

HYDROTWIN: MODELADO
DIGITAL PARA LA
PRODUCCIÓN DE
BIOHIDRÓGENO A PARTIR
DE FERMENTACIÓN OSCURA

LAURA DANIELA ALBA
BARRERA

JUAN CAMILO OSPINA
CHACON

TUTOR

JOHN JAIRO PORRAS VEGA

UNIVERSIDAD EAN
FACULTAD DE INGENIERIA
BOGOTA D.C

27 de Abril de 2025

1.	Resumen.....	2
2.	Introducción	3
3.	Objetivos.....	4
4.	Definición del problema	4
5.	Justificación	5
6.	Marco Teórico	7
6.1.	Fermentación Oscura	7
	6.1.1. Beneficios de la fermentación oscura	7
6.2.	Biodigestor en fermentación oscura.....	9
6.3.	Gemelo Digital.....	10
	6.3.1. Características.....	12
	6.3.2. Estructura de gemelos digitales	12
	6.3.3. Programas para desarrollo de gemelos digitales.....	13
	6.3.4. Modelo Digitales.....	15
6.4.	Casos de estudio de gemelos digitales para producción de biohidrógeno.	16
7.	Análisis de restricciones	18
8.	Metodología de selección y desarrollo de la solución.....	20
9.	Costos	22
10.	Desarrollo Gemelo Digital.....	25
10.1.	Diseño Blender	25
10.2.	Diseño Unreal	31
11.	Conclusiones	34
12.	Bibliografía	35

1. Resumen

El presente documento describe el contexto inicial y la propuesta innovadora del proyecto, cuyo objetivo es desarrollar un gemelo digital para escalar industrialmente la producción de biohidrógeno a partir de carga orgánica. Así mismo, este modelo virtual altamente preciso permite simular el proceso de fermentación oscura, permitiendo evaluar y ajustar variables críticas, tales como la temperatura, el pH, la relación sustrato-inóculo y la carga orgánica, antes de su implementación a gran escala.

Este proyecto se presenta como una solución que no solo transforma un subproducto (carga orgánica) de desecho en valor, sino que también contribuye a la economía circular, en un entorno donde la búsqueda de fuentes de energía limpias y sostenibles es cada vez más prioritaria ante los desafíos del cambio climático y la necesidad de transicionar hacia modelos renovables.

Palabras Claves

Gemelo Digital, Biorreactor, Biohidrógeno, Modelo digital, Simulación de Bioprocesos.

Abstract

The present document describes the initial context and the innovative proposal of the project, which aims to develop a digital twin to scale up the industrial production of biohydrogen from organic load. Likewise, this highly precise virtual model enables the simulation of the dark fermentation process, allowing for the evaluation and adjustment of

critical variables such as temperature, pH, substrate-inoculum ratio, and organic load before large-scale implementation.

This project is presented as a solution that not only transforms a byproduct (organic load) from waste into value but also contributes to the circular economy. It does so in a context where the search for clean and sustainable energy sources is increasingly prioritized due to the challenges of climate change and the urgent need to transition toward renewable models.

Key Words

Digital Twin, Bioreactor, Biohydrogen, Digital Model, Bioprocess Simulation.

2. Introducción

La creciente preocupación por el cambio climático y la contaminación ha encaminado a la investigación de nuevas alternativas para los combustibles fósiles, los cuales continúan siendo la principal fuente de energía a nivel mundial. Sin embargo, su uso masivo genera graves problemas ambientales, como el calentamiento global, la degradación de ecosistemas, así como la incertidumbre sobre su disponibilidad futura. En respuesta a esta problemática, se han desarrollado diversas estrategias para la producción de energías limpias y sostenibles, entre las que destaca el biohidrógeno, una fuente de energía renovable con alto potencial para reemplazar a los combustibles fósiles en diversas aplicaciones industriales y de movilidad. (Ratia, J, 2024)

Uno de los métodos más prometedores para la producción de biohidrógeno es la fermentación oscura, un proceso biológico en el que microorganismos anaerobios descomponen residuos orgánicos en ausencia de oxígeno, liberando hidrógeno como subproducto. (*Khan Academy*, s. f.)

Este método permite aprovechar la carga orgánica de residuos agroindustriales para transformarlos en energía, fomentando así el concepto de economía circular y minimizando el impacto ambiental. No obstante, la optimización de este proceso a escala industrial requiere un monitoreo preciso de variables como la temperatura, el pH, la relación sustrato-inóculo y la carga orgánica, factores que influyen directamente en la eficiencia de la producción de biohidrógeno.

Para abordar estos desafíos, este proyecto propone el desarrollo de un gemelo digital que permita simular y analizar el proceso de fermentación oscura en un entorno virtual antes de su implementación en sistemas reales, a escala industrial. Un gemelo digital es una réplica virtual dinámica de un sistema físico que permite modelar su comportamiento en tiempo real, facilitando la identificación de condiciones óptimas, la predicción de perturbaciones y la toma de decisiones estratégicas para mejorar su eficiencia. La implementación de esta tecnología no solo reducirá costos operativos y experimentales, sino que también permitirá una transición más efectiva de la investigación en laboratorio a su escalado industrial.

3. Objetivos.

Objetivo general: Desarrollar un gemelo digital que visualice el proceso de producción de biohidrógeno en una reacción de fermentación oscura orientado a aspectos de medición.

Objetivos específicos:

- Diseñar un modelo digital que represente el proceso de fermentación oscura a partir de materia orgánica en biorreactores.
- Simular las condiciones operativas críticas del proceso, como temperatura, pH, relación sustrato-inóculo y carga orgánica, mediante el uso del gemelo digital.
- Realizar una comparativa del sistema teórico con el comportamiento del gemelo digital.
- Desarrollar la imagen gráfica del modelo digital incorporando el modelo matemático para la simulación.

4. Definición del problema

En el mundo actual, la industria enfrenta desafíos constantes para optimizar procesos, reducir costos y minimizar impactos ambientales. En este contexto, el gemelo digital se posiciona como una herramienta tecnológica emergente con un alto potencial disruptivo.

Un gemelo digital es una réplica virtual de un proceso físico, que permite simular, analizar y optimizar su comportamiento en tiempo real. Esta tecnología combina modelos matemáticos avanzados, simulaciones interactivas y datos en tiempo real para predecir y ajustar el desempeño de sistemas complejos antes de su implementación física, lo que facilita la toma de decisiones estratégicas en la industria.

En sectores como la agroindustria y la producción de biocombustibles, la gestión de residuos orgánicos con alto potencial energético sigue siendo un reto. Por ejemplo, el

lactosuero, un subproducto de la industria láctea, se genera en grandes volúmenes durante la producción de quesos y otros derivados lácteos. Su disposición ambiental inadecuada puede causar impactos negativos en ecosistemas y recursos hídricos debido a su alto contenido orgánico (Rodríguez et al., 2020; Gómez & Sánchez, 2018). No obstante, estudios han demostrado que este residuo tiene un gran potencial para la producción de hidrógeno verde, un combustible limpio con múltiples aplicaciones industriales.

A pesar de su potencial, la escalabilidad de estos procesos enfrenta dificultades técnicas y económicas, como la falta de modelos optimizados, altos costos de experimentación y la incertidumbre sobre el comportamiento del sistema en condiciones reales (López & Martínez, 2022). Tradicionalmente, la optimización de estos procesos requiere largos períodos de prueba y error, lo que ralentiza la transición hacia soluciones energéticas más sostenibles.

Aquí es donde los gemelos digitales emergen como una solución innovadora. Estas herramientas permiten la evaluación de variables críticas para la producción de biohidrógeno mediante fermentación oscura, como la temperatura, el pH, la relación sustrato-inóculo y la carga orgánica, dentro de un entorno controlado y seguro, minimizando riesgos y maximizando la eficiencia. Su implementación no solo facilita la optimización del aprovechamiento de residuos orgánicos, sino que también impulsa la transición hacia una economía circular, diversificando la matriz energética y reduciendo el impacto ambiental (Pérez et al., 2021; Martínez et al., 2021).

Sin embargo, a pesar de su potencial, la aplicación de gemelos digitales en este tipo de procesos sigue siendo incipiente, lo que plantea una clave interrogante:

¿Cómo, a través de las tecnologías emergentes, podemos establecer escenarios de gemelos digitales que faciliten la simulación y escalabilidad de estos procesos en la industria?

5. Justificación

El desarrollo de un gemelo digital como herramienta tecnológica disruptiva se justifica por su capacidad para optimizar y predecir el comportamiento de procesos complejos en diferentes industrias. Esta tecnología permite replicar virtualmente un sistema físico, integrando modelos matemáticos y simulaciones en tiempo real, lo que facilita el análisis, control y mejora de procesos antes de su implementación. En el caso específico de la producción de biohidrógeno a partir del lactosuero, el gemelo digital representa una solución

para abordar las limitaciones actuales de los métodos experimentales, que suelen ser costosos, lentos y poco adaptables a escalas industriales (ISO 23247-1, 2021; López & Martínez, 2022).

La razón principal para implementar un gemelo digital es su capacidad de reducir riesgos y costos asociados a la experimentación en procesos industriales. Este enfoque permite evaluar de manera anticipada variables críticas, como la temperatura, el pH, la relación sustrato-inóculo y la carga orgánica, optimizando las condiciones de operación antes de la inversión en infraestructura física. Además, posibilita la identificación y mitigación de perturbaciones potenciales en el sistema, garantizando un proceso más eficiente y sostenible (Pérez et al., 2021). En este sentido, los gemelos digitales no solo ofrecen una alternativa económica, sino también una herramienta que promueve la innovación en sectores con alta demanda tecnológica.

