiento predictivo. Entre sus recomendaciones, se sugiere una mayor adopción de tecnologías digitales en la industria para mejorar la eficiencia y reducir tiempos de inactividad no planificados. Este estudio es

relevante para el presente trabajo de investigación porque demuestra el impacto de los gemelos digitales en la optimización de procesos industriales y su integración con inteligencia artificial, lo que refuerza su aplicabilidad en entornos educativos. El estudio valida cómo estas tecnologías facilitan el aprendizaje basado en simulación y análisis de datos en tiempo real, lo que respalda su implementación en la enseñanza de Introducción a la Mineralurgia. Además, los hallazgos sobre la predicción de fallas y el uso de modelos de simulación ofrecen un marco de referencia para desarrollar metodologías didácticas innovadoras en ingeniería.

Hancoccallo et al. (2023) en su tesis de maestría titulada *Roadmap Tecnológico para el Proceso de Explotación de la Unidad Minera Constancia* (Tesis de maestría) presentada en la Pontificia Universidad Católica del Perú. Se tuvo el objetivo de desarrollar un roadmap tecnológico para optimizar el proceso de explotación en la Unidad Minera Constancia, ubicada en Cusco, Perú. Para ello, se analizó la situación actual de la mina, identificando desafíos operativos y oportunidades de mejora mediante la incorporación de tecnologías avanzadas. La metodología utilizada incluyó un enfoque mixto, combinando análisis cualitativo y cuantitativo. Se realizaron estudios de benchmarking con minas que han implementado tecnología avanzada, además de la recopilación y análisis de datos operativos mediante herramientas de minería de datos y modelado predictivo. Los principales hallazgos indicaron que la integración de sensores IoT, automatización de procesos y uso de inteligencia artificial pueden mejorar significativamente la eficiencia operativa, reducir costos y optimizar la seguridad en la explotación minera. Un aspecto clave de la propuesta es la implementación del gemelo digital, una tecnología que permite la simulación y monitoreo en tiempo real de los

procesos mineros, facilitando la toma de decisiones basadas en datos y optimizando la gestión de recursos. Además, se identificó que la digitalización de datos y el análisis en tiempo real mejoran la capacidad de respuesta ante variaciones en las condiciones operativas. Las principales conclusiones señalan que la adopción progresiva de tecnología en minería es clave para la competitividad y sostenibilidad del sector. Se recomienda la implementación de un roadmap en fases estratégicas, priorizando tecnologías de alto impacto como el gemelo digital, garantizando su integración con otras herramientas de monitoreo y asegurando la capacitación del personal para una transición efectiva hacia la minería 4.0.

Pun et al. (2024), en su tesis de maestría titulada Gemelo Digital en el área de mantenimiento del SIMA Perú, presentada en la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC), tuvo como objetivo analizar cómo la implementación de un gemelo digital impacta la eficiencia, confiabilidad y planificación del mantenimiento en el astillero SIMA Perú. La investigación utilizó un diseño cualitativo, empleando entrevistas semiestructuradas dirigidas a personal clave del SIMA y a expertos de un astillero internacional reconocido por el uso de esta tecnología. Además, se realizó un análisis documental de casos de éxito y publicaciones relevantes. La muestra estuvo conformada por entre 6 y 8 participantes seleccionados de manera intencional, quienes proporcionaron información clave sobre los procesos de mantenimiento en la industria naval. Los resultados mostraron que, a pesar de desafíos relacionados con la integración de sistemas, capacitación del personal y ciberseguridad, la implementación del gemelo digital mejoró significativamente la eficiencia operativa, la confiabilidad de los sistemas y la programación de actividades de mantenimiento en el astillero. Se

concluyó que el uso de gemelos digitales en la industria naval optimiza los tiempos de atención, reduce costos operativos y mejora la toma de decisiones. Como recomendación, se enfatizó la importancia de un plan de capacitación para el personal y la implementación gradual de la tecnología para garantizar su adopción efectiva. Este estudio es relevante para la presente tesis porque demuestra el impacto positivo de los gemelos digitales en la optimización de procesos industriales, lo que refuerza la viabilidad de su aplicación en el ámbito educativo. Esta investigación evidencia cómo estas herramientas mejoran la planificación y toma de decisiones en entornos altamente técnicos, lo que respalda su integración en la enseñanza de Introducción a la Mineralurgia. Además, los desafíos identificados en la industria naval, como la capacitación del personal y la integración de sistemas, son aspectos clave a considerar al implementar esta tecnología en el sector educativo, asegurando que los estudiantes adquieran competencias alineadas con las exigencias de la minería 4.0.

1.1.2. Antecedentes Internacionales

Beloglazov et al. (2020), en su artículo científico titulado *The concept of digital twins for tech operator training simulator design for mining and processing industry*, publicado en Eurasian Mining, realizaron un estudio en Rusia para analizar el impacto de la Industria 4.0 en la implementación de gemelos digitales para la capacitación de operadores en minería y procesamiento de minerales. El objetivo del estudio fue verificar cómo estos sistemas de simulación avanzados pueden mejorar la formación de operadores y la optimización de procesos en la industria minera. Para ello, emplearon un diseño de investigación experimental, utilizando una muestra de operadores de minería y procesamiento de minerales que

fueron capacitados mediante simuladores digitales avanzados. Los instrumentos empleados incluyeron plataformas de simulación virtual, sistemas de monitoreo SCADA y herramientas de análisis de Big Data. Los principales hallazgos indicaron que el uso de gemelos digitales no solo mejora la seguridad, eficiencia operativa y toma de decisiones en tiempo real, sino que también reduce significativamente los errores humanos y optimiza procesos como la molienda. Además, los resultados demostraron una reducción en los tiempos de aprendizaje del personal y una mayor precisión en la predicción de fallos operativos, validando la efectividad de estos modelos en el contexto minero. Se concluyó que la integración de estos sistemas con bases de datos y tecnologías de automatización contribuye a la sostenibilidad y competitividad del sector. Como recomendación, se sugiere su aplicación en otros sectores de la minería para fortalecer la formación técnica y operativa de los trabajadores, evidenciando una enseñanza más eficiente y una capacitación diferenciada que optimiza la preparación del personal en el uso de equipos mineros avanzados.

Sánchez de León Corral, A. (2023), en su tesis de maestría titulada Optimización de una planta de fabricación industrial con la ayuda de gemelos digitales, presentada en la Universidad Politécnica de Madrid, tuvo como objetivo mejorar la eficiencia en la fabricación de puertas de madera mediante la implementación de un gemelo digital. La investigación se desarrolló bajo un diseño aplicado con enfoque experimental, empleando el software de simulación FlexSim para modelar y optimizar el proceso productivo. Se recopiló información a partir de una planta industrial especializada en manufactura de puertas, donde se analizaron datos sobre tiempos de producción, costos operativos y eficiencia en cada etapa del

proceso. Los principales hallazgos indicaron que la implementación del gemelo digital permitió identificar cuellos de botella en la línea de producción, reducir significativamente los tiempos de fabricación y optimizar el uso de recursos, lo que resultó en una disminución de costos operativos y un aumento en la competitividad del producto final en el mercado. La investigación concluyó que la digitalización de procesos mediante modelos de simulación es una estrategia clave para la mejora continua en la industria manufacturera, destacando su capacidad para predecir fallos operativos, minimizar desperdicios y mejorar la productividad. Se recomendó la aplicación de esta tecnología en otros sectores industriales con procesos complejos que requieran optimización operativa. Esta investigación es relevante para nuestro estudio porque demuestra la efectividad de los gemelos digitales en la optimización de procesos productivos, lo que respalda su implementación en el ámbito educativo. En el contexto de la enseñanza de Introducción a la Mineralurgia, la integración de un gemelo digital permitiría a los estudiantes analizar y comprender procesos minero-metalúrgicos de manera más dinámica, fortaleciendo su aprendizaje práctico y su preparación para la industria.

Nobahar et al. (2024), en su estudio *Exploring Digital Twin Systems in Mining Operations: A Review*, publicado en la revista *Green and Smart Mining Engineering* en Australia, analizaron la aplicación de los gemelos digitales en la industria minera. Su investigación tuvo como objetivo evaluar el impacto de estas tecnologías en la eficiencia operativa, la seguridad y la sostenibilidad del sector, considerando el avance de la digitalización y la automatización en la minería. Para ello, los autores llevaron a cabo un estudio basado en revisión documental, recopilando información de fuentes científicas y técnicas para identificar

tendencias, herramientas y metodologías clave en la implementación de gemelos digitales. Su metodología incluyó el análisis de literatura especializada, la revisión de casos de estudio en minería digital y la evaluación de tecnologías emergentes como la inteligencia artificial, sensores IoT, modelado dinámico y sistemas de automatización en minería. La muestra del estudio consistió en datos extraídos de investigaciones previas relacionadas con la integración de estas tecnologías en diversas etapas de la cadena productiva minera. Los principales hallazgos del estudio indicaron que los gemelos digitales permiten una mejor integración y gestión de datos en la minería, optimizando procesos clave como la exploración, perforación, carga, transporte y procesamiento de minerales. Se evidenció que estas herramientas facilitan la simulación, predicción y optimización en tiempo real, lo que mejora la toma de decisiones estratégicas, reduce los costos operativos y minimiza riesgos en las operaciones mineras. Además, el estudio destacó que el uso de gemelos digitales contribuye a una mayor seguridad en las actividades mineras, al permitir la detección temprana de fallos y la reducción de la exposición del personal a entornos de alto riesgo. En cuanto a las conclusiones, señalaron que la implementación de gemelos digitales representa un avance clave en la transformación digital de la industria minera, ofreciendo beneficios en términos de eficiencia operativa, sostenibilidad y reducción del impacto ambiental. Sin embargo, identificaron desafíos significativos, como la variabilidad geológica, los altos costos de inversión y la brecha de habilidades en minería digital. Por ello, recomendaron fomentar la capacitación de profesionales en estas tecnologías y promover su adopción mediante políticas que incentiven la digitalización en el sector minero.

1.2. Planteamiento del Problema

En la formación profesional de nivel universitario, la integración de herramientas digitales en los procesos de enseñanza-aprendizaje puede contribuir a facilitar el logro de los objetivos educativos, incrementando el interés y la motivación de los estudiantes. En este contexto, los gemelos digitales han emergido como una solución innovadora en distintos campos del conocimiento.

Los gemelos digitales son representaciones virtuales de procesos, sistemas o equipos reales que permiten simular y analizar su comportamiento en un entorno digital (UTECH Posgrado, 2023). Esta tecnología surgió en la industria aeroespacial con la NASA en la década de 1970, cuando se utilizaban simulaciones digitales para modelar y predecir el comportamiento de naves espaciales (Miskinis, 2019). En la actualidad, los gemelos digitales se han expandido a múltiples sectores, como la manufactura, la minería, industria energética, salud y la educación, debido a su capacidad para mejorar la toma de decisiones estratégicas y optimizar procesos (UTECH Posgrado, 2023).

A nivel mundial, en Rusia, en la Universidad Minera de San Petersburgo, Beloglazov et al. (2020) identificaron que la metodología tradicional de enseñanza en el sector del procesamiento de minerales y las industrias químicas no respondía a las necesidades de los estudiantes, generando desinterés y dificultades para aplicar los conocimientos teóricos en contextos prácticos. Como solución, propusieron e implementaron gemelos digitales, lo que permitió a los estudiantes interactuar con representaciones digitales de equipos y procesos mineros, facilitando la aplicación de conocimientos teóricos en contextos prácticos.