Otra clave de motivación es la necesidad de transitar hacia modelos productivos sostenibles que minimicen los impactos ambientales y promuevan la economía circular. La transformación de residuos, como el lactosuero, en fuentes de energía renovable, representa un avance significativo en este ámbito. El gemelo digital actúa como un puente entre la investigación en laboratorio y la implementación industrial, asegurando un aprovechamiento más eficiente de los recursos y contribuyendo a la diversificación de la matriz energética (Gómez & Sánchez, 2018; Rodríguez et al., 2020).

Asimismo, el gemelo digital es una herramienta que fomenta la transferencia de conocimiento y la colaboración interdisciplinaria. Al proporcionar un entorno interactivo y visual para la simulación de bioprocesos, facilita la comprensión de conceptos complejos y promueve el aprendizaje continuo en entornos académicos y profesionales. Esta característica lo convierte en una herramienta pedagógica ideal para proyectos de investigación aplicada y para la formación de expertos en tecnologías emergentes (Martínez et al., 2021).

Finalmente, la implementación de un gemelo digital responde a la creciente demanda de soluciones tecnológicas que se alinean con los objetivos globales de sostenibilidad, como los establecidos en la Agenda 2030 de las Naciones Unidas. Al optimizar procesos industriales y fomentar la producción de energía limpia, el proyecto contribuye directamente a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), especialmente en las áreas de energía asequible y no contaminante (ODS 7) y producción y consumo responsables (ODS 12). Esto

refuerza su relevancia en un contexto donde las tecnologías emergentes son clave para abordar los desafíos del cambio climático y la transición energética (ISO 23247-1, 2021).

6. Marco Teórico

6.1. Fermentación Oscura

La fermentación oscura es un proceso biológico ampliamente estudiado por su potencial en la producción de hidrógeno a partir de biomasa. Este método, también conocido como fermentación de hidrógeno oscuro, se basa en la degradación de carbohidratos como fuente principal de carbono. Entre los sustratos más utilizados destacan la glucosa, el almidón, la celulosa y la xilosa, debido a su disponibilidad y bajo costo, además de la mínima demanda energética requerida para su conversión en biohidrógeno (Castiblanco & Guerrero, 2023).

Durante este proceso, las bacterias fermentativas operan en condiciones anaeróbicas, utilizando la hidrogenasa para reducir protones y generar hidrógeno como subproducto. Este mecanismo permite la oxidación de los transportadores electrónicos reducidos durante la fermentación, garantizando el reciclaje de estos compuestos y manteniendo el equilibrio electroquímico necesario para la producción continua de adenosín trifosfato (ATP). Su aplicación no solo contribuye a la generación de un combustible limpio, sino que también permite el tratamiento y aprovechamiento de residuos orgánicos, promoviendo la economía circular y la sostenibilidad industrial (Martínez & García, 2010).

De esta manera, la fermentación oscura se presenta como una alternativa viable para la producción de biohidrógeno a partir de diversos residuos agroindustriales. Su implementación combinada con otras rutas metabólicas, como la foto fermentación o la biofotólisis, podría maximizar la eficiencia en la generación de hidrógeno, al tiempo que se optimiza el **tratamiento** de los desechos utilizados como sustrato.

6.1.1. Beneficios de la fermentación oscura

La fermentación oscura se ha consolidado como una alternativa sostenible y eficiente para la valorización de residuos orgánicos, destacándose por su capacidad para producir biohidrógeno y biogás, dos fuentes de energía renovable con alto potencial industrial. A diferencia de otros métodos de conversión energética, esta tecnología ofrece múltiples

beneficios que contribuyen a la optimización de los procesos de aprovechamiento de la biomasa y a la reducción del impacto ambiental.

Uno de los principales beneficios de la fermentación oscura es el incremento en la estabilización de la materia orgánica, lo que facilita la transformación eficiente de los residuos en energía utilizable. Al mismo tiempo, este proceso permite una reducción significativa de las emisiones de gases de efecto invernadero, disminuyendo la liberación de metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), los cuales son responsables del calentamiento global y el cambio climático (Silvestre, 2024).

Otro beneficio clave es el aumento en la producción de energía renovable, lo que permite que esta tecnología sea más competitiva en el mercado en comparación con otras fuentes energéticas. La producción de biohidrógeno no solo diversifica la matriz energética, sino que también mejora el rendimiento general del sistema al complementarse con el biogás generado en el mismo proceso, lo que incrementa la eficiencia energética global (Genia Bioenergy, s. f.).

Además, la fermentación oscura destaca por la obtención simultánea de biohidrógeno y biogás, lo que maximiza el aprovechamiento de los residuos utilizados como sustrato. El hidrógeno presenta un poder calorífico 2.6 veces superior al biogás, lo que significa una mayor generación de energía por unidad de masa de combustible utilizada. Esta característica hace que la fermentación oscura sea una alternativa atractiva para aplicaciones industriales y energéticas que requieren un alto rendimiento térmico (Genia Bioenergy, s. f.).

Finalmente, la separación de fases dentro del proceso permite una mejor optimización de las condiciones ambientales para la actividad microbiana, lo que favorece la transformación de la materia orgánica en gases renovables. Al ajustar parámetros como temperatura, pH y relación sustrato-inóculo de manera independiente en cada fase, se logra una conversión más eficiente, incrementando la generación de energía sin comprometer la estabilidad del sistema (Silvestre, 2024).

En definitiva, la fermentación oscura no solo se posiciona como una tecnología sostenible para la producción de biohidrógeno y biogás, sino que también ofrece ventajas operativas y económicas significativas en comparación con otros métodos de producción de energía renovable. Su capacidad para optimizar la degradación de residuos orgánicos y

maximizar la eficiencia energética la convierten en una solución clave para la transición hacia modelos energéticos más sostenibles.

6.2. Biodigestor en fermentación oscura

La fermentación oscura es un proceso biotecnológico ampliamente estudiado para la producción de biohidrógeno, en el cual ciertos microorganismos anaerobios descomponen la materia orgánica en ausencia de oxígeno. Este proceso se desarrolla en sistemas cerrados como los biodigestores anaerobios, donde los residuos orgánicos son sometidos a condiciones controladas para optimizar la conversión de carbohidratos en hidrógeno y otros subproductos de interés (Feria Lara et al., 2022).

El biodigestor es el sistema donde ocurre la fermentación oscura, y su funcionamiento se basa en la digestión anaeróbica, la cual comprende cuatro etapas principales:

- Hidrólisis: En esta primera fase, los compuestos orgánicos complejos, como carbohidratos, proteínas y lípidos, son descompuestos en moléculas más simples de menor peso molecular, tales como azúcares, aminoácidos y ácidos grasos.
- Acidogénesis: Los compuestos generados en la hidrólisis son transformados en ácidos grasos volátiles (acetato, propionato, butirato, entre otros) mediante rutas metabólicas como la glucólisis. En esta etapa también se produce hidrógeno molecular (H_2) como subproducto de la actividad de las bacterias anaerobias (Blanco Londoño & Rodríguez Chaparro, 2012).
- Acetogénesis: Los ácidos grasos volátiles generados en la etapa anterior son convertidos en acetato e hidrógeno adicional.
- Metanogénesis: En un proceso convencional de digestión anaerobia, los productos finales serán metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2). Sin embargo, en la fermentación oscura, la producción de metano se inhibe para favorecer la acumulación de hidrógeno como principal producto energético (Blanco Londoño & Rodríguez Chaparro, 2012).

El biodigestor utilizado en fermentación oscura debe operar bajo condiciones estrictas para maximizar la producción de biohidrógeno. Factores como el pH, la temperatura, la relación sustrato-inóculo y la concentración de materia orgánica juegan un papel crucial en la eficiencia del proceso. Usualmente, las bacterias más utilizadas en este tipo de procesos pertenecen a los géneros *Clostridium* y *Enterobacter*, que son capaces de transformar una variedad de sustratos, desde glucosa y xilosa hasta residuos agroindustriales como suero de queso, aguas residuales de la industria textil y estiércol (Feria Lara et al., 2022).

No obstante, la eficiencia de la fermentación oscura puede verse afectada por la presencia de microorganismos consumidores de hidrógeno, como bacterias homoacetogénicas y metanogénicas, las cuales compiten por los sustratos y reducen la cantidad de hidrógeno producido. Además, la estequiometría del proceso varía en función de los productos metabólicos generados. Por ejemplo, cuando la fermentación produce ácido butírico, se generan 2 moles de hidrógeno por cada mol de glucosa, mientras que si se genera ácido propiónico, se consume hidrógeno en lugar de producirlo (Blanco Londoño & Rodríguez Chaparro, 2012).

Desde un punto de vista técnico, la producción de hidrógeno en un biodigestor de fermentación oscura se cuantifica a través de dos indicadores clave:

1. Rendimiento de hidrógeno, que se expresa en moles de H_2 producidos por mol de sustrato consumido.
2. Tasa de producción de hidrógeno (TPH), que mide la cantidad de H_2 producida por unidad de tiempo y volumen de reactor o por unidad de biomasa (Blanco Londoño & Rodríguez Chaparro, 2012).

Para modelar y predecir la producción de biohidrógeno en biodigestores, se emplean ecuaciones matemáticas como la ecuación modificada de Gompertz, la cual describe el comportamiento acumulativo de producción de hidrógeno en experimentos por lotes. Este modelo permite analizar la cinética del proceso y ajustar parámetros operativos para mejorar la eficiencia del sistema (Blanco Londoño & Rodríguez Chaparro, 2012).

Es así, que el uso de biodigestores en fermentación oscura representa una alternativa prometedora para la producción de biohidrógeno a partir de residuos orgánicos. Su implementación no solo permite la valorización de subproductos agroindustriales, sino que también contribuye a la mitigación del impacto ambiental mediante la reducción de residuos y la generación de energía limpia.

6.3. Gemelo Digital

En la actualidad, la digitalización de procesos industriales y la optimización de recursos han llevado a la implementación de tecnologías avanzadas como los gemelos digitales. Un gemelo digital (GD), o *Digital Twin* (DT) en inglés, es una representación virtual de un producto, proceso o sistema físico, que recibe datos en tiempo real a través de sensores u otras tecnologías asociadas al Big Data. Estos datos son procesados mediante Inteligencia Artificial (IA), Computación en la Nube (Cloud Computing) y Aprendizaje

Automático (Machine Learning), permitiendo la simulación, análisis y predicción del comportamiento del sistema físico con una alta precisión (Rodríguez, 2019; Iberdrola, 2020).

A diferencia de otras soluciones digitales, los gemelos digitales no solo buscan representar digitalmente una realidad física, sino también replicar, procesar y predecir lo que puede ocurrir en el mundo real, facilitando así la toma de decisiones estratégicas. Su implementación ha evolucionado significativamente en sectores industriales como la manufactura, la automatización de procesos y la generación de energía, convirtiéndose en una herramienta clave dentro de la Industria 4.0 (Varas Chiquito et al., 2020).

El uso de gemelos digitales ha revolucionado la gestión de sistemas industriales, proporcionando una serie de ventajas que optimizan tanto los procesos de diseño como los de producción y mantenimiento. Entre los beneficios más destacados se encuentran los siguientes:

- Optimización del diseño y pruebas de productos: Permiten validar si un producto cumple con sus especificaciones de diseño antes de crear un prototipo físico, reduciendo costos en pruebas de laboratorio o ensayos a gran escala.
- Monitoreo y predicción de fallos: Facilitan la detección de fallas en equipos y sistemas a partir de un análisis de simulaciones continuas, lo que optimiza el mantenimiento preventivo.
- Eficiencia en la fabricación y reducción de costos: Al simular distintos modelos de producción sin interrumpir las operaciones diarias, se minimizan riesgos y costos asociados a cambios en la línea de producción.
- Reducción del tiempo de inactividad y consumo energético: Se pueden optimizar las operaciones industriales mediante el análisis de datos en tiempo real, mejorando la eficiencia y sostenibilidad energética.
- Centralización de datos y toma de decisiones estratégicas: Proporcionan un punto único de visualización de datos operativos, reduciendo costos administrativos y facilitando la toma de decisiones basada en datos.
- Integración con tecnologías emergentes: Al combinarse con herramientas como el Big Data, Internet de las Cosas (IoT) e Inteligencia Artificial, los gemelos digitales permiten simular escenarios, optimizar la producción y anticipar posibles fallos antes de que ocurran.

- Corrección de errores y mejoras continuas: Gracias a su capacidad de generar versiones mejoradas de productos y procesos, permiten reducir el margen de error y optimizar la eficiencia operativa (Varas Chiquito et al., 2020).

6.3.1. Características

Los gemelos digitales se han convertido en una herramienta fundamental en la transformación digital de diversas industrias, permitiendo la creación de réplicas virtuales de sistemas físicos para su monitoreo, simulación y optimización en tiempo real. Esta tecnología se basa en la integración de Big Data, IoT (Internet de las Cosas), inteligencia artificial (IA) y aprendizaje automático (Machine Learning), lo que permite mejorar la toma de decisiones estratégicas y la eficiencia operativa (Varas Chiquito et al., 2020).

Entre sus principales características se destacan:

- Representación precisa del sistema físico: Los gemelos digitales replican con exactitud el comportamiento y la estructura de un proceso, objeto o sistema físico, permitiendo su monitoreo continuo y la optimización de su funcionamiento.
- Análisis y simulación en tiempo real: Gracias a sensores y sistemas de comunicación avanzados, los datos recopilados se procesan en tiempo real, permitiendo predecir y ajustar variables críticas de los procesos industriales.
- Capacidad predictiva: Utilizando algoritmos de inteligencia artificial y aprendizaje automático, los gemelos digitales pueden anticipar fallos, optimizar procesos y proponer soluciones antes de que ocurran problemas críticos.
- Integración con múltiples tecnologías: Se apoyan en disciplinas como la ingeniería, la química y la física, combinadas con computación en la nube, IoT e IA, para mejorar la precisión de sus simulaciones y análisis operativos.
- Optimización de recursos y reducción de costos: Su implementación minimiza el tiempo de inactividad de los procesos, reduce costos operativos al evitar pruebas físicas innecesarias y mejora la eficiencia en la toma de decisiones (Sobrino, 2022).

6.3.2. Estructura de gemelos digitales

El desarrollo e implementación de un gemelo digital sigue un ciclo continuo de retroalimentación entre el sistema físico y su representación digital, lo que permite analizar, predecir y optimizar su comportamiento. Este proceso consta de varias fases clave:

1. Recopilación de datos: Se instalan sensores en el sistema físico para capturar información en tiempo real sobre variables como temperatura, presión, velocidad, entre otras.
2. Transmisión y almacenamiento de datos: La información recolectada se envía a plataformas de computación en la nube, lo que permite su procesamiento y análisis en tiempo real.
3. Modelado y simulación: Con los datos obtenidos, se crea un modelo digital altamente preciso, que se actualiza continuamente con la información recibida, permitiendo simular diferentes escenarios operativos.
4. Análisis y optimización: Mediante técnicas avanzadas de Big Data, IA y Machine Learning, se interpretan los datos para identificar patrones, detectar anomalías y optimizar el rendimiento del sistema.
5. Implementación de mejoras: Los resultados del análisis se aplican al sistema físico, mejorando su eficiencia operativa y reduciendo costos asociados a fallos o ineficiencias (Varas Chiquito et al., 2020).

La estructura de un gemelo digital varía según el sector y su aplicación específica, pero en términos generales, está diseñada para proporcionar un entorno virtual interactivo en el que se pueden evaluar diferentes condiciones sin intervenir físicamente en los procesos.

En el ámbito industrial, los gemelos digitales han evolucionado significativamente con el uso de Building Information Modeling (BIM), una metodología que permite representar digitalmente estructuras físicas para facilitar su diseño, monitoreo y mantenimiento. En la actualidad, el diseño incremental de gemelos digitales desde modelos BIM se basa en dos enfoques principales: por generaciones y por niveles, lo que permite una evolución más estructurada de la tecnología (Varas Chiquito et al., 2020).

6.3.3. Programas para desarrollo de gemelos digitales

Los gemelos digitales son representaciones virtuales dinámicas de entidades físicas, procesos o sistemas, que replican su comportamiento y características en tiempo real. Para su desarrollo, se emplean diversos programas y plataformas que facilitan la creación, simulación y gestión de estos modelos virtuales. Estas herramientas permiten a las empresas optimizar sus operaciones, mejorar la toma de decisiones y reducir costos.

Una de las plataformas destacadas es Open Twins, un ecosistema de código abierto diseñado por la Universidad de Málaga. Esta plataforma integra tecnologías como el Internet de las Cosas (IoT), la Inteligencia Artificial (IA), monitorización, modelos de simulación y visualización en 3D. Su arquitectura abierta facilita la conexión entre diferentes gemelos, ofreciendo versatilidad y accesibilidad (Universidad de Málaga, s.f.). El código fuente de Open Twins está disponible en GitHub.(Robles et al., 2023)

Azure Digital Twins es otra plataforma relevante, ofrecida por Microsoft, que permite crear representaciones digitales de entornos conectados, como edificios, fábricas y redes de energía. Esta plataforma de IoT facilita la creación de modelos utilizando un lenguaje de modelado abierto, lo que permite a las empresas optimizar operaciones y crear experiencias innovadoras (Microsoft, s.f.).

MindSphere de Siemens, es una plataforma que conecta el mundo real y el virtual para convertir datos en información valiosa. Al ser una plataforma abierta, MindSphere ofrece un ecosistema para que los partners desarrollen aplicaciones personalizadas (Siemens, s.f.). Cuenta con un protocolo abierto de actuación y funcionalidades como el acceso remoto a los servicios en la nube de AWS.

La plataforma Unity también se utiliza en el desarrollo de gemelos digitales, mejorando la toma de decisiones al permitir a los equipos visualizar e interactuar con modelos CAD en 3D en tiempo real. Unity tiene aplicaciones en el sector aeroespacial para el desarrollo de productos, creación de prototipos, simulación, formación, mantenimiento, operaciones, ventas y marketing. Un ejemplo de esto es Boeing, que creó una aplicación de inspección de aeronaves basada en la realidad aumentada utilizando un gemelo digital de uno de sus aviones (Unity Technologies, s.f.).

La implementación de gemelos digitales con estos programas permite simular procesos en tiempo real y predecir el resultado de ciertas acciones antes de realizarlas en el proceso físico. Esto optimiza procesos y reduce costos, asegurando las inversiones en activos en un campo de pruebas virtual. Los gemelos digitales se utilizan en toda la cadena de valor y ciclo de vida del producto con el objetivo de simular, predecir, validar y optimizar el sistema productivo ante potenciales cambios sin poner en riesgo la producción.