En Latinoamérica, aunque las materias STEM (Science, Technology, Engineering, and Mathematics) lideran en innovación pedagógica y tecnologías, los gemelos digitales aún no son de uso común (Arciniega & Torres, 2020). Esta falta de integración limita la capacidad de los estudiantes para aplicar conceptos teóricos en entornos prácticos, lo que reduce tanto el interés como la efectividad del aprendizaje, especialmente en disciplinas técnicas como la ingeniería y el procesamiento de minerales.

La educación superior en el Perú se caracteriza por el uso de las metodologías tradicionales de enseñanza, con enfoques rígidos y memorísticos. Tarazona (2022) sostiene que el uso de herramientas digitales mejora significativamente el aprendizaje, subrayando las limitaciones de los métodos de enseñanza tradicionales frente a las demandas formativas actuales. En esta perspectiva, en la enseñanza de la mineralurgia, los gemelos digitales pueden desempeñar un rol clave al permitir la simulación de circuitos de chancado, molienda, flotación, lixiviación y otros procesos químicos-metalúrgicos. Estas simulaciones brindan a los estudiantes una comprensión más profunda de los principios metalúrgicos sin necesidad de experimentar directamente en plantas industriales, reduciendo costos y riesgos.

En la Universidad de Ingeniería y Tecnología (UTEC), institución enfocada en la formación de profesionales en ingeniería y tecnología con un modelo basado en competencias y una visión internacional. Guevara (2020) propone incorporar metodologías de enseñanza modernas y el uso de herramientas digitales en algunos cursos de la universidad. Por esta razón, dado el impacto positivo de los gemelos digitales en la formación técnica profesional en sectores como la minería, su

implementación en el ámbito educativo en el Perú representa una oportunidad para mejorar la enseñanza de la Mineralurgia. La adopción de esta tecnología permitiría a los estudiantes desarrollar competencias prácticas en entornos virtuales, alineándose con las tendencias globales y fortaleciendo su preparación para el sector industrial.

En una universidad privada de Lima, ubicada en el distrito de Barranco, se imparte el curso de Introducción a la Mineralurgia, dirigido a estudiantes de ingeniería en sus últimos años de formación. Este curso tiene como objetivo brindar a los estudiantes los conocimientos teóricos y prácticos sobre los procesos químico-metalúrgicos esenciales para el beneficio de minerales en un yacimiento minero. Para ello, se estudian los principales procesos de chancado, molienda, flotación, lixiviación y espesamiento, así como los equipos involucrados en cada etapa. Además, se abordan temas de comercialización de minerales, seguridad en minería y cuidado del medio ambiente (UTECH, 2024a).

El sílabo del curso ME5301 Introducción a la Mineralurgia establece una metodología de enseñanza basada en el aprendizaje por problemas y proyectos, diseñada para fomentar la participación activa de los estudiantes y fortalecer su capacidad de análisis y resolución de problemas. Al respecto, consideramos que se debería integrar el uso de herramientas digitales avanzadas, como los gemelos digitales, que podrían mejorar significativamente el proceso de enseñanza-aprendizaje permitiendo simular y visualizar procesos complejos en un entorno virtual, facilitando la comprensión de conceptos teóricos y su aplicación en la práctica.

Como se menciona líneas arriba, el sílabo del curso Introducción a la Mineralurgia no contempla el uso de gemelos digitales. Esta situación, contrasta con la realidad actual de la industria minera, que está haciendo un uso cada vez más rápido y eficiente de los datos para optimizar procesos.

La ausencia de herramientas digitales en la enseñanza del curso de Introducción a la Mineralurgia tiene varias consecuencias relevantes. En primer lugar, afecta la calidad percibida del curso y la satisfacción de los estudiantes. Según los resultados de la Encuesta de Satisfacción del Curso ME5301 – Introducción a la Mineralurgia (UTECH, 2024b), los estudiantes valoran positivamente la didáctica aplicada en la asignatura; sin embargo, expresan un interés significativo en la integración de herramientas tecnológicas que permitan un aprendizaje más interactivo y alineado con los avances del sector minero. En segundo lugar, la falta de generación de competencias digitales puede provocar una pérdida de interés en el curso, ya que no se alinea con las habilidades demandadas en el contexto actual. En este sentido, la incorporación de tecnologías como los gemelos digitales podría mejorar la motivación y el desempeño de los estudiantes, facilitando la comprensión de procesos complejos mediante simulaciones interactivas (Sanchez, 2023). Además, el aprendizaje basado únicamente en metodologías tradicionales dificulta la transferencia de conocimientos adquiridos a escenarios prácticos. Finalmente, esta situación amplía la brecha entre lo aprendido en el aula y las tecnologías que los estudiantes encontrarán en la industria minera, limitando su preparación profesional y reduciendo su competitividad en el mercado laboral.

Como solución al problema identificado, se propone la implementación de gemelos digitales en el curso de Introducción a la Mineralurgia. Los gemelos digitales son réplicas virtuales de procesos, sistemas o equipos físicos, que permiten simular su comportamiento en un entorno digital en tiempo real (Miskinis, 2019). Su uso en educación facilita un aprendizaje más dinámico e interactivo, permitiendo a los estudiantes explorar y manipular modelos virtuales sin necesidad de equipos físicos.

1.3. Justificación del Estudio

A nivel social y educativo es una propuesta que pretende auspiciar el uso frecuente, constante y actualizado de los gemelos digitales como una herramienta potente para una transferencia de conocimientos más efectiva, metódica y sobre todo observable, tanto evaluable tanto por el docente por el estudiante.

Desde una perspectiva personal, estamos convencidos que en el ecosistema moderno laboral y de educación superior, la dimensión digital virtual ostenta un rol protagónico en el día de hoy. Más allá de los simuladores y demás modelos que en su momento tuvieron un uso extendido, los gemelos digitales deben erigirse hoy por hoy como una opción cada vez más empleada, sostenidos en gran medida por el avance tecnológico y el desarrollo de las TICS.

Desde una perspectiva metodológica, podríamos decir que la enseñanza tradicional en minería que ha sido básicamente teórica, donde los estudiantes poseen pocas oportunidades de acceder a las plantas de procesamiento reales, entre muchas razones por los altos costos de los viajes o los peligros que existen en las minas para los estudiantes. En tal sentido, un gemelo digital se convierte en una

poderosa herramienta, donde se pueden recrear condiciones de operación y analizar los indicadores de las variaciones en los procesos.

Como justificación práctica podríamos sostener que los gemelos digitales son accesibles desde cualquier escenario, haciendo posible que el estudiante pueda investigar el entorno incluso más allá del aula y experimentar sin limitaciones de tiempo o lugar.

Además, esta herramienta digital sumerge a los estudiantes en tecnologías avanzadas (Industria 4.0) que se emplean hoy por hoy en la minería, mejorando sus competencias y preparándolos eficazmente para hacer frente a los retos tecnológicos de la industria.

1.4. Pregunta de Investigación

¿Cómo implementar los gemelos digitales en el curso de Introducción a la Mineralurgia en una universidad privada de Lima?

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo General

Proponer la implementación de los gemelos digitales en el curso de Introducción a la Mineralurgia en una universidad privada de Lima.

2.2. Objetivos Específicos

OE1: Determinar el referente y recursos necesarios para la implementación del gemelo digital en el curso de Introducción a la Mineralurgia en una universidad privada de Lima.

OE2: Diseñar el proceso didáctico de implementación del gemelo digital, en el curso de Introducción a la Mineralurgia en una universidad privada de Lima

OE3: Diseñar una ruta de institucionalización para la implementación del gemelo digital en el curso de Introducción a la Mineralurgia en una universidad privada de Lima

3. DESARROLLO DEL ESTUDIO

3.1. Método, Técnicas e Instrumentos

La investigación se desarrolló bajo un enfoque cualitativo, ya que buscó comprender y mejorar la metodología de enseñanza en Mineralurgia a través de la incorporación de herramientas tecnológicas innovadoras. Según Creswell (2014), la investigación cualitativa permite explorar fenómenos en su contexto natural, lo que resulta adecuado para analizar las potencialidades didácticas del gemelo digital en la enseñanza.

El tipo de investigación es descriptivo-propositivo, ya que describe las características actuales del curso y plantea una propuesta de mejora educativa basada en la tecnología de gemelos digitales. Hernández-Sampieri, Fernández y Baptista (2014) señalan que este tipo de estudio permite caracterizar un fenómeno y proponer soluciones fundamentadas.

En cuanto al nivel de investigación, se enmarca en el nivel descriptivo exploratorio, pues busca explorar alternativas pedagógicas para la enseñanza de la Mineralurgia mediante el uso del gemelo digital como herramienta innovadora, con el fin de identificar opciones de mejora en los procesos de aprendizaje y alinearlas con las demandas actuales del sector minero (Hernández-Sampieri et al., 2014).

Para alcanzar los objetivos del estudio, se empleó un método mixto, que combina análisis documental y revisión bibliográfica. El análisis documental se enfoca en la revisión de los materiales del curso, permitiendo identificar su alineación con los objetivos de aprendizaje (Bowen, 2009). La revisión bibliográfica fundamenta teóricamente la aplicación del gemelo digital en la educación, considerando estudios previos sobre su impacto en entornos formativos (Yin, 2018). Finalmente, la observación sistemática facilita la recopilación de datos

sobre la dinámica del curso, la búsqueda de alternativas de mejora y la formulación de propuesta (Angrosino, 2012).

Las técnicas utilizadas incluyen el análisis de documentos del curso, como el sílabo, con el propósito de encontrar las oportunidades de mejora con el uso del gemelo digital. Además, se lleva a cabo una revisión bibliográfica sobre gemelos digitales, considerando su aplicación en otras disciplinas y su potencial en la enseñanza de la Mineralurgia para establecer sus capacidades y usos en el curso. Finalmente, se realiza un análisis de necesidades del curso, con el fin de identificar los desafíos actuales en la formación de los estudiantes y proponer estrategias de mejora.

En cuanto a los instrumentos de investigación, se utilizó matrices de análisis para identificar necesidades pedagógicas y recursos tecnológicos (Miles et al., 2014). También se utilizó diagramas de flujo para visualizar las etapas del proceso de implementación del gemelo digital en el curso. Además, se desarrollaron plantillas de planificación, las cuales ayudó a definir objetivos, cronogramas y los recursos necesarios para el diseño de la propuesta.

Con respecto a las consideraciones éticas, no se trabajó con personas. Es decir, no hubo entrevistas ni encuestas, por lo tanto, no hubo riesgo de causar accidentes ni daño a terceras personas.

3.2. Fundamentos Teóricos y Prácticos del Estudio.

3.2.1. Gemelo Digital

A través de los años, las denominadas revoluciones industriales planteaban una transformación, un giro, de la forma cómo se venían realizando los trabajos. En

ese momento concreto hacia prácticas novísimas influenciadas determinantemente por la tecnología disponible en ese tiempo puntual (Raja & Muthuswamy, 2023).

Históricamente y hasta el año de 1950 aproximadamente, habían ocurrido tres revoluciones industriales caracterizadas por la mecanización, electrificación y automatización. Desde ese entonces y hasta la fecha, estamos viviendo la cuarta revolución industrial, también denominada Industria 4.0 o 4IR (Raja & Muthuswamy, 2023).

El término Industria 4.0 fue introducido en 2011 por el profesor alemán Wolfgang Wahlster durante la Feria de Hannover. Esta revolución industrial se distingue por la digitalización de las industrias manufactureras, enfocándose en la automatización, la interconexión y la mejora de procesos en tiempo real mediante el uso de tecnologías avanzadas. Entre estas destacan el Internet de las cosas (IoT), el aprendizaje automático (ML), la inteligencia artificial (IA), los sistemas ciberfísicos (CPS), la computación en la nube, la fabricación aditiva (AM), los gemelos digitales y la ciberseguridad, que permiten la comunicación y el control autónomo entre sistemas (Raja & Muthuswamy, 2023).