En este sentido, los programas para el desarrollo de gemelos digitales ofrecen una amplia gama de funcionalidades y aplicaciones en diversos sectores. Desde plataformas de código abierto como Open Twins hasta soluciones comerciales como Azure Digital Twins,

MindSphere y Unity, estas herramientas permiten a las empresas crear representaciones virtuales precisas y dinámicas de sus activos y procesos, mejorando la eficiencia, la toma de decisiones y la innovación.

6.3.4. Modelo Digitales

Los modelos digitales, también conocidos como gemelos digitales, son representaciones virtuales de objetos, sistemas o procesos físicos que utilizan datos en tiempo real para simular su comportamiento y rendimiento. Esta tecnología ha revolucionado la forma en que las empresas gestionan y optimizan sus operaciones, permitiendo un análisis más profundo y una toma de decisiones más informada. A través de la integración de sensores, inteligencia artificial y simulaciones avanzadas, los modelos digitales ofrecen una visión precisa y dinámica de los activos físicos.

La evolución de los modelos digitales se remonta a la NASA en los años 60, cuando se utilizaban réplicas físicas y datos en tiempo real para monitorizar las condiciones de las naves espaciales durante las misiones Apollo. Con el avance de la tecnología, esta idea se transformó en modelos digitales que pueden replicar no solo el aspecto físico de un objeto, sino también su comportamiento y funcionamiento en diversas condiciones (Wikipedia, 2022)¹ Esto ha permitido una mejora significativa en la gestión del ciclo de vida de los productos, desde su diseño hasta su desactivación.

Un modelo digital consta de tres componentes principales: el objeto físico, el objeto informático y las conexiones entre ambos. Los datos se recogen del objeto físico mediante sensores y se transmiten al modelo digital para su análisis. Este proceso permite que el modelo digital no solo represente el estado actual del objeto físico, sino que también simule diferentes escenarios futuros basados en variaciones en las condiciones operativas (AWS, s.f.). Así, los modelos digitales pueden prever fallos potenciales y optimizar el rendimiento antes de que ocurran problemas reales.

Existen diferentes tipos de modelos digitales que se pueden clasificar según su aplicación. Los gemelos de productos representan un producto específico y permiten realizar simulaciones para identificar problemas antes de que ocurran. Los gemelos de procesos se centran en replicar procesos industriales o de negocio, optimizando flujos de trabajo y reduciendo cuellos de botella. Por último, los gemelos de sistemas abarcan sistemas completos, como plantas energéticas o redes de transporte, proporcionando una visión integral para gestionar recursos a gran escala (IBM, s.f.)

La implementación de modelos digitales ofrece numerosas ventajas. Permiten realizar pruebas en un entorno virtual sin interrumpir las operaciones físicas, lo que ahorra tiempo y recursos. Además, facilitan la identificación temprana de problemas potenciales, lo que puede reducir significativamente los costos asociados con el mantenimiento y las reparaciones. Asimismo, al permitir simulaciones y análisis en tiempo real, los modelos digitales ayudan a maximizar la eficiencia operativa (Iberdrola, s.f.)

En el contexto actual, donde la digitalización es clave para la competitividad empresarial, los modelos digitales están emergiendo como una herramienta esencial para la innovación. Las empresas están adoptando esta tecnología no solo para mejorar sus procesos internos, sino también para ofrecer productos más personalizados y adaptados a las necesidades del cliente (Espacio BIM, s.f.). Esta tendencia está impulsando una transformación significativa en diversas industrias.

6.4. Casos de estudio de gemelos digitales para producción de biohidrógeno

La tecnología de los gemelos digitales ha emergido como una herramienta innovadora en la Cuarta Revolución Industrial, permitiendo la creación de representaciones digitales de procesos físicos que incorporan datos en tiempo real. Estos modelos digitales son capaces de simular el comportamiento de sistemas antes de implementar cambios en los procesos reales, lo que resulta crucial para optimizar la producción y mejorar la sostenibilidad (Geniabioenergy, s.f.). En el contexto de la producción de biohidrógeno, los gemelos digitales ofrecen una oportunidad significativa para mejorar la eficiencia y rentabilidad de las plantas de biogás.

Los gemelos digitales permiten a las empresas predecir diferentes resultados basados en datos variables, facilitando así la toma de decisiones informadas antes de realizar cambios en los sistemas físicos. La recopilación masiva de datos sobre el ciclo de vida del producto, especificaciones de diseño y procesos de producción es fundamental para crear un modelo computacional preciso que represente el comportamiento del sistema (Geniabioenergy, s.f.). Este enfoque no solo mejora la comprensión del funcionamiento de las instalaciones, sino que también ayuda a identificar áreas donde se pueden implementar mejoras.

Un caso destacado es el proyecto “DigitalTwin4AgroBiogas”, liderado por el Clúster Aragonés de Alimentación. Este proyecto busca diseñar un gemelo digital basado en inteligencia artificial para optimizar la producción de biogás a partir de residuos orgánicos,

como purines y subproductos animales (Geniabioenergy, s.f.). Se espera que este gemelo digital mejore la viabilidad económica y ambiental de las plantas al aumentar la producción de biometano por tonelada de residuo y reducir los costos asociados con la gestión de residuos.

La implementación de gemelos digitales en plantas de producción de biohidrógeno también permite realizar mantenimiento predictivo, lo que reduce los riesgos operativos y prolonga la vida útil de las instalaciones (Geniabioenergy, s.f.). Al simular diferentes escenarios operativos, las empresas pueden probar cambios antes de llevarlos a cabo en el entorno físico, lo que contribuye a una mayor eficiencia operativa y a la reducción de emisiones asociadas con la producción energética.

Además, el uso de tecnologías como inteligencia artificial y machine learning en conjunto con los gemelos digitales permite analizar grandes volúmenes de datos para optimizar procesos en tiempo real. Esto es especialmente relevante en la producción sostenible de biohidrógeno, donde se busca maximizar la recuperación del gas renovable mientras se minimizan los impactos ambientales (Eurecat, s.f.).

El proyecto europeo HYIELD es otro ejemplo significativo donde se está aplicando esta tecnología. Eurecat está desarrollando un gemelo digital para una planta destinada a generar hidrógeno a partir de residuos. Este modelo digital proporcionará estimaciones sobre costos operativos y predicciones sobre la producción basadas en diferentes configuraciones (Eurecat, s.f.). La planta demostrará cómo integrar nuevas tecnologías para convertir residuos biogénicos en hidrógeno verde, contribuyendo así a la descarbonización y sostenibilidad del sector energético.

La Industria 4.0 ha impulsado el desarrollo de tecnologías como los gemelos digitales, representaciones virtuales de sistemas físicos que permiten modelar, simular y predecir su comportamiento en tiempo real (Martí Coll et al., 2024). Una parte crucial de estos gemelos digitales es la obtención de un modelo matemático preciso del sistema, para lo cual se han explorado diversas técnicas.

El operador de Koopman emerge como una herramienta valiosa para analizar sistemas dinámicos no lineales. Este operador transforma el sistema no lineal en un espacio de funciones (observadores) donde se comporta de manera lineal, permitiendo un análisis más manejable (Martí Coll et al., 2024). Aunque el operador de Koopman es infinito-dimensional, técnicas de aproximación son necesarias para su aplicación práctica.

La Descomposición en Modos Dinámicos (DMD) proporciona una aproximación lineal de las dinámicas del sistema a partir de datos experimentales, estableciendo una conexión con el operador de Koopman (Martí Coll et al., 2024). DMD con Control (DMDC) extiende esta técnica para incluir señales de control en el análisis, ofreciendo una representación más completa del sistema.

Un desafío importante es la selección adecuada de los observadores de Koopman, que influyen en la precisión del modelo (Martí Coll et al., 2024). La mayoría de los enfoques se basan en el conocimiento experto para seleccionar estos observadores, lo que puede limitar la adaptabilidad del modelo a sistemas complejos.

En contraposición, el documento de Martí Coll et al. (2024) propone un procedimiento para automatizar la selección de observadores de Koopman, resolviendo un problema de optimización. Este enfoque busca la cantidad mínima de observadores que minimicen el error entre las observaciones reales del sistema y las predicciones del modelo lineal estimado.

Para implementar este procedimiento, se puede utilizar cualquier algoritmo de optimización. El documento específico examinado emplea un algoritmo genético (AG) para encontrar la selección óptima de observadores (Martí Coll et al., 2024).

La aplicación de la teoría de Koopman combinada con DMDC permite obtener las matrices A y B del modelo lineal en el espacio de estados (Martí Coll et al., 2024). Esto facilita el uso de técnicas clásicas para el análisis de sistemas y el diseño de controladores, lo cual es esencial para la simulación y control del gemelo digital.

Este marco teórico se basa en la investigación de (Martí Coll et al. 2024), que propone una metodología para la selección optimizada de observadores de Koopman aplicados a DMDC. Este enfoque busca obtener modelos lineales precisos que capturen las dinámicas no lineales de los sistemas, facilitando su análisis, simulación y control en el contexto de la Industria 4.0.

7. Análisis de restricciones

Para correr un modelo digital de un reactor en tiempo real, se requiere una infraestructura computacional robusta que garantice un procesamiento eficiente y respuestas inmediatas. Según Hennessy y Patterson (2017), este tipo de simulaciones demanda una GPU

potente, como las de la serie NVIDIA RTX o AMD Radeon Pro, además de un procesador de alto rendimiento, como un Intel Core i9 o un AMD Ryzen 9. Estos componentes son esenciales para manejar grandes volúmenes de datos en tiempo real y asegurar una ejecución fluida del modelo.

Además del procesador y la tarjeta gráfica, es fundamental contar con suficiente memoria RAM y almacenamiento rápido. Stallings (2020) señala que un mínimo de 32 GB de RAM es recomendable para este tipo de tareas, junto con un almacenamiento SSD de alta velocidad que permita cargar y procesar grandes cantidades de datos sin retrasos significativos. Asimismo, es crucial garantizar la compatibilidad del software de simulación con la arquitectura del hardware y mantener los controladores gráficos actualizados para evitar problemas de rendimiento.

En el caso de Blender, los requisitos de hardware pueden ser menos exigentes en comparación con una simulación en tiempo real, pero sigue siendo necesario un sistema potente para manejar modelos complejos y renderizados de alta calidad. Según Blender Foundation (2023), Blender aprovecha significativamente una GPU con soporte CUDA (NVIDIA) o OpenCL (AMD) para acelerar el proceso de renderizado en Cycles. Un procesador multinúcleo y una cantidad adecuada de memoria RAM también influyen en la eficiencia del software.

Además, para optimizar el desempeño de Blender, es recomendable utilizar un sistema operativo actualizado y bien configurado. Patterson y Hennessy (2021) destacan la importancia de contar con un entorno de trabajo estable, ya que ciertos ajustes en la configuración de drivers y opciones de rendimiento pueden mejorar significativamente la velocidad del renderizado y la fluidez en la manipulación de modelos 3D dentro del software.

Uno de los principales desafíos que hemos enfrentado en este proceso ha sido la disponibilidad de equipos con la capacidad suficiente para ejecutar tanto el modelo en tiempo real como Blender. La falta de hardware adecuado ha generado problemas de rendimiento, tiempos de carga prolongados y errores en la simulación, lo que ha impactado la eficiencia del desarrollo del proyecto. Estas limitaciones han restringido la capacidad de prueba y ajuste del modelo, dificultando su validación y optimización.

Adicionalmente, hemos encontrado dificultades relacionadas con el conocimiento técnico necesario para implementar y optimizar estas herramientas. Sommerville (2019)

menciona que la curva de aprendizaje de los softwares de simulación y modelado puede ser pronunciada, especialmente cuando no se cuenta con experiencia previa en su configuración avanzada. En nuestro caso, la falta de conocimientos especializados ha requerido una fase de experimentación más extensa de lo inicialmente planeado.

Esta fase de aprendizaje y prueba ha consumido un tiempo considerable, impactando los plazos de entrega del proyecto. La necesidad de investigar, ajustar configuraciones y realizar pruebas adicionales ha representado un desafío adicional al desarrollo del modelo digital del reactor. A medida que avanzamos en el proceso, se ha hecho evidente la importancia de contar con capacitación especializada o asesoramiento técnico para optimizar el uso de los recursos disponibles.

8. Metodología de selección y desarrollo de la solución

Para el desarrollo del gemelo digital del proceso de fermentación oscura, se ha seleccionado la metodología Scrum debido a su capacidad para gestionar proyectos de software complejos y su enfoque iterativo e incremental. Scrum permite desarrollar el sistema de manera ágil, asegurando la retroalimentación continua y la adaptación a cambios a lo largo del proceso. A continuación, se describe el paso a paso de la implementación de Scrum aplicado a este proyecto.

Etapas del Desarrollo

1. Creación del Product Backlog

El Product Backlog es la lista priorizada de características, requisitos y mejoras que se deben desarrollar. En el caso del gemelo digital, los elementos principales del backlog incluyen:

- Recopilación y estructuración de datos experimentales basados en el modelo matemático Box-Behnken.
- Desarrollo del modelo 3D del biorreactor en Blender.
- Implementación de la simulación en Unreal Engine.
- Validación y ajuste de parámetros críticos como temperatura, pH, relación sustrato-inóculo y carga orgánica.
- Desarrollo de una interfaz interactiva para visualización de los resultados.

2. Planificación del Sprint (Sprint Planning)

Cada sprint tiene una duración de un mes y se inicia con una sesión de planificación en la que se seleccionan los elementos del backlog que se abordarán en el sprint. Se establecen los objetivos del sprint y se definen las tareas específicas para cada miembro del equipo.

Sprint 1: Definir los requisitos del modelo matemático y estructurar la base de datos.

Sprint 2: Crear el diseño preliminar del biorreactor en Blender.

Sprint 3: Integrar el modelo 3D en Unreal Engine e iniciar la simulación básica.

2.3. Desarrollo y Scrum Weekly Meetings

Durante el sprint, se realizan reuniones semanales cortas (20 minutos) para sincronizar el trabajo del equipo, revisar el progreso y abordar cualquier impedimento. Estas reuniones permiten mantener la transparencia y fomentar la colaboración activa entre los desarrolladores, modeladores y expertos en bioingeniería.

2.4. Revisión del Sprint (Sprint Review)

Al finalizar cada sprint, se realiza una revisión en la que el equipo presenta los avances al docente. Se realizan pruebas del gemelo digital en función de los objetivos del sprint y se recopilan comentarios para mejorar el producto en los siguientes ciclos.

2.5. Retrospectiva del Sprint (Sprint Retrospective)

En esta fase, el equipo analiza lo que funcionó bien, lo que se puede mejorar y los cambios que se deben implementar en los siguientes sprints. Esto fomenta la mejora continua y la optimización de la metodología de trabajo.

Aprendizajes obtenidos:

- Identificación de cuellos de botella en la integración de datos entre Box-Behnken y Unreal Engine.
- Necesidad de definir mejor los criterios de aceptación de los modelos 3D antes de su implementación.
- Mejora en la comunicación entre el equipo de programación y diseño gráfico.

Es así, como la metodología Scrum proporciona una estructura flexible y eficiente para el desarrollo del gemelo digital del proceso de fermentación oscura. A través de iteraciones cortas y retroalimentación constante, permite asegurar la calidad del producto final y

adaptarse a los desafíos técnicos y científicos del proyecto. La aplicación de esta metodología garantiza que el gemelo digital cumpla con los requerimientos establecidos, contribuyendo al avance de la investigación en biohidrógeno y a la optimización de procesos industriales sostenibles.

9. Costos

Se realizó un análisis detallado de los costos asociados al desarrollo de una solución tecnológica basada en plataformas de simulación y diseño gratuitas, como Unreal y Blender. A través de la identificación de costos directos —como la adquisición de equipos de cómputo, gafas de realidad virtual, hosting de servicios y horas de desarrollo— y costos indirectos —como servicios públicos, transportes y capacitaciones— se ha construido una estructura financiera sólida que respalda la ejecución del proyecto. La inversión total inicial asciende a \$97.041.468, distribuyéndose mayoritariamente en talento humano y recursos tecnológicos esenciales para garantizar la calidad y el desempeño de la solución propuesta.

Adicionalmente, se realiza una proyección a tres años para evaluar la sostenibilidad del modelo, considerando un incremento anual estimado del IPC del 10%. Este análisis incluye ajustes sobre los costos recurrentes y contempla la depreciación de activos tecnológicos a lo largo del tiempo. Se plantea la necesidad de actualizar anualmente los presupuestos de operación, especialmente en lo relacionado al hosting, servicios públicos y costos de personal, asegurando de esta forma la continuidad del servicio, la retención del talento y la adaptación a nuevas demandas técnicas o del mercado.

A continuación, se presenta una tabla que ilustra la evolución proyectada de los principales costos durante el periodo de tres años, incorporando los ajustes inflacionarios correspondientes. Esta proyección servirá como base para futuras estrategias de sostenibilidad financiera del proyecto.

Componente	Detalle / Ejemplo	Costo Unitario	Cantidad	Subtotal
Costos directos				
Software de simulación Unreal	Plataforma de simulación free	\$ -	1	\$ -
Software de diseño Blender	Plataforma de diseño free	\$ -	1	\$ -

Equipo de computo	Memoria, CPU, HD	\$ 6.000.000	2	\$ 12.000.000
Gafas RV	Características de las gafas	\$ 1.000.000	1	\$ 1.000.000
Hosting de la solución	Características del hosting	\$ 2.000.000	12	\$ 24.000.000
Horas de diseño y desarrollo	Costo por hora \$ 120.000	\$ 120.000	640	\$ 76.800.000
Costos indirectos				
Servicios públicos	Consumo de un PC por kWh al mes	\$ 867	640	\$ 9.248
Transportes	Trasportes a la UCC por fotos y medidas	\$ 3.200	10	\$ 32.000
Varios		\$ 200.000	1	\$ 200.000
Capacitación	Capacitación Unreal	\$ 1.440.000	1	\$ 1.440.000
Capacitación	Capacitación Blender	\$ 968.700	1	\$ 968.700
Total				\$ 116.449.948

Tabla 1: Costos y presupuesto total del Gemelo Digital

Costos Directos

Los costos directos del proyecto están compuestos por aquellos elementos esenciales y directamente relacionados con la producción de la solución en realidad virtual. Se destaca el uso de plataformas gratuitas como Unreal y Blender, lo cual permite optimizar el presupuesto al no incurrir en gastos de licenciamiento. La adquisición de dos equipos de cómputo de altas especificaciones, con un costo total de \$12.000.000, es crucial para garantizar un buen desempeño en las tareas de simulación y diseño. Asimismo, se invirtió \$1.000.000 en gafas de realidad virtual necesarias para pruebas de validación de la solución desarrollada. Otro gasto significativo es el servicio de hosting, contratado durante 12 meses por un valor de \$24.000.000, asegurando la disponibilidad de los recursos en línea. Finalmente, el mayor rubro dentro de los costos directos corresponde a las horas de diseño y desarrollo, estimadas en 480 horas a un costo de \$120.000 por hora, para un total de \$57.600.000. En resumen, los costos directos representan la mayor parte de la inversión del proyecto, enfocándose en el recurso humano y en la infraestructura tecnológica necesaria para su ejecución.