Si la Industria 3.0 se sostuvo básicamente por la informatización, la Industria 4.0 está auspiciada por la sinergia e interacción de tecnologías digitales con sistemas físicos, que los presentan más inteligentes y operan de manera independiente sin intervención del hombre. Este es el contexto en el cual hace su aparición los gemelos digitales. A partir de la década de 1960, 70 y 80 se empieza a trabajar o implementar los gemelos digitales bajo la figura de simuladores, principalmente en la industria aeroespacial y automotriz (Raja & Muthuswamy, 2023).

Es en 2003 cuando el ingeniero informático Michael Grieves oficializa el concepto de gemelo digital o Digital Twin en una conferencia en la Universidad de Michigan sobre la gestión del ciclo de vida del producto (Menon et al., 2023).

Una escueta y básica definición de gemelo digital, al momento suficiente, es aquella que nos proporcionan Menon et al. (2023), al postular que es “una tecnología innovadora que se asocia con la Industria 4.0 es el Gemelo Digital (DT por sus siglas en inglés) el cual se entiende como una copia virtual de un objeto o sistema físico que puede observarse, analizarse y controlarse en tiempo real”.

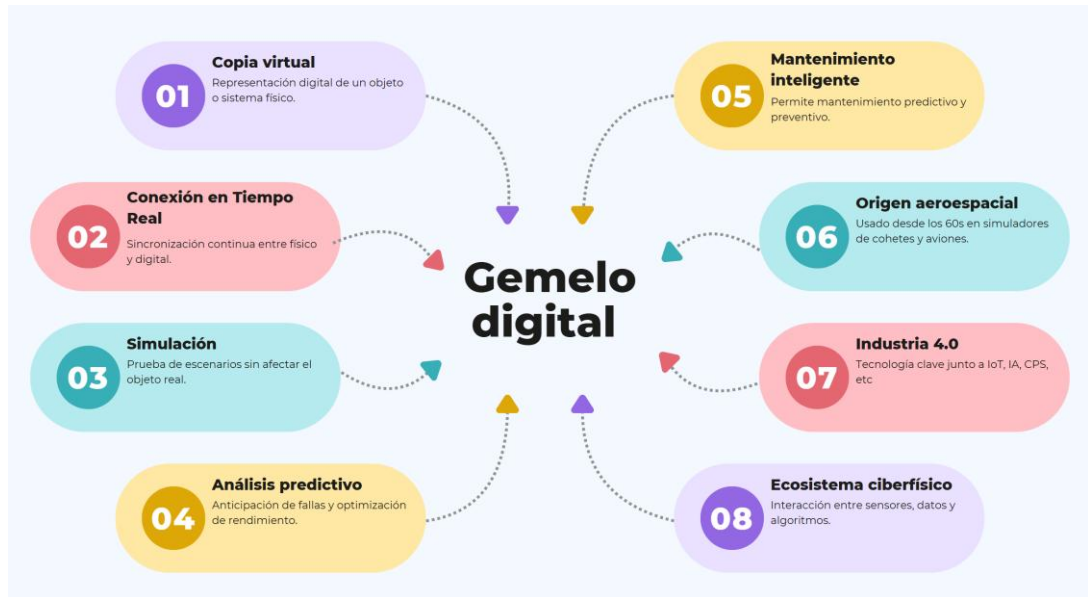
Los gemelos digitales pueden ayudar a optimizar diferentes procesos, reducir tiempos de fabricación y comercialización de productos, implementar programas de mantenimiento preventivo anticipando fallas y minimizando costos de producción, entre otras faenas relevantes.

Estas reflexiones nos hacen ver la importancia, primero de la presencia y luego de la interacción de las tecnologías digitales disruptivas, las mismas que finalmente ya conforman todo un ecosistema ciberfísico, en el cual los gemelos digitales ocupan un lugar protagónico.

En la Figura 1 se muestra el concepto de gemelo digital en un mapa mental donde se expone un resumen en ocho puntos para facilitar el entendimiento del concepto.

Figura 1

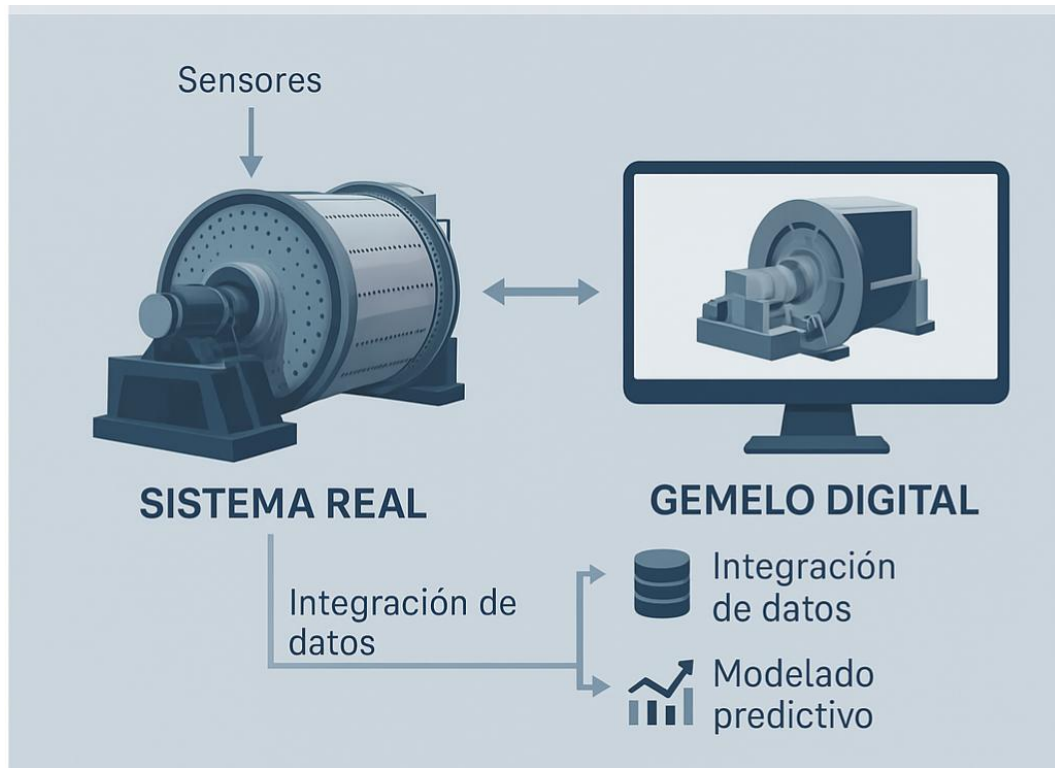
Concepto de gemelo digital



En la Figura 2 se muestra una infografía del concepto de gemelo digital donde se resalta que la representación de un molino semi-autógeno (SAG) con sus sensores reales los cuales alimentan de data al gemelo digital. La imagen fue generada con apoyo de inteligencia artificial (ChatGPT, 2025).

Figura 2

Esquema de un gemelo digital



En la Tabla 1 se consolidan los conceptos de gemelo digital a lo largo del tiempo y según diversos autores, lo que permitió comprender el término y aplicarlo en el presente trabajo de investigación.

Tabla 1*Comparativo y evolución de conceptos de gemelo digital*

Año	Autor(es)	Contexto / Aplicación	Definición o Aporte Principal	Observaciones
Décadas de 1960-1980	No especificado (industria aeroespacial y automotriz)	Simulación de sistemas físicos complejos	Uso de simuladores que representaban modelos físicos en entornos virtuales.	Primera implementación práctica del concepto sin denominarse aún "gemelo digital"
2003	Michael Grieves	Gestión del ciclo de vida del producto (PLM)	Introduce formalmente el concepto de Digital Twin.	Presentado en una conferencia en la Universidad de Michigan
2023	Menon et al.	Industria 4.0	“Una copia virtual de un objeto o sistema físico que puede observarse, analizarse y controlarse en tiempo real.”	Definición simple y funcional, centrada en la sincronización entre lo físico y lo digital
2023	Raja & Muthuswamy	Industria 4.0 – Ecosistema ciberfísico	explican su surgimiento y cómo se integran con tecnologías como IoT, IA, ML, CPS, etc.	Resaltan el papel protagónico del gemelo digital en la transformación digital de la industria moderna

3.2.2. Simulación

Desde una perspectiva académica, Banks et al. (2010) definen la simulación como construir un modelo representativo de un sistema real y utilizarlo como base para llevar a cabo pruebas que permitan entender su comportamiento o analizar diversas alternativas de operación; es decir, la simulación, entendida como una representación dinámica de un sistema real mediante modelos computacionales, constituye un recurso teórico fundamental en la enseñanza de disciplinas técnicas, especialmente aquellas vinculadas a procesos industriales. Esta herramienta permite visualizar fenómenos complejos, manipular variables en tiempo real y anticipar comportamientos sin los riesgos, costos o limitaciones que implica la experimentación física.

La simulación es la base sobre la cual se desarrolla un gemelo digital, pero este último representa una evolución más compleja y conectada. Mientras que una simulación tradicional reproduce un sistema en condiciones controladas y generalmente con datos estáticos, el gemelo digital amplía esta funcionalidad al integrarse con el sistema físico real en tiempo real, permitiendo una gestión dinámica, predictiva y automatizada del proceso (Tao, Zhang, Liu, & Nee, 2019).

En el campo de la educación superior, la simulación se enmarca dentro de los enfoques constructivistas y activos del aprendizaje, al ofrecer escenarios de interacción y análisis que favorecen la comprensión profunda de conceptos y el desarrollo de habilidades técnicas. En el caso del curso de Introducción a la Mineralurgia, la simulación adquiere especial relevancia al permitir modelar circuitos de conminución (chancado y molienda) mediante software especializado, lo que permite a los estudiantes experimentar de manera virtual con condiciones

operativas reales, fortaleciendo así su formación técnico-profesional con base en la resolución de problemas y la toma de decisiones fundamentada.

3.2.3. Mineralurgia

La mineralurgia, también conocida como tecnología de procesamiento de minerales, es una disciplina de la ingeniería que se enfoca en la separación de minerales valiosos de la ganga, utilizando técnicas físicas y fisicoquímicas. Según Wills y Finch (2015), el procesamiento de minerales se define como el conjunto de operaciones físicas y químicas realizadas para separar los minerales valiosos de la ganga, permitiendo su posterior uso o refinación. Su propósito principal es reducir el volumen del material que necesita ser transportado y tratado por métodos químicos, enriqueciendo el contenido de minerales valiosos.

La mineralurgia comprende diversas etapas fundamentales para el tratamiento eficiente de minerales. Estas incluyen la conminución (comminution), que consiste en el chancado y molienda para separar las partículas valiosas de la ganga; la concentración (separation/concentration), donde se emplean técnicas como la flotación, gravimetría y separación magnética para obtener concentrados de mayor valor; la deshidratación o espesamiento (dewatering), que permite la eliminación del agua de los concentrados y relaves para facilitar su manejo; y la gestión de relaves (tailings disposal), orientada al almacenamiento y disposición segura de los relaves generados durante el proceso (Wills & Finch, 2015).

El término procesamiento de minerales se utiliza de manera intercambiable con mineralurgia, aunque existen matices en su uso dependiendo del contexto académico o industrial. De acuerdo con Kelly y Spottiswood (1982), el procesamiento de minerales abarca tanto los procesos físicos de separación como

los aspectos químicos que pueden influir en la recuperación de metales. Esto sugiere que el procesamiento de minerales tiene un enfoque más amplio, incluyendo consideraciones químicas y físicas.

En la Figura 3 se presenta un mapa mental, en el cual se detallan las operaciones unitarias consideradas en este trabajo de investigación para definir el concepto de mineralurgia.