Costos Indirectos

Los costos indirectos incluyen aquellos gastos que no afectan directamente la elaboración del producto final pero que son necesarios para el desarrollo eficiente del proyecto. El consumo de energía eléctrica asociado al uso de los equipos de cómputo representa un gasto mensual bajo, totalizando \$ 9.248 durante la duración del proyecto. Los transportes, requeridos para la toma de fotografías y mediciones en campo, ascienden a \$32.000. Se incluye también un valor en la categoría de “varios” de \$200.000 cubriendo las pequeñas necesidades que se puedan presentar en cuanto a compra de baterías de computador o cualquier contingencia, como un saldo de respaldo. Un aspecto relevante en esta categoría son los costos de capacitación, los cuales fueron necesarios para mejorar las competencias técnicas del equipo. Se invirtió \$1.440.000 en la capacitación en Unreal y \$968.700 en la capacitación en Blender. Aunque los costos indirectos son considerablemente menores que los directos, representan un componente estratégico fundamental, especialmente para asegurar que el equipo de trabajo esté debidamente preparado para enfrentar los retos técnicos del proyecto.

El presupuesto total del proyecto asciende a \$ 116.449.948, con una clara predominancia de los costos directos, que representan aproximadamente el 96% del total. Los costos indirectos, por su parte, constituyen cerca del 4%. Los principales rubros de inversión corresponden a las horas de desarrollo, que absorben alrededor del 59% del presupuesto, seguidas por el servicio de hosting, que representa aproximadamente el 25%. La estrategia de utilizar software gratuito, así como la inversión en formación especializada, demuestra una administración eficiente de los recursos disponibles. Se concluye que la planificación financiera ha sido adecuada, enfocando el gasto en los elementos que generan valor real para el proyecto.

La estructura de costos presentada permite proyectar la sostenibilidad del modelo a tres años, considerando un ajuste anual basado en el incremento del IPC. Asumiendo un crecimiento promedio del IPC del 10% anual, los costos operativos, especialmente aquellos asociados al hosting, consumo de energía, y horas de desarrollo adicional, deberán ajustarse para mantener la viabilidad financiera del proyecto. Dado que una parte importante de los costos (software Unreal y Blender) no requiere renovación de licencias, se eliminan gastos recurrentes en licenciamiento, lo cual es una ventaja competitiva para la estabilidad económica del proyecto.

Para sostener el modelo, es fundamental considerar la depreciación de los equipos de cómputo y las gafas de realidad virtual, cuyo valor podría amortizarse durante los tres años de

operación. Igualmente, se deberá actualizar progresivamente el presupuesto destinado a servicios públicos y hosting, aplicando un incremento del IPC cada año. Por ejemplo, el costo actual del hosting de \$24.000.000 podría incrementarse a aproximadamente \$26.400.000 en el segundo año y \$29.040.000 en el tercer año. De igual manera, se sugiere reservar un porcentaje del presupuesto anual para mantenimiento o reemplazo de componentes tecnológicos críticos, garantizando la continuidad del servicio sin interrupciones.

Finalmente, para enfrentar el impacto del IPC sobre los costos de mano de obra (horas de diseño y desarrollo), sería recomendable pactar ajustes salariales anuales basados en este indicador, asegurando así la retención del talento y la calidad del servicio. La correcta planificación de estos aumentos, junto con una gestión eficiente de los recursos, permitirá no solo sostener el modelo durante los tres años, sino también optimizar su rendimiento y adaptarlo a las necesidades emergentes del mercado o de las tecnologías asociadas.

10. Desarrollo Gemelo Digital

10.1. Diseño Blender

El gemelo digital desarrollado corresponde a una representación visual del proceso de producción de biohidrógeno ubicado en el laboratorio de biotecnología de la universidad cooperativa de colombia, el cual está compuesto por cuatro reactores operados en modo semicontinuo.

El desarrollo de este gemelo digital comenzó con varias visitas a la Universidad Cooperativa, donde se tomaron las medidas de cada componente, ya que para realizar el diseño era necesario contar con dimensiones exactas.

Es importante destacar que todo el modelado se realizó a partir de figuras geométricas básicas, utilizando diversas herramientas y funciones de Blender para dar forma y mayor nivel de detalle a cada elemento.

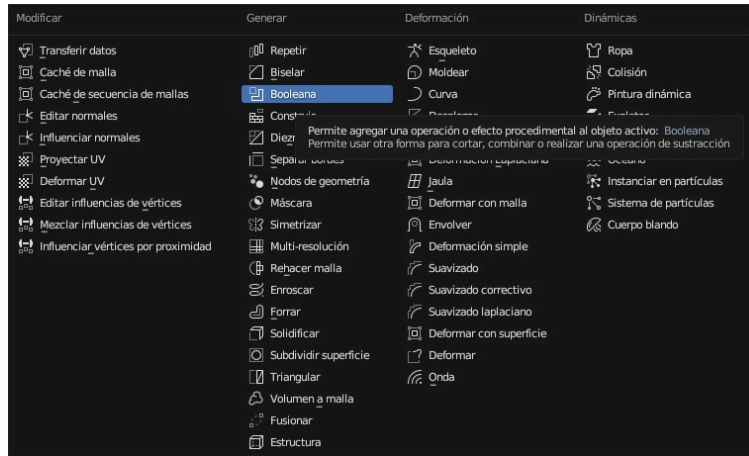


Ilustración 1. Modificadores de Blender

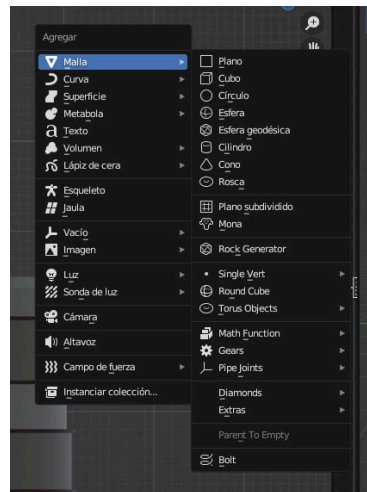


Ilustración 2. Figuras para agregar

Posteriormente, se inició el diseño de los motores, los cuales presentaban una mayor complejidad en su elaboración. El proceso de modelado se llevó a cabo por etapas: primero se diseñó la carcasa del motor, seguida de la bornera, y luego la parte interna, que incluye el rotor con su respectivo bobinado. Adicionalmente, se

modelaron los ejes de transmisión, acoplados al eje principal del motor. A continuación, se presenta el diseño final de los motores desde diferentes perspectivas:

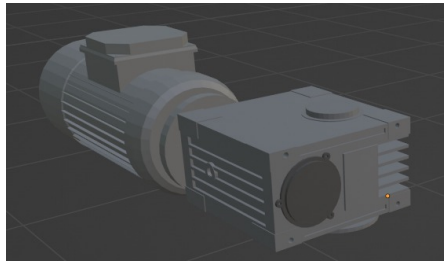


Ilustración 3. Vista isométrica frontal



Ilustración 4. Vista Isométrica Posterior del motor

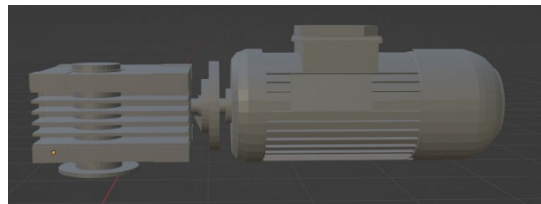


Ilustración 5. Vista lateral derecha del motor

Después, se procedió con el montaje de la base del reactor, empleando exclusivamente figuras geométricas básicas. Para incorporar detalles específicos, se utilizaron distintos modificadores de Blender; en particular, para la creación de orificios, se implementó el modificador booleano.

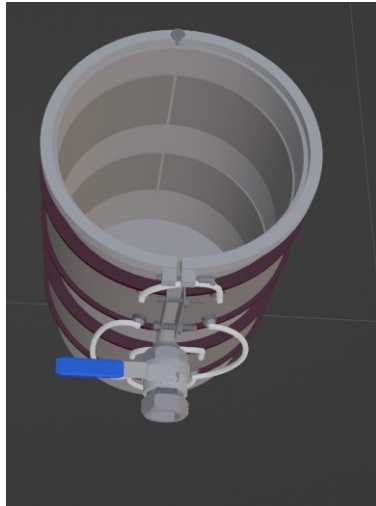


Ilustración 6. Vista isométrica de la base del reactor

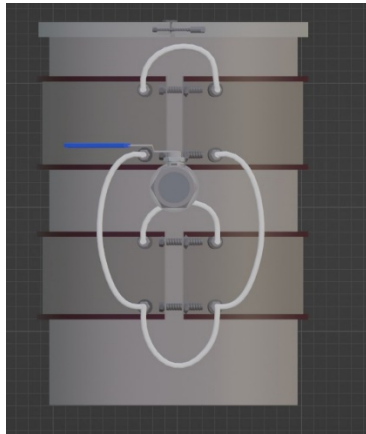


Ilustración 7. Vista frontal de la base del reactor

Finalmente, para completar el diseño del reactor, se elaboró la tapa, la cual integra diferentes instrumentos de medición y control, como el peachímetro, la termocupla, el manovacúmetro y la válvula de escape.

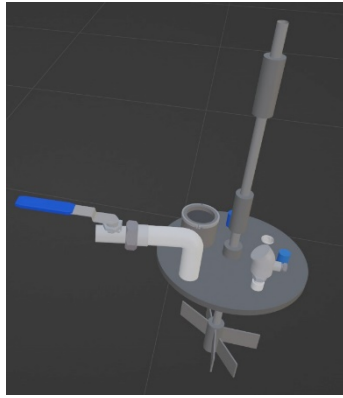


Ilustración 8. Vista isométrica de la tapa del reactor

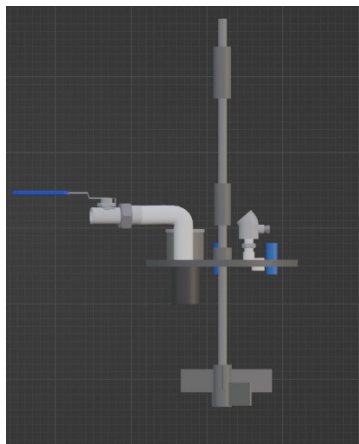


Ilustración 9. Vista frontal de la tapa del reactor

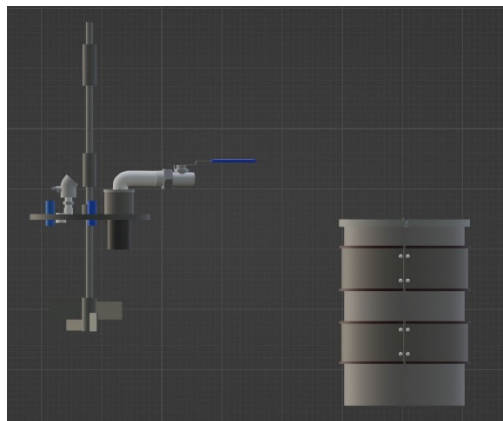


Ilustración 10. Vista posterior de la tapa y base del reactor

En adición, se diseñó la mesa que soporta el montaje, la cual incluye también el cajón destinado a la alimentación eléctrica del sistema, el semáforo y la caja de conexiones eléctricas asociadas.

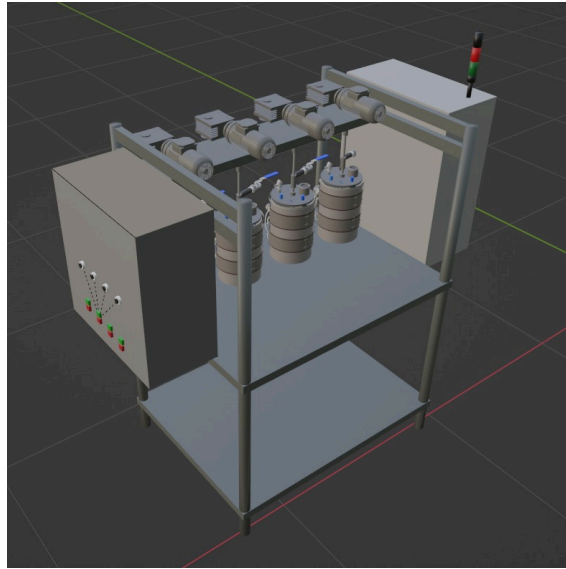


Ilustración 11. Vista isométrica del proceso de biohidrógeno



Ilustración 12. Vista posterior del montaje de producción de biohidrógeno

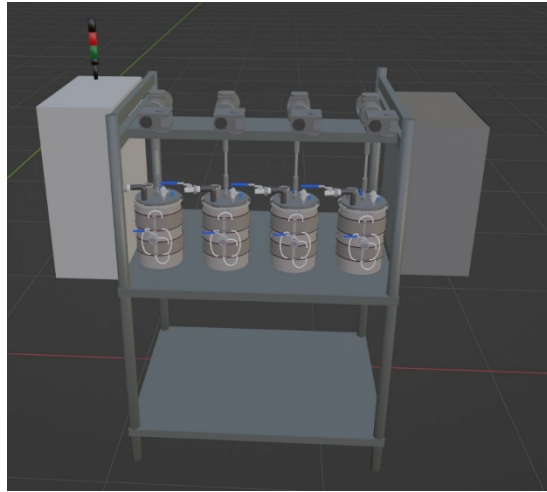


Ilustración 13. Vista frontal del montaje de producción de biohidrógeno

10.2. Diseño Unreal

Una vez finalizado el modelado 3D del sistema de producción de biohidrógeno en Blender, se procedió a exportar cada uno de los componentes en formato FBX, cuidando que las transformaciones de escala, rotación y posición estuvieran aplicadas correctamente. Este paso fue esencial para garantizar que las piezas ingresaran a Unreal Engine con la orientación y jerarquía adecuadas, evitando errores de colisión o desfase entre elementos. Se configuró la exportación para que cada componente del sistema (biorreactor, tuberías, sensores, válvulas, tanques de acumulación y estructuras de soporte) se mantuviera como una malla separada, lo cual permitió mayor control al momento de programar su comportamiento en el entorno virtual.

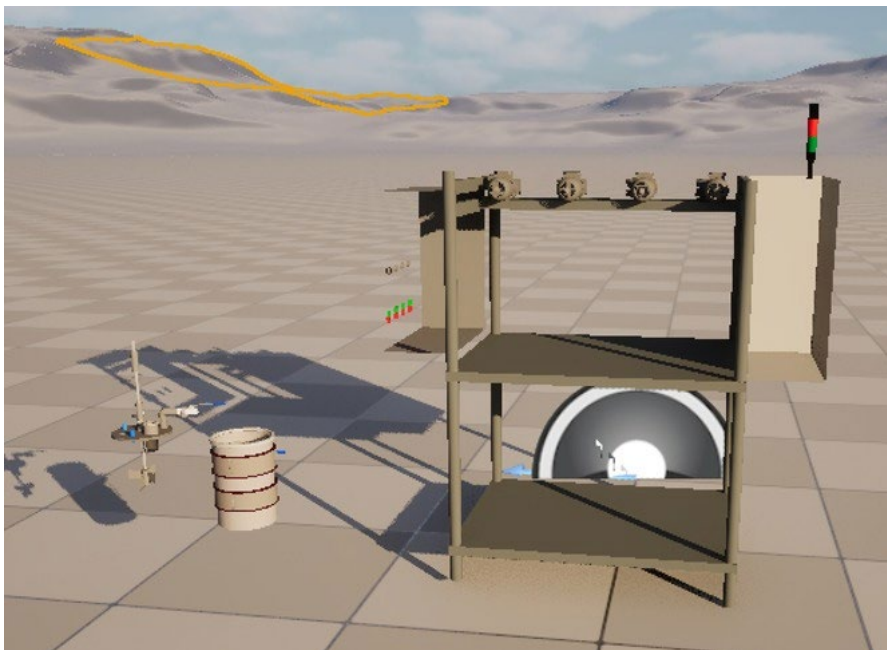


Ilustración 14. Vista frontal del montaje de producción de biohidrógeno en Unreal

En Unreal Engine 5.3 se creó un nuevo proyecto con una estructura de carpetas organizada por tipos de contenido: Modelos, Blueprints, Materiales, UI, y Partículas. Se importaron los modelos FBX y se verificó que todos los materiales básicos fuesen reconocidos adecuadamente. En los casos en los que los materiales no se tradujeron correctamente desde Blender, se crearon nuevos materiales dentro del motor para darles propiedades físicas y visuales más realistas, como transparencia para líquidos o reflejo metálico para superficies de acero inoxidable.

Con los elementos del sistema ya disponibles en Unreal, se inició la construcción del gemelo digital mediante el sistema visual de programación **Blueprints**. Se creó un **Blueprint Actor principal** que contenía todos los componentes clave del proceso, organizados en subcomponentes. Este Blueprint fue el núcleo del sistema, desde el cual se controló tanto el comportamiento del modelo como la lógica de simulación del proceso bioquímico.

La simulación del proceso de fermentación oscura se realizó utilizando variables internas que representaban parámetros críticos como: temperatura del reactor, pH, concentración del sustrato, presión acumulada y tasa de producción de biohidrógeno. Estas variables fueron programadas usando nodos de tipo **Float**, los cuales se actualizaron en tiempo real mediante eventos temporizados. Se utilizó el nodo "**Set Timer by Function**" para definir intervalos regulares de actualización que simulan la dinámica natural del sistema.

Además, se desarrollaron ecuaciones simplificadas dentro de los Blueprints utilizando nodos matemáticos que imitaban la relación entre las condiciones del reactor y la producción de gas. Por ejemplo, al disminuir el pH por debajo de cierto umbral, la producción de biohidrógeno se reducía gradualmente. Del mismo modo, si la temperatura superaba el rango óptimo, se generaban alertas visuales dentro del entorno.



Ilustración 15. Vista de programación en con Blueprints

Para permitir una visualización clara del estado del sistema, se diseñó una **interfaz gráfica** mediante UMG (Unreal Motion Graphics). Esta UI mostraba en pantalla valores en tiempo real de las variables críticas, acompañados por indicadores visuales como barras de progreso, gráficos de línea y alarmas de color. También se incluyeron botones que permitían simular acciones del operador, tales como encender la agitación del biorreactor, iniciar el sistema de recirculación o modificar el tipo de sustrato utilizado.