Figura 3

Conceptos de mineralurgia



En el contexto de este trabajo de investigación, se considerarán los términos mineralurgia y procesamiento de minerales como sinónimos, ya que ambos se refieren a los procesos físicos y fisicoquímicos destinados a la separación y concentración de minerales valiosos. Aunque existen matices en su uso, la equivalencia de estos términos facilita la comprensión integral del tema.

3.2.4. Curso de Introducción a la Mineralurgia

El curso de ME5301 Introducción a la Mineralurgia forma parte del plan de estudios de Ingeniería Mecánica y como electivo para las carreras de Ingeniería Mecatrónica, Química, Industrial y otras carreras que se enseñan en la Universidad de Ingeniería y Tecnología (UTECH). Este curso tiene como propósito brindar a los estudiantes los fundamentos teóricos y prácticos sobre el procesamiento de minerales. A través de un enfoque teórico-práctico, el curso aborda el estudio de procesos como trituración, molienda, flotación, lixiviación y separación sólido-líquido, así como temas de comercialización de minerales, geometalurgia, seguridad y medio ambiente. En el proceso de enseñanza y aprendizaje se aplica una metodología activa basada en proyectos y resolución de problemas reales de la industria. Este curso es clave en la formación de ingenieros, ya que les permite comprender los procesos utilizados en la industria minera para transformar los minerales extraídos en productos de mayor valor mediante operaciones físicas y fisicoquímicas (UTECH, 2024a).

Dentro de los objetivos del curso, se busca que los estudiantes comprendan los principios fundamentales de la conminución, clasificación, concentración, comercialización y gestión de relaves, así como los factores que afectan la eficiencia de cada uno de estos procesos. Además, se espera que sean capaces de analizar y evaluar los parámetros operacionales de los circuitos de procesamiento, facilitando su aplicación en contextos industriales. A través del desarrollo de habilidades analíticas y técnicas, los alumnos podrán interpretar resultados experimentales y proponer mejoras en los procesos químico-metalúrgicos.

El contenido del curso abarca diversas operaciones unitarias fundamentales en la mineralurgia. Entre los principales temas tratados se encuentran el chancado y la molienda de minerales, procesos esenciales para la reducción de tamaño de las partículas y la liberación de especies valiosas. Asimismo, se estudian los métodos de clasificación y separación, incluyendo el uso de hidrociclones y zarandas, que permiten separar las partículas según su tamaño y densidad. Otro aspecto central es el estudio de métodos de concentración de minerales, como la flotación, la separación magnética y la separación por gravedad, que permiten enriquecer el contenido de los minerales de interés. El curso también incluye el análisis de los circuitos de procesamiento de minerales, donde se estudian diferentes configuraciones operacionales utilizadas en plantas concentradoras. Se abordan aspectos clave como la optimización de procesos, el control de variables operacionales y la evaluación de indicadores de desempeño. Además, se introducen herramientas para la modelización y simulación de procesos, permitiendo a los estudiantes predecir el comportamiento de los sistemas metalúrgicos bajo diferentes condiciones de operación.

Para lograr un aprendizaje significativo, el curso adopta una metodología basada en aprendizaje por problemas y proyectos, incentivando la aplicación de los conceptos teóricos en casos prácticos. A través del análisis de situaciones reales, los estudiantes desarrollan habilidades de resolución de problemas y toma de decisiones, fundamentales para su desempeño en la industria minera. De esta manera, el curso de Introducción a la Mineralurgia no solo proporciona conocimientos técnicos esenciales, sino que también fomenta el pensamiento crítico

y la capacidad de aplicar soluciones innovadoras en el procesamiento de minerales (UTECH, 2024a).

3.3. Desarrollo del Estudio

3.3.1. Referente y Recursos Necesarios para la Implementación del Gemelo Digital

3.3.1.1. Referente Curricular para la Implementación del Gemelo Digital

El referente curricular será el sílabo del curso. El curso *ME5301: Introducción a la Mineralurgia* es un curso electivo de 4 créditos de naturaleza teórico-práctica, que se habilita para estudiantes de Ingeniería, diseñado para proporcionar a los estudiantes una comprensión integral de los procesos físico-químicos que permiten transformar minerales en productos de valor comercial. El curso es parte de la especialización en Minería que brinda la universidad privada de Lima.

Según el sílabo oficial (Universidad de Ingeniería y Tecnología [UTECH], 2024a), el curso tiene como objetivo general que el estudiante comprenda los fundamentos y operaciones básicas involucradas en el procesamiento de minerales, identificando los principales equipos, variables operativas y criterios de selección de procesos adecuados para el tratamiento de minerales en una planta concentradora. Se procede a detallar la estructura del sílabo actual y el detalle de los cambios al sílabo que se proponen en este estudio.

a) Competencias del curso

El curso contribuye al desarrollo de las siguientes competencias del perfil del egresado:

- ABET-ING-01 La capacidad de identificar, formular y resolver problemas complejos de ingeniería mediante la aplicación de principios de ingeniería, ciencias y matemáticas.
- ABET-ING-03 La capacidad de comunicarse efectivamente con diversos tipos de audiencias.
- ABET-ING-06 La capacidad de desarrollar y realizar una experimentación apropiada, analizar e interpretar datos y utilizar el juicio de ingeniería para generar conclusiones.

La propuesta de implementación del gemelo digital en el curso Introducción a la Mineralurgia implica una actualización metodológica del sílabo para fortalecer las competencias del perfil del egresado. El uso de software especializado permite desarrollar la competencia ABET-ING-01, al abordar problemas complejos de ingeniería a partir de condiciones simuladas, y ABET-ING-06, mediante experimentación virtual, análisis de datos y aplicación del juicio técnico. Además, se refuerza ABET-ING-03 al exigir la comunicación efectiva de resultados en informes y presentaciones técnicas. Esta propuesta alinea el curso con las demandas actuales de digitalización en la formación en ingeniería.

b) Unidades Didácticas del Curso

El contenido se organiza en quince unidades temáticas según el sílabo del curso ME5301 Introducción a la Mineralurgia (Universidad de Ingeniería y Tecnología [UTEC], 2024a):

1. Importancia de la Mineralurgia. Conceptos básicos.
2. Minerales. Tipos de Yacimientos y técnicas de estudio mineralógicos.
3. Principales procesos en el beneficio de minerales.

4. Fundamentos y principios de Trituración y Clasificación. Equipos y circuitos de Trituración y Clasificación.
5. Fundamentos y principios de Molienda y clasificación. Equipos y circuitos de molienda y clasificación.
6. Fundamentos y principios de Concentración de minerales – Flotación. Equipos y Circuito de flotación.
7. Fundamentos de y principios de Lixiviación. Equipos y circuitos en lixiviación.
8. Fundamentos y principios de concentración gravimétrica. Equipos y circuitos en concentración gravimétrica.
9. Fundamentos y principios de separación sólido líquido. Equipos y circuitos de espesamiento y filtrado.
10. Fundamentos y principios del transporte y disposición de relaves. Equipos y circuitos aplicados.
11. Conceptos básicos y ejercicios aplicativos en comercialización de minerales.
12. Conceptualización y fundamentos de Geometalurgia e Integración Mina Planta.
13. Seguridad y Medioambiente en el sector minero-metalúrgico.
14. Gestión de Proyectos –Minero Metalúrgicos.

La propuesta de la implementación del gemelo digital en el curso no cambia el temario original del sílabo.

c) Duración y cronograma

El curso tiene 4 créditos que se obtiene de una duración de 16 semanas con una carga horaria de 4 horas semanales (4 teóricas), distribuidas en 2 clases por semana de 2 horas cada una:

- Semanas 1–2: Introducción general y panorama del procesamiento de minerales.
- Semanas 3–6: Conminución (teoría y prácticas de trituración y molienda).
- Semanas 7–10: Concentración de minerales por métodos físicos y químicos.
- Semanas 11–12: Separación sólido-líquido, manejo de relaves y medio ambiente.
- Semanas 13–14: Geometalurgia y comercialización.
- Semana 15: Presentación de proyecto integrador
- Semana 16: Evaluación final y cierre del curso.

Este cronograma sirve como base para insertar la propuesta didáctica del gemelo digital durante el desarrollo de la unidad de conminución (semanas 3 a 6), en la que se abordará la operación del sistema de conminución, permitiendo a los estudiantes simular condiciones operativas reales mediante el gemelo digital y aplicar conceptos teóricos en escenarios dinámicos.

d) Sistema de evaluación del curso

El curso actualmente tiene un sistema de evaluación de prácticas calificadas (PC) que representan el 20% de la nota del curso, un proyecto integrador (P) que representa el 30%, práctica (L) que representa un 20% y un examen final (EF) que representa un 30% de la nota final. Las PC son cuatro en total de las cuales se

elimina la nota más baja y se promedia solo tres notas de práctica como se muestra en la Ecuación 1.

$$PC = \frac{PC1+PC2+PC3+PC4 - MIN(PC1+PC2+PC3+PC4)}{5} \quad (1)$$

En la Ecuación 2 se muestra la nota final del curso.

$$Nota\ Final = 0.20 \times PC + 0.30 \times P + 0.20 \times L + 0.30 \times EF \quad (2)$$

La implementación del gemelo digital en el curso también implica una modificación en la estrategia de evaluación, particularmente en la práctica calificada 2. En el enfoque tradicional, esta evaluación consistía en un examen individual centrado en contenidos teóricos. Con la propuesta metodológica, se plantea sustituir dicho examen por un promedio de calificaciones obtenidas en actividades aplicadas que incluyen simulaciones, análisis técnico individual, informes grupales y presentaciones orales. Este cambio responde al enfoque de aprendizaje activo y basado en competencias, ya que permite valorar no solo el conocimiento declarativo, sino también la capacidad de aplicar conceptos, resolver problemas reales y comunicar resultados de manera efectiva, en coherencia con los objetivos del curso y el uso de tecnología educativa avanzada.

3.3.1.2. Selección de Referente Productivo para la Implementación del Gemelo Digital

Como parte de esta propuesta, se seleccionó un proceso clave para el proceso de mineralurgia y cuya operación es comúnmente abordada en el curso. En este caso, se propone modelar el sistema de conminución que incluye un sistema de chancado, fajas, zarandas, y el molino de bolas como equipo base para el desarrollo

del gemelo digital, se analizará todo el sistema de faja transportadora, bombas, hidrociclones, zarandas y chancado, debido a que:

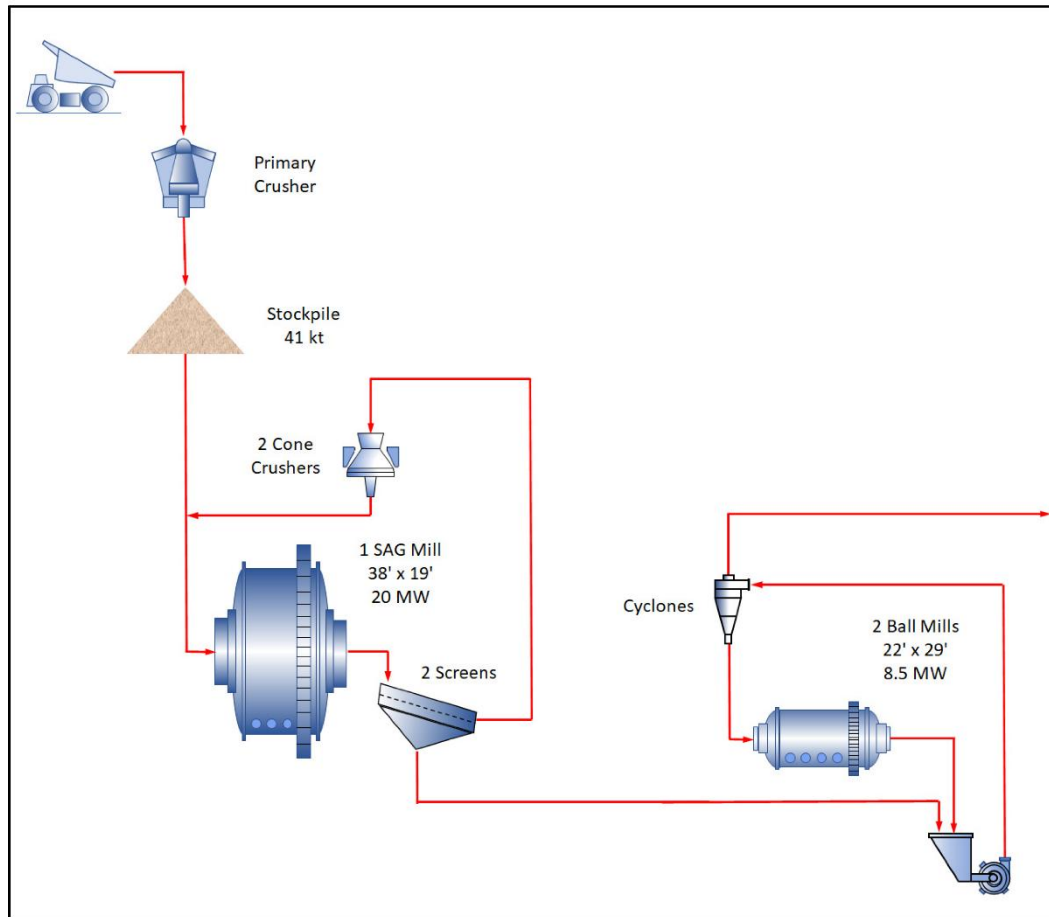
- Es un equipo central en el proceso de conminución (reducción de tamaño de partículas), uno de los temas fundamentales del curso.
- Permite simular aspectos mecánicos, energéticos y de rendimiento operativo.
- Su dinámica puede ser representada con variables físicas observables como velocidad de rotación, tamaño de alimentación, carga de bolas, entre otras.

Este sistema de conminución, por su relevancia en la cadena de beneficio de minerales, permite una mejor comprensión del impacto de la granulometría sobre la eficiencia del proceso metalúrgico, por lo que resulta ideal como eje de simulación para el gemelo digital en el entorno educativo.

En la Figura 4 se presenta un diagrama típico del proceso de conminución, tomado de Delboni et al. (2022), en el que se observa el circuito de chancado primario con una chancadora giratoria, seguido del molino SAG y su correspondiente sistema de clasificación, así como el molino de bolas acompañado por un hidrociclón. A partir de este esquema, la presente tesis toma como referente para la implementación del gemelo digital el sistema de conminución, específicamente las etapas de chancado y la alimentación a la molienda, por constituir procesos clave en la comprensión operativa del curso y ser altamente representativos para el desarrollo de habilidades técnicas mediante simulación. Se escoge la conminución porque puede llegar a representar la mayor cantidad de consumo de energía y del presupuesto de la Planta Concentradora.

Figura 4

Diagrama típico de un sistema de conminución



Fuente: Reproducido de Delboni et al. (2022)

3.3.1.3. Recursos Tecnológicos Necesarios para la Implementación del Gemelo Digital

Para la implementación del gemelo digital en el contexto educativo del curso ME5301 Introducción a la Mineralurgia es posible utilizar software libre como Python, R, o software especializado como por ejemplo Bruno® o Geminex® de la empresa Metso; en esta investigación se propone un software desarrollado por Metso. Este software permite simular circuitos de trituración y molienda con alto nivel de precisión, por lo cual es ideal para modelar circuitos de conminución. El

software permite visualizar cómo cambios en las condiciones de operación afectan el rendimiento del equipo, la granulometría del producto y la eficiencia del proceso, lo cual aporta un entorno interactivo y dinámico para el aprendizaje. Su interfaz amigable y enfoque en el modelado de circuitos de conminución lo hacen particularmente útil en el ámbito académico para ilustrar principios teóricos con simulaciones prácticas. El software ha sido adoptado por más de 7,000 usuarios debido a sus funcionalidades especializadas (Pursio, 2022).

Los recursos tecnológicos necesarios para su implementación incluyen:

- Software especializado: Su instalación requiere la obtención de una licencia que puede ser adquirida mediante compra o mediante acuerdos institucionales de forma gratuita para fines académicos, la cual suele estar disponible para instituciones académicas previa gestión y acuerdos.
- Computadoras de gama media/alta: Equipos con mínimo 8 GB de RAM, procesador Intel i5 o superior, y tarjeta gráfica integrada o dedicada. El software especializado escogido no requiere especificaciones avanzadas, pero es recomendable contar con estaciones de trabajo modernas para fluidez en la simulación.
- Base de datos técnica del molino de bolas: Información del fabricante o de plantas concentradoras en operación, parámetros de operación típicos y configuraciones estándar para su modelado dentro del software.
- Laboratorio de cómputo o aula equipada con acceso a internet y proyectores o pantallas para las demostraciones guiadas y análisis grupales.

En la Tabla 2 se muestra los costos aproximados para realizar la implementación; además, se consideró una licencia gratuita del software

especializado la cual es posible gestionar mediante convenios académicos de la empresa fabricante con la Universidad. No se contempla un costo adicional por concepto de computadoras (workstations o estaciones de trabajo), dado que la universidad ya dispone de modernas salas de cómputo completamente equipadas para el desarrollo de actividades académicas y tecnológicas.

Tabla 2

Costos de implementación del gemelo digital

Ítem	Cantidad	Costo unitario (USD)	Costo total (USD)
Licencia académica de software	25	\$ -	\$ -
Gastos administrativos de instalación de Software	1	\$ 1,000.00	\$ 1,000.00
Estaciones de trabajo (PC o laptops)	25	\$ -	\$ -
Mantenimiento de PC	25	\$ 25.00	\$ 625.00
Capacitación docente (curso online)	1	\$ 800.00	\$ 800.00
Recursos gráficos y visuales	1	\$ 1,000.00	\$ 1,000.00
Total estimado			\$ 3,425.00

3.3.2. Proceso Didáctico de Implementación del Gemelo Digital

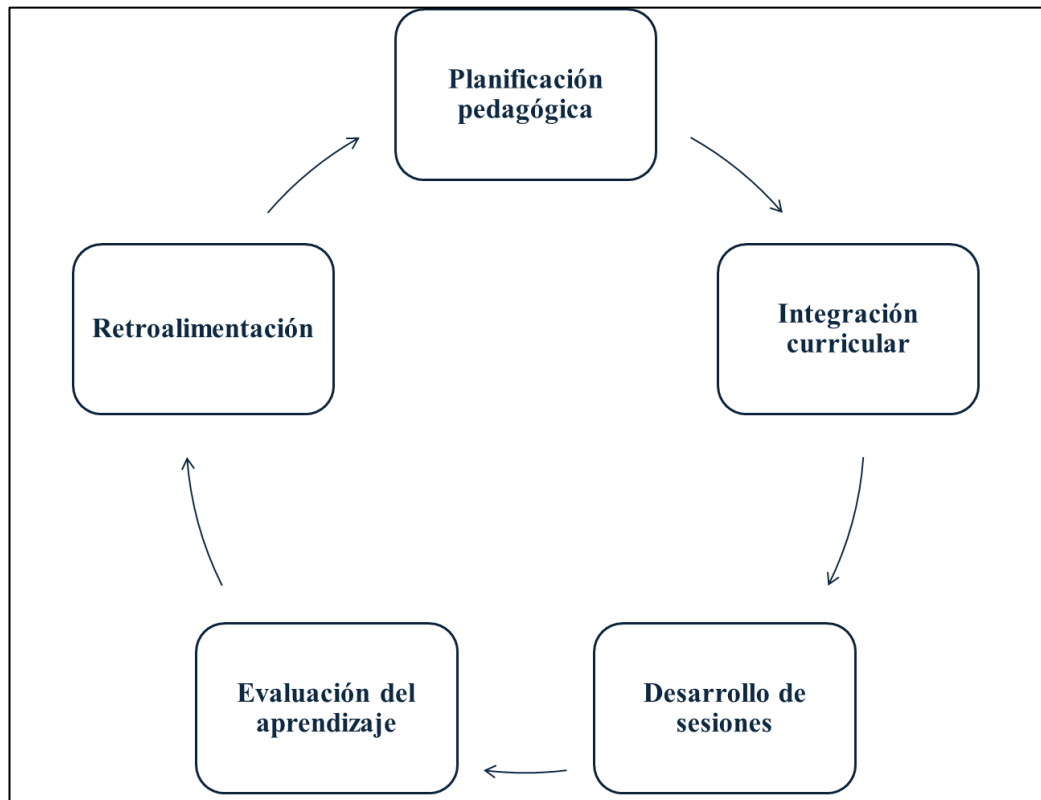
La integración del gemelo digital en el curso se estructura a través de cinco fases didácticas.

1. **Planificación Pedagógica:** Se refiere al diseño previo de la estrategia, que incluye la definición de resultados de aprendizaje, selección de contenidos a simular, y organización de sesiones prácticas con el software de gemelo digital.
2. **Integración Curricular:** Corresponde al alineamiento del gemelo digital con los resultados de aprendizaje, competencias y metodologías ya establecidas en el sílabo del curso, considerando especialmente la unidad de conminución.
3. **Desarrollo de Sesiones:** Consiste en la aplicación práctica del simulador en el aula y laboratorio, mediante actividades activas y colaborativas que permiten a los estudiantes experimentar y analizar procesos mineros de chancado y molienda.
4. **Evaluación del Aprendizaje:** Incluye instrumentos como rúbricas, informes técnicos, listas de cotejo y exposiciones, diseñados para valorar el desempeño del estudiante en el uso del gemelo digital y su comprensión del proceso simulado.
5. **Retroalimentación:** Se refiere a la recopilación de percepciones y resultados posteriores a la implementación, que permiten ajustar la propuesta, documentar la experiencia y sustentar su permanencia o ampliación a otros cursos.

En la Figura 5 se diagrama el proceso didáctico de implementación del gemelo digital en el curso en cinco etapas, iniciando con la planificación pedagógica y aplicando un modelo de mejora continua es que se consideró la retroalimentación.

Figura 5

Proceso de implementación de las 5 fases didácticas



3.3.2.1. Planificación Pedagógica (Fase Preparatoria)

La fase de planificación pedagógica constituye el punto de partida para la implementación estructurada del gemelo digital en el curso *ME5301 Introducción a la Mineralurgia*.

a) Resultados de Aprendizaje

- El estudiante simulará el funcionamiento del circuito de conminución (chancado y molienda) con software especializado.
- El estudiante interpretará datos de salida relevantes como la granulometría del producto y el consumo energético.
- El estudiante propondrá mejoras operativas a partir de escenarios simulados.
- El estudiante comunicará sus resultados con fundamento técnico, de manera clara y oportuna.

b) Contenidos del Curso

Se decidió aplicar el gemelo digital a la unidad de conminución, específicamente en las etapas de chancado primario, secundario y molienda, ya que estas operaciones unitarias poseen variables medibles y parámetros de control que el simulador de gemelo digital permite modelar en detalle.

c) Organización de las Sesiones Prácticas

Considerando el cronograma del curso y los recursos disponibles. Las simulaciones se llevarán a cabo entre las semanas 3 y 6, en un entorno de laboratorio de cómputo, donde los estudiantes podrán interactuar con el simulador en grupos, siguiendo guías de aprendizaje estructuradas. Cada sesión incluirá momentos de exploración guiada, análisis de datos, discusión colaborativa y elaboración de productos evaluables (informes, presentaciones o propuestas técnicas).

3.3.2.2. Integración Curricular (Fase de Diseño Pedagógico)

La aplicación del simulador se ha concentrado exclusivamente entre las semanas 3 a 6 del curso, ya que es durante este periodo donde se abordan los

contenidos relacionados con los procesos de conminución según lo establece el sílabo oficial del curso *ME5301 – Introducción a la Mineralurgia* (UTECH, 2024a). El software propuesto permite modelar de forma precisa circuitos de chancado y molienda, proporcionando datos reales que facilitan la comprensión del comportamiento de los equipos en condiciones operativas diversas. En cambio, las otras unidades del curso como flotación, lixiviación, concentración gravimétrica, separación sólido-líquido, relaves, comercialización y geometalurgia, si bien son fundamentales en el procesamiento de minerales, requieren enfoques más teórico-prácticos basados en principios físico-químicos, cálculos y análisis de casos. Por lo tanto, esas unidades diferentes a la conminución se desarrollan de otra forma diferente al uso del simulador. En ese sentido, la decisión de limitar el uso del gemelo digital a las semanas 3 a 6 responde a una lógica curricular y metodológica, asegurando que la herramienta se utilice donde tiene mayor impacto formativo, sin desarticular el resto de la estructura del curso ni forzar su aplicación en temas que requieren otras estrategias didácticas.

La estrategia metodológica contempla:

- **Uso del simulador** como herramienta central para la exploración de variables operativas.
- **Diseño de sesiones activas** con guías de aprendizaje orientadas a la resolución de problemas reales de planta.
- **Trabajo colaborativo** en pequeños grupos para fomentar el análisis, la discusión técnica y la toma de decisiones.
- **Evaluación formativa y sumativa** mediante rúbricas de desempeño, informes técnicos y presentaciones orales.

En la Tabla 3 se presenta el plan de clase propuesto, el cual incorpora actividades didácticas centradas en la simulación mediante gemelo digital, que constituye el eje metodológico principal de esta propuesta. Cada actividad está vinculada a un instrumento de evaluación diseñado específicamente para valorar el aprendizaje logrado a través de la experimentación virtual, el análisis técnico y la aplicación de conceptos en escenarios simulados, asegurando así una evaluación coherente con los objetivos formativos y el enfoque activo del curso.

Tabla 3

Plan de clases y sesiones con aplicación del gemelo digital

Semana	Sesión 1 (2h)	Sesión 2 (2h)	Instrumento de evaluación
3	Principales procesos del beneficio de minerales	Introducción al simulador y simulación de proceso general de conminución	Lista de cotejo de ejecución.
4	Fundamentos y principios de trituración y clasificación	Simulación del circuito de trituración y clasificación (curvas y parámetros)	Rúbrica de análisis técnico individual.
5	Fundamentos y principios de molienda y clasificación	Simulación de molienda (molino SAG y bolas) y evaluación energética	Informe técnico grupal.
6	Fundamentos y principios de concentración por flotación	Simulación de circuito completo de conminución + elaboración de informe técnico	Exposición oral con rúbrica más autoevaluación.

Como parte de la propuesta metodológica, se justifica la elaboración de guías de estudio específicas destinadas a orientar y acompañar a los estudiantes durante el proceso de aprendizaje con el gemelo digital. Estas guías no solo estructurarían el uso pedagógico del simulador, sino que también proporcionarían indicaciones claras sobre su funcionamiento, los objetivos de cada actividad, las competencias a desarrollar y los criterios de evaluación asociados. Su implementación facilitaría el trabajo autónomo del estudiante, permitiéndole avanzar de forma progresiva en la comprensión de los procesos de conminución simulados, al tiempo que fortalece la toma de decisiones técnicas fundamentadas. Asimismo, estas herramientas contribuirían a reducir la curva de aprendizaje asociada al uso de entornos digitales complejos y asegurarían la alineación entre los contenidos, la metodología activa y los instrumentos de evaluación, en coherencia con los resultados de aprendizaje del curso. La inclusión de guías de estudio responde, por tanto, a una necesidad pedagógica clave para garantizar la efectividad del uso del gemelo digital como recurso educativo.

3.3.2.3. Desarrollo de Sesiones de Aprendizaje (Fase de Aplicación Práctica)

Estas sesiones se desarrollarán en laboratorios de cómputo. Las actividades incluyen: Modelado del proceso del sistema de conminución; Simulación de escenarios con distintas condiciones (variación de velocidad, carga, tipo de mineral, etc.); Registro y análisis de resultados generados por el software (curvas de rendimiento, eficiencia, tamaño de partícula, etc.); Debate y reflexión sobre decisiones operativas simuladas.

En la Tabla 4 se muestra la propuesta de las sesiones con gemelo digital en el curso con su objetivo y el instrumento propuesto.

Tabla 4

Matriz de planificación de sesiones con gemelo digital

Semana	Actividades de aprendizaje (4h)	Actividad con el gemelo digital	Objetivo de la actividad con el gemelo digital	Instrumento de evaluación
3	Principales procesos del beneficio de minerales e introducción al simulador con simulación de proceso general de conminución	Configuración inicial del gemelo digital para representar un proceso general de conminución. Interacción básica con el entorno virtual.	Familiarizar al estudiante con el entorno del gemelo digital y representar un proceso básico de conminución.	Lista de cotejo de ejecución
4	Fundamentos y principios de trituración y clasificación. Simulación del circuito de trituración y clasificación (curvas y parámetros)	Ajuste de parámetros en el gemelo digital para observar cambios en curvas de eficiencia y clasificación. Análisis de escenarios.	Comprender el impacto de los parámetros operacionales en la eficiencia del circuito de trituración y clasificación.	Lista de cotejo de ejecución
5	Fundamentos y principios de molienda y clasificación. Simulación de molienda (molino SAG y bolas) y evaluación energética	Aplicación del gemelo digital para modelar el rendimiento energético en molienda. Comparación de tipos de molinos.	Evaluar el consumo energético y la eficiencia en diferentes configuraciones de molienda usando el gemelo digital.	Informe técnico grupal
6	Fundamentos y principios de concentración por flotación.	Integración de todas las etapas modeladas en el gemelo digital. Evaluación del	Analizar el comportamiento del proceso completo de conminución y su	Exposición oral con rúbrica

Simulación de circuito completo de conminución y elaboración de informe técnico	rendimiento global del proceso mineralúrgico.	influencia en la etapa de concentración.
--	--	--

3.3.2.4. Evaluación del Aprendizaje (Fase de Valoración Formativa y Sumativa)

La evaluación del aprendizaje (fase de valoración formativa y sumativa) se realiza en tres niveles: el cognitivo, que evalúa la comprensión de los principios físicos que rigen el proceso de molienda; el procedimental, que valora el manejo del simulador, la ejecución de las simulaciones y el análisis técnico de los resultados; y el actitudinal, que considera la participación activa, el trabajo colaborativo y la comunicación efectiva.

Se propone emplear instrumentos de evaluación como: Lista de cotejo de ejecución; Informe técnico grupal; Exposición oral con rúbrica. La nota final sobre 20 obtenida por los estudiantes será la nota de la práctica calificada 2.

En el marco de la evaluación formativa propuesta, se emplean instrumentos como la lista de cotejo y la rúbrica de desempeño, diseñados para valorar de manera objetiva y gradual el proceso de aprendizaje mediante simulación con gemelo digital. La lista de cotejo se aplica en actividades prácticas iniciales para verificar la ejecución de procedimientos específicos, mientras que la rúbrica permite evaluar el análisis técnico individual, la comunicación de resultados y la toma de decisiones en situaciones simuladas. Desde el enfoque técnico, ambos instrumentos deben garantizar validez de contenido, pertinencia y coherencia con las competencias del curso. Por ello, se recomienda su validación a través del juicio de expertos,

conformado por docentes con experiencia en enseñanza en ingeniería, diseño instruccional y uso de tecnologías educativas. Este proceso permite evaluar la claridad de los criterios, la relevancia de los indicadores y la alineación con los resultados de aprendizaje esperados, asegurando así la calidad y rigurosidad en la evaluación del desempeño estudiantil.

En la Tabla Tabla 5 se muestra la lista de cotejo propuesta para la sesión de la semana 3 que sobre el uso general de la simulación.

Tabla 5

Lista de cotejo de ejecución semana 3, simulación general de conminución

Nro	Criterio de evaluación	Logrado	En proceso	No logrado
1	Accede correctamente al simulador y configura el entorno de trabajo.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2	Reconoce los principales equipos y etapas del proceso de conminución.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3	Ejecuta correctamente la simulación del proceso general.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4	Identifica la secuencia lógica del flujo del material.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5	Participa activamente durante la actividad práctica.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

En la Tabla 6 se muestra la lista de cotejo para la semana 4.

Tabla 6

Lista de Cotejo semana 4, Análisis: trituración y clasificación

Nro	Criterio de evaluación	Logrado	En proceso	No logrado
1	Interpreta correctamente las curvas granulométricas obtenidas en el simulador.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2	Ajusta parámetros técnicos (tamaño de apertura, velocidad, etc.) según requerimiento.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3	Analiza la relación entre variables operativas y eficiencia del proceso.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4	Justifica los cambios realizados en la simulación con argumentos técnicos.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5	Presenta sus hallazgos con claridad y soporte técnico.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

En la Tabla 7 se muestra la rúbrica para el informe técnico grupal.

Tabla 7

Semana 5 – Rúbrica de Evaluación del Informe Técnico Grupal

Criterio	Excelente (4)	Bueno (3)	Regular (2)	Deficiente (1)
Estructura del informe	El informe está perfectamente organizado, con redacción clara y sin errores.	Organización adecuada y redacción comprensible.	Organización poco clara y algunos errores de redacción.	Informe desorganizado, con múltiples errores.
Análisis técnico	El análisis es profundo, técnico y bien fundamentado.	Análisis adecuado, con buena fundamentación.	Análisis básico, con poco sustento.	Análisis débil o ausente.
Interpretación de simulaciones	Interpreta correctamente los resultados de simulación y los relaciona con la teoría.	Interpreta en general bien, con algunas omisiones.	Interpretación superficial o incompleta.	No interpreta correctamente los resultados.
Propuestas de mejora	Propone mejoras innovadoras y viables con base técnica.	Propone mejoras adecuadas y razonables.	Propone mejoras generales sin sustento técnico.	No propone mejoras o estas son irrelevantes.
Trabajo en equipo	Evidente coordinación, distribución de tareas y colaboración.	Buena colaboración, con coordinación aceptable.	Participación desigual entre los integrantes.	Falta de colaboración evidente.

En la Tabla 8 se muestra la rúbrica de la exposición oral que se realizará en equipos pero la nota será individual.

Tabla 8

Semana 6 – Rúbrica de Evaluación de Exposición Oral

Criterio	Excelente (4)	Bueno (3)	Regular (2)	Deficiente (1)
Contenido técnico	Preciso, completo y con adecuado uso de términos técnicos.	Contenido correcto pero con pequeños errores.	Contenido superficial o incompleto.	Contenido erróneo o irrelevante.
Claridad y coherencia	Explica ideas con fluidez, claridad y buena secuencia.	Explica con claridad general, pero con leves desórdenes.	Explicación confusa en partes clave.	Explicación poco clara o incoherente.
Uso de recursos visuales	Recursos visuales bien diseñados, relevantes y bien integrados.	Recursos adecuados pero con algunos aspectos mejorables.	Recursos básicos o mal organizados.	No utiliza recursos visuales o estos son irrelevantes.
Dominio del tema	Evidente dominio del tema, responde con solvencia.	Muestra buen dominio, responde en su mayoría adecuadamente.	Dudas frecuentes o falta de seguridad.	Evidencia desconocimiento del tema.
Interacción y manejo del tiempo	Mantiene el interés del público y respeta el tiempo asignado.	Interacción aceptable y uso eficiente del tiempo.	Poca interacción o excede/reduce el tiempo notablemente.	No interactúa o mal uso del tiempo.

En la Tabla 9 se muestra un consolidado de las evaluaciones para medir el resultado de aprendizaje, para asegurar el logro de los aprendizajes, se usará el código NPP por nota parcial de práctica.

Tabla 9

Resumen de las evaluaciones

Semana	Actividad Evaluada	Instrumento de Evaluación	Criterios Principales	Ponderación	Código
Semana 3	Simulación general del proceso de conminución	Lista de cotejo de ejecución	Ejecución, comprensión del flujo, participación	12.5% de PC2	NPP1
Semana 4	Simulación de trituración y clasificación	Lista de cotejo de análisis técnico	Análisis de parámetros, interpretación de curvas	12.5% de PC2	NPP2
Semana 5	Informe técnico grupal (simulación de molienda)	Rúbrica analítica (escala 0–20)	Redacción, análisis técnico, propuestas, trabajo en equipo	25% de PC2	NPP3
Semana 6	Exposición oral de resultados y simulación final	Rúbrica analítica (escala 0–20)	Contenido técnico, claridad, recursos visuales, dominio del tema, interacción	50% de PC2	NPP4

Según la ecuación 1 para determinar la nota final de las prácticas calificadas (PC) se toma el promedio de 4 prácticas calificadas donde se elimina la nota más baja; en ese sentido, la nota obtenida del simulador será la nota PC2, la cual se calculará como se muestra en la ecuación 3.

$$PC2 = \frac{(12.5 \times NPP1 + 12.5 \times NPP2 + 25 \times NPP3 + 50 \times NPP4)}{100} \quad (3)$$

En la Tabla 10 se muestra la escala de evaluación a utilizar, siempre considerando que la nota del curso es de máximo 20, estos resultados ayudarán al docente a enfocar energías para apoyar a los estudiantes que necesiten mayor soporte docente y también permite identificar a los estudiantes con los cuales se puede explotar aun más la herramienta de gemelo digital propuesta.

Tabla 10

Escala de evaluación usada

Evaluación	Nota
Excelente	18 - 20
Bueno	14 - 17
Regular	11 - 13
Deficiente	≤10

3.3.2.5. Retroalimentación y Mejora Continua (Fase de Ajuste)

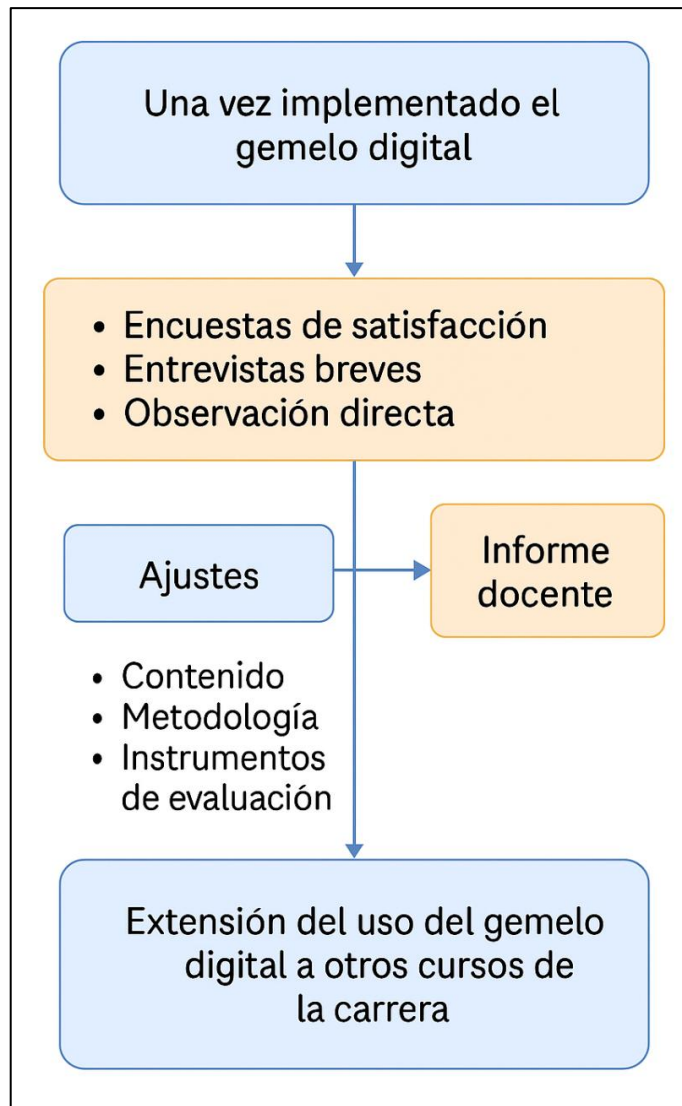
Una vez implementado el gemelo digital, se recogen opiniones de los estudiantes mediante encuestas de satisfacción, entrevistas breves y observación directa. Esta información permite al docente realizar ajustes al contenido, a la metodología o a los instrumentos de evaluación.

Además, se puede sistematizar la experiencia en un informe docente, que sirva como insumo para futuras mejoras del curso y para proponer la extensión del uso del gemelo digital a otros cursos de la carrera.

En la Figura 6 se representa el proceso de retroalimentación posterior a la implementación del gemelo digital en el curso. Este proceso se inicia con la recolección de información mediante instrumentos cualitativos como encuestas de satisfacción, entrevistas breves y observación directa en el aula. Estas herramientas permiten recopilar percepciones del estudiantado sobre la utilidad pedagógica del gemelo digital, la claridad de los contenidos y la efectividad de las actividades prácticas. A partir de dicha información, el docente puede realizar ajustes específicos en tres dimensiones clave: los contenidos del curso, adaptando su profundidad o secuencia; la metodología, incorporando o mejorando estrategias de enseñanza activas; y los instrumentos de evaluación, asegurando su alineación con las competencias desarrolladas a través de la simulación. Como parte del proceso, se elabora un informe docente que sistematiza los hallazgos y las acciones implementadas, sirviendo como evidencia y punto de partida para la mejora continua. Finalmente, esta retroalimentación no solo impacta en la optimización del curso, sino que también permite proyectar la extensión del uso del gemelo digital a otras asignaturas de la carrera, consolidando así su integración curricular a mayor escala. Este enfoque se sustenta en propuestas pedagógicas que valoran la evaluación formativa como mecanismo para ajustar la enseñanza en función de la experiencia y el análisis reflexivo (Bain, 2004).

Figura 6

Diagrama de retroalimentación y mejora continua



3.3.3. Ruta de Institucionalización para la Implementación del Gemelo Digital

La institucionalización de una innovación educativa, como el gemelo digital, requiere una estrategia estructurada que vaya más allá de su simple implementación inicial. Según Fullan (2015), el cambio educativo significativo implica un proceso continuo que abarca desde la introducción de la innovación hasta su consolidación como práctica habitual dentro del sistema educativo. Para

lograr dicha institucionalización, es fundamental integrar formalmente la innovación en la gestión curricular, garantizar el compromiso de los actores clave y asegurar el soporte organizacional que permita su sostenibilidad y mejora continua. Esta perspectiva reconoce que una innovación solo se convierte en transformación real cuando es adoptada colectivamente, apoyada por estructuras institucionales y capaz de adaptarse en el tiempo.

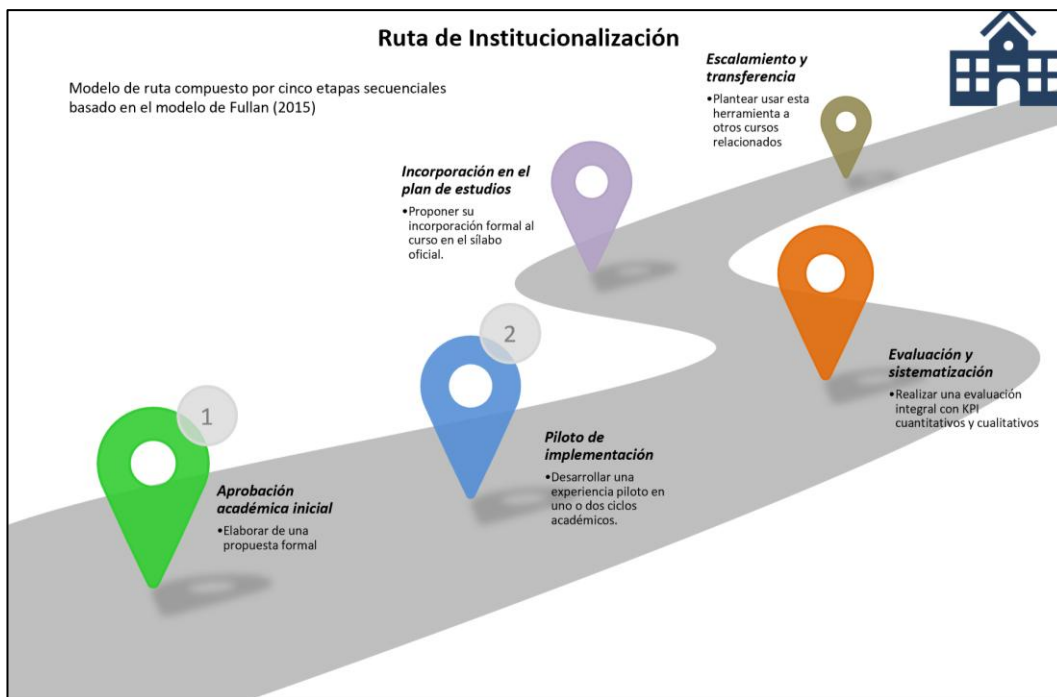
A continuación, se presenta un modelo de ruta compuesto por cinco etapas secuenciales basado en el modelo de Fullan (2015):

1. Aprobación Académica Inicial
2. Piloto de Implementación
3. Evaluación y Sistematización
4. Incorporación en el Plan de Estudios
5. Escalamiento y Transferencia

En la Figura 7 muestra el diagrama resumido para lograr con éxito la institucionalización del gemelo digital, es importante resaltar que el objetivo es medir y proponer hacia otros cursos como una buena práctica docente.

Figura 7

Diagrama para la implementación del gemelo digital



3.3.3.1. Aprobación Académica Inicial

El proceso comienza con la elaboración de una propuesta formal por parte del docente responsable del curso, la cual debe presentarse ante la directora del programa académico. Esta propuesta debe incluir el sustento pedagógico, los beneficios para el aprendizaje, el cronograma de implementación, los requerimientos técnicos, y un presupuesto estimado.

3.3.3.2. Piloto de Implementación

Con la aprobación inicial, se procede al desarrollo de una experiencia piloto en uno o dos ciclos académicos. Durante esta fase se aplica el gemelo digital con un grupo reducido de estudiantes, se evalúa su impacto en el aprendizaje, y se ajustan los recursos didácticos según las necesidades detectadas. Esta fase tiene

como objetivo generar evidencia empírica que permita sustentar su continuidad y escalamiento.

3.3.3.3. Evaluación y Sistematización

Luego del piloto, se realiza una evaluación integral que recoge tanto indicadores cuantitativos (rendimiento académico, participación, eficiencia en resolución de problemas) como cualitativos (percepciones del estudiantado y docente, observaciones en clase, análisis de informes técnicos). Esta información se sistematiza en un documento técnico o informe docente que se presenta ante las autoridades académicas para justificar la siguiente fase.

3.3.3.4. Incorporación en el Plan de Estudios

Una vez demostrado el impacto positivo del gemelo digital, se propone su incorporación formal como parte de las actividades regulares del curso en el sílabo oficial. Esto implica incluirlo como una herramienta metodológica dentro del diseño curricular, detallando sesiones específicas de uso, resultados de aprendizaje vinculados y criterios de evaluación. Esta etapa requiere coordinación con la Dirección de Currículo o el área de innovación educativa de la universidad.

3.3.3.5. Escalamiento y Transferencia

Finalmente, se plantea la posibilidad de escalar la herramienta a otros cursos relacionados con operaciones unitarias, simulación de procesos, o automatización minera, tanto a nivel de pregrado como posgrado. Asimismo, se puede compartir la experiencia a través de ponencias en jornadas pedagógicas, artículos académicos o talleres de formación docente, promoviendo una cultura institucional de innovación educativa basada en tecnologías digitales.

4. CONCLUSIONES

1. **Se logró desarrollar la propuesta de la implementación de los gemelos digitales en el curso de Introducción a la Mineralurgia en una universidad privada de Lima.** La propuesta constituye una alternativa metodológica válida para modernizar la enseñanza universitaria en el curso de Introducción a la Mineralurgia. En comparación con los antecedentes revisados, donde los gemelos digitales se aplican mayoritariamente en contextos industriales, esta propuesta traslada creativamente sus beneficios al ámbito educativo, alineándose con las tendencias actuales de transformación digital en la formación profesional.
2. **Se determinó el referente y recursos necesarios para la implementación del gemelo digital en el curso de Introducción a la Mineralurgia en una universidad privada de Lima.** La identificación del referente teórico y tecnológico permitió sustentar la viabilidad del gemelo digital como recurso pedagógico. Se definieron los recursos necesarios (software, hardware, formación docente) y se estableció un marco conceptual basado en el aprendizaje activo, la simulación y la inteligencia artificial. Este resultado se alinea con experiencias documentadas en otros países, donde la incorporación de simuladores en la educación técnica ha generado mejoras en la comprensión operativa y toma de decisiones de los estudiantes.
3. **Se logró diseñar el proceso didáctico de implementación del gemelo digital, en el curso de Introducción a la Mineralurgia en una universidad privada de Lima.** El proceso didáctico diseñado responde a cinco fases clave que garantizan una implementación estructurada y coherente con el currículo vigente. A través de la planificación pedagógica,

la integración con el sílabo, el desarrollo de sesiones prácticas con el simulador, la evaluación formativa y la retroalimentación, se genera una experiencia de aprendizaje significativa. Esta estructura responde a la necesidad identificada en los antecedentes de pasar de un modelo expositivo a uno centrado en el estudiante, favoreciendo el pensamiento crítico y la capacidad de análisis técnico.

- 4. Se diseñó una ruta de institucionalización para la implementación del gemelo digital en el curso de Introducción a la Mineralurgia en una universidad privada de Lima.** El diseño de una ruta de institucionalización asegura la continuidad y escalabilidad del uso del gemelo digital más allá del curso piloto. Se propone una estrategia que incluye la formalización curricular, el acompañamiento docente y la documentación de resultados para su expansión a otras asignaturas. Esta visión a largo plazo responde a la carencia, detectada en los antecedentes, de propuestas sostenibles y sistemáticas en la incorporación de tecnología digital en la educación superior en cursos de minería.

5. RECOMENDACIONES

- 1. Incorporar progresivamente herramientas de simulación digital en los cursos de la Universidad.** Se recomienda a los docentes explorar e integrar herramientas como los simuladores en sus sesiones de clase, especialmente en temas donde los procesos físicosquímicos puedan ser modelados virtualmente. Esto permitirá fortalecer el enfoque de aprendizaje activo, mejorar la comprensión operativa y fomentar la toma de decisiones basada en datos, tal como se evidenció en esta propuesta.
- 2. Desarrollar competencias digitales para la enseñanza.** Se sugiere que los docentes participen en programas de capacitación orientados al uso pedagógico de simuladores, software de modelado y gemelos digitales. Esta preparación fortalecerá su rol como facilitadores del aprendizaje tecnológico y permitirá una implementación efectiva de recursos digitales que respondan a las demandas de la industria 4.0.
- 3. Formalizar curricularmente el uso del gemelo digital en cursos clave de la carrera.** La universidad debe considerar la incorporación formal del uso de simuladores digitales como parte del diseño curricular de asignaturas técnicas como Introducción a la Mineralurgia, asegurando así la sostenibilidad de estas innovaciones pedagógicas. Esta acción permitirá institucionalizar prácticas de enseñanza modernas alineadas con las necesidades actuales del sector minero.
- 4. Asignar recursos para la infraestructura tecnológica y el acompañamiento docente.** Se recomienda que la institución destine recursos específicos para la implementación de gemelos digitales, incluyendo licencias de software, equipos de cómputo adecuados, y un plan

de formación docente. Esto garantizará que las iniciativas no se limiten a experiencias piloto, sino que se consoliden como parte integral del proceso de formación profesional.

- 5. Profundizar en estudios sobre la efectividad del gemelo digital en el aprendizaje.** Se sugiere que futuras investigaciones evalúen el impacto del uso de gemelos digitales en indicadores específicos de aprendizaje, como el desarrollo de habilidades de análisis técnico, resolución de problemas y desempeño en prácticas preprofesionales. Esto permitirá generar evidencia cuantitativa y cualitativa que respalde la expansión de estas metodologías.
- 6. Explorar aplicaciones del gemelo digital en otras unidades curriculares y contextos educativos.** Se recomienda investigar la viabilidad de aplicar gemelos digitales en otras asignaturas así como en programas de formación técnica o educación continua. Ello contribuiría a extender los beneficios de esta tecnología a distintos niveles de enseñanza y a diversas áreas del procesamiento de minerales en la industria minera.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Angrosino, M. (2012). *Doing Ethnographic and Observational Research*. SAGE Publications.
- Arciniega, G., & Torres, Y. (2020). Metodologías de enseñanza en educación superior en Latinoamérica: Mapeo sistemático de literatura. *Polo del Conocimiento*, 5(4), 325-355.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7506204>
- Bain, K. (2004). *What the best college teachers do*. Harvard University Press.
- Banks, J., Carson, J. S., Nelson, B. L., & Nicol, D. M. (2010). *Discrete-event system simulation* (5th ed.). Pearson Education.
- Beloglazov, I., Petrov, P., & Bazhin, V. (2020). The concept of digital twins for tech operator training simulator design for mining and processing industry. *Eurasian Mining*. <https://doi.org/10.17580/EM.2020.02.12>
- Bowen, G. A. (2009). Document analysis as a qualitative research method. *Qualitative Research Journal*, 9(2), 27-40.
- ChatGPT. (2025). Gemelo digital para la Enseñanza en Minerología [Infografía generada por inteligencia artificial]. OpenAI. <https://chat.openai.com>
- Creswell, J. W. (2014). *Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches* (4th ed.). SAGE Publications.
- Delboni, H., Jr., Costa e Silva, E., Kronemberger Alves, V., & Chierigati, A. C. (2022). Pre-processing to increase the capacity of SAG mill circuits—Case study. *Minerals*, 12(6), 727. <https://doi.org/10.3390/min12060727>
- Fullan, M. (2015). *The new meaning of educational change* (5th ed.). Teachers College Press.

- Guevara Medina, C. C. (2020). Implementación de Flipped Classroom para promover el aprendizaje en el aula de los alumnos del curso de introducción de los negocios en la UTEC del año 2019 [Tesis de maestría, Universidad de San Martín de Porres]. Repositorio Institucional USMP. <https://hdl.handle.net/20.500.12727/6814>
- Hanccoccallo Saico, L. A., Ruiz Minaya, M. A., & Villar Zamora, L. J. D. (2023). Roadmap tecnológico para el proceso de explotación de la Unidad Minera Constancia [Tesis de maestría, Pontificia Universidad Católica del Perú]. <https://tesis.pucp.edu.pe/items/71aef768-c2bb-4f08-8873-e8f9d41871b9>
- Hernández-Sampieri, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). Metodología de la investigación (6ª ed.). McGraw-Hill.
- Kelly, E. G., & Spottiswood, D. J. (1982). Introduction to Mineral Processing. New York: John Wiley & Sons.
- Menon, D., Anand, B., & Chowdhary, C. L. (2023). Digital Twin: Exploring the Intersection of Virtual and Physical Worlds. IEEE Access. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3294985>
- Metso. (2023). Geminex™: Gemelo digital metalúrgico [Folleto]. Metso Corporation. <https://www.metso.com>
- Metso Outotec. (2020). Basics in Minerals Processing (12th ed.). Helsinki: Metso Corporation.
- Miles, M. B., Huberman, A. M., & Saldaña, J. (2014). Qualitative Data Analysis: A Methods Sourcebook (3rd ed.). SAGE Publications.
- Miskinis, C. (2019). The history of digital twins. Challenge Advisory. Recuperado de <https://www.challenge.org/insights/digital-twin-history/>

- Nobahar, P., Xu, C., Dowd, P., & Shirani Faradonbeh, R. (2024). Exploring digital twin systems in mining operations: A review. *Green and Smart Mining Engineering*, 1(2024), 474–492. <https://doi.org/10.1016/j.gsme.2024.09.003>
- Pun Lay Miranda, S. del C., Del Alamo Carrillo, H. J., Gamarra Rojas, R. A. H., & Muñoz Sagarvinaga, L. (2024). Gemelo Digital en el área de mantenimiento del SIMA Perú [Tesis de maestría, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. Repositorio Institucional de la UPC. <http://hdl.handle.net/10757/676197>
- Pursio, S. (2022, 2 de diciembre). Over 7,000 users choose Bruno simulation software. Metso. <https://www.metso.com/insights/blog/aggregates/users-choose-bruno-software/>
- Raja, S. A., & Muthuswamy, P. (2023). Industry 5.0 or industry 4.0S? Introduction to industry 4.0 and a peek into the prospective industry 5.0 technologies. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 17, 947–979. <https://doi.org/10.1007/s12008-023-01217-8>
- Ramos, H. S., & Torres Rivera, D. O. (2023). Metodología basada en inteligencia artificial en la gestión del mantenimiento 4.0 [Tesis de maestría, Universidad de Piura]. Repositorio Institucional UDEP. <https://pirhua.udep.edu.pe/item/6297987f-2a48-4763-82d1-0a1ccb2dc782>
- Sánchez de León, A. (2023). Optimización de una planta de fabricación industrial con la ayuda de gemelos digitales [Tesis de maestría, Universidad Politécnica de Madrid]. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. Repositorio Institucional UPM. <https://oa.upm.es/75989/>

- Tarazona, R. V. (2022). Influencia de las herramientas digitales en el aprendizaje de los estudiantes de una Universidad de Lima, 2021 [Tesis de maestría, Universidad César Vallejo]. Repositorio Institucional UCV. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/96101>
- Universidad de Ingeniería y Tecnología (UTEC). (2024a). Sílabo del curso ME5301 – Introducción a la Mineralurgia. UTEC.
- Universidad de Ingeniería y Tecnología (UTEC). (2024b). Encuesta de satisfacción del curso ME5301 – Introducción a la Mineralurgia. UTEC.
- UTEC Posgrado. (2023). Gemelos digitales: La transformación virtual de la industria. [Entrada de blog]. Universidad de Ingeniería y Tecnología (UTEC). Recuperado de <https://posgrado.utec.edu.pe/blog/gemelos-digitales-la-transformacion-virtual-de-la-industria>
- Wills, B. A., & Finch, J. (2015). Wills' Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery (8th ed.). Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Yin, R. K. (2018). Case Study Research and Applications: Design and Methods (6th ed.). SAGE Publications.
- Tao, F., Zhang, H., Liu, A., & Nee, A. Y. C. (2019). Digital twin in industry: State-of-the-art. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15(4), 2405–2415. <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2873186>