El comportamiento del sistema era sensible a estas acciones. Por ejemplo, al activar la agitación, se modificaban los valores internos del reactor, lo que impactaba directamente en la eficiencia de la producción. Todo esto se logró sin necesidad de escribir una sola línea de código tradicional, utilizando únicamente nodos de Blueprints conectados de forma lógica y modular.

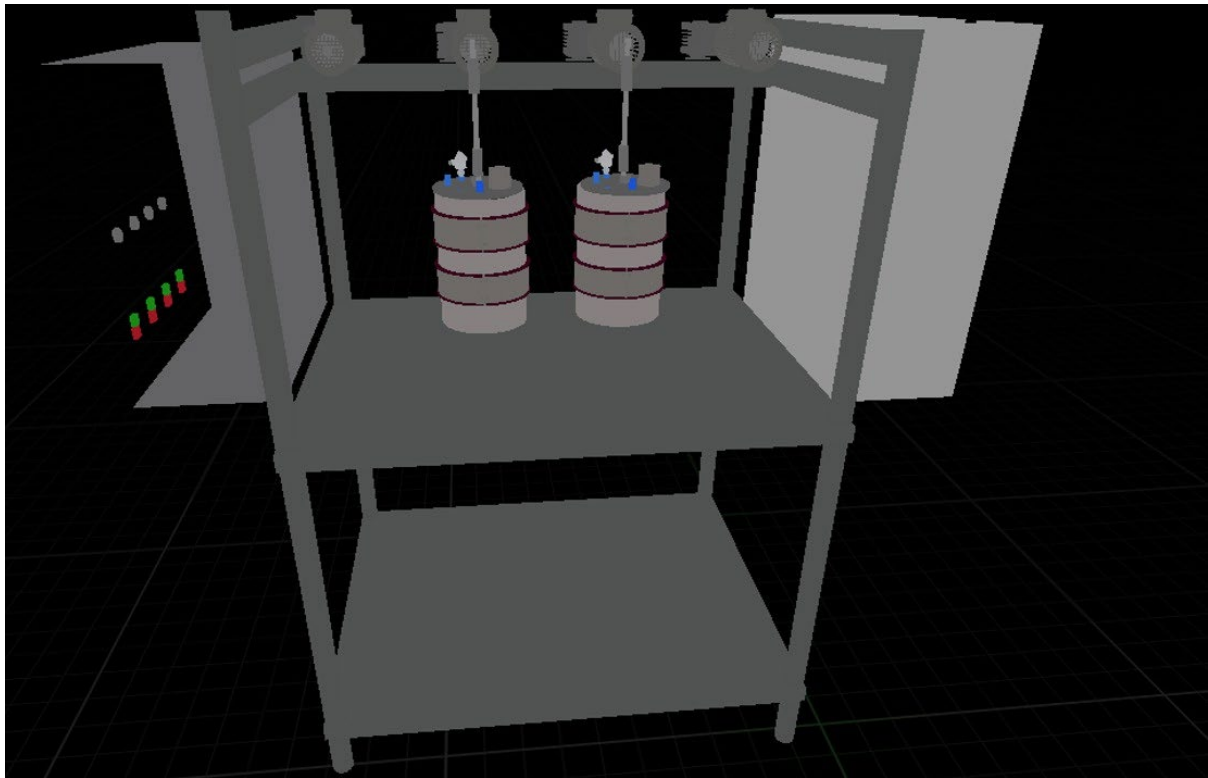


Ilustración 16. Vista frontal del montaje con la programación incluida y de cómo queda el gemelo final

11. Conclusiones

El desarrollo de un gemelo digital del proceso de fermentación oscura para la producción de biohidrógeno demostró ser una herramienta transformadora en la optimización de procesos biotecnológicos. La implementación de tecnologías de modelado 3D en Blender y de simulación en Unreal Engine permitió crear una representación virtual precisa y dinámica del sistema físico

Esta herramienta permitió identificar condiciones operativas óptimas antes de su implementación física, reduciendo costos experimentales y riesgos asociados. Asimismo, evidenció el potencial disruptivo de los gemelos digitales como puente entre la investigación en laboratorio y la escalabilidad industrial, acelerando la transición hacia modelos productivos más sostenibles y alineados con los objetivos de desarrollo sostenible (ODS).

El proyecto no solo aporta a la valorización de residuos orgánicos como el lactosuero para la generación de biohidrógeno, sino que también fortalece la economía circular y la diversificación de la matriz energética, contribuyendo significativamente a la mitigación del

cambio climático. Además, el uso de herramientas accesibles como Blender y Unreal Engine democratiza el acceso a tecnologías de simulación avanzada, fomentando la innovación en el sector académico y productivo.

Finalmente, este trabajo evidencia la importancia de la integración interdisciplinaria y la capacitación técnica continua para el desarrollo de soluciones tecnológicas de alto impacto, reafirmando el rol estratégico de los gemelos digitales en la Industria 4.0 y su potencial para transformar el futuro energético.

12. Bibliografía

Blanco Londoño, S. A., & Rodríguez Chaparro, T. (2012). Producción de biohidrógeno a partir de residuos mediante fermentación oscura: una revisión crítica (1993-2011). *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 20(3), 398-411. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052012000300014>

Castiblanco, O., & Guerrero, D. (2023). Producción de hidrógeno a partir de biomasa por medio de fermentación oscura: una revisión. *Perfiles*, 1(30), 32-46. <https://doi.org/10.47187/perf.v1i30.237>

Eurecat. (s.f.). Eurecat creará un gemelo digital basado en inteligencia artificial para la producción de hidrógeno verde a partir de residuos. Recuperado de <https://eurecat.org/es/eurecat-creara-un-gemelo-digital-basado-en-inteligencia-artificial-para-la-produccion-de-hidrogeno-verde-a-partir-de-residuos/>

Feria Lara, A. L., De La Cruz, R. D., Pérez Vidal, H., Pacheco Sosa, J. G., Torres Torres, J. G., & López Cuauhtémoc, I. (2022). Producción biológica de hidrógeno mediante fermentación oscura. *Revista de Ciencias Básicas*, 8.

Genia Bioenergía. (s.f.). Fermentación oscura para producir gases renovables. Recuperado de <https://geniabioenergy.com/dark-fermentation-para-gases-renovables/#:~:text=Incremento%20en%20la%20estabilizaci%C3%B3n%20de,e1%20biohidr%C3%B3geno%20y%20e1%20biog%C3%A1s>

Geniabioenergía. (s.f.). Gemelo digital para plantas de biogás. Recuperado de <https://geniabioenergy.com/gemelo-digital-para-plantas-de-biogas/>

Gómez, A., & Sánchez, B. (2018). Impacto ambiental del lactosuero en la industria láctea. *Revista de Gestión Ambiental de los Lácteos*, 15(3), 123-135.

Iberdrola. (2020). Gemelos digitales, claves en la Cuarta Revolución Industrial. Recuperado el 30 de octubre de 2020, de <https://www.iberdrola.com/innovacion/gemelos-digitales>

Norma ISO 23247-1:2021. Marco de gemelos digitales para aplicaciones industriales. Organización Internacional de Normalización.

Academia Khan. (s.f.). Fermentación y respiración anaeróbica. Recuperado de <https://es.khanacademy.org/science/ap-biology/celular-energetics/celular-respiration-ap/a/fermentation-and-anaerobic-respiration>

López, J., & Martínez, P. (2022). Optimización de procesos de biohidrógeno a partir de residuos orgánicos. *Revista de Energías Renovables*, 28(2), 78-89.

Martí Coll, A., Rodríguez Ramos, A., & Llanes-Santiago, O. (2024). Selección óptima de observadores de Koopman aplicados a DMDC en la obtención de gemelos digitales. *Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*, 45(2), 1–13.

<https://research.ebsco.com/linkprocessor/plink?id=420d621a-4c05-3f3d-9631-50bccef9dd97>

Martínez, L., Pérez, C., & Ruiz, D. (2021). Producción de hidrógeno a partir de subproductos de la industria láctea. *Revista Internacional de Energía del Hidrógeno*, 46(12), 6789-6801.

Martínez, V., & García, R. (2010). Fermentación oscura, fotofermentación y biofotólisis: análisis de su aplicación en secuencia para la producción de hidrógeno biológico. *Puerta de investigación*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2415.9844>

Microsoft. (s.f.). Gemelos digitales de Azure. Recuperado de <https://azure.microsoft.com/es-es/products/digital-twins>

Pérez, C., Martínez, L., & Torres, M. (2021). Análisis del potencial del lactosuero como materia prima para la producción de hidrógeno verde. *Estudios de Energías Renovables*, 14(4), 200-210.

Ratía, J. (2024, 5 de abril). Biohidrógeno, ¿tan prometedor como dicen? *Rojo 2030*. Recuperado de <https://red2030.com/biohidrogeno-tan-prometedor-como-dicen/>

Robles, J., Martín, C. y Díaz, M. (2023). OpenTwins: un marco de código abierto para el desarrollo de gemelos digitales compositivos de próxima generación. *Computadoras en la industria*, 152, 104007. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2023.104007>

Rodríguez, A. (2019, 11 de junio). Hablemos de gemelos digitales. Recuperado el 30 de octubre de 2020, de <https://news.sap.com/latinamerica/2019/06/hablemos-de-gemelos-digitales-bl-0g>

Rodríguez, M., Jiménez, F. y Morales, R. (2020). Estadísticas globales sobre la producción de lactosuero en la industria láctea. *Estadísticas de la Industria Láctea*, 22(1), 45-60.

Siemens. (s.f.). Esfera mental. Recuperado de <https://www.siemens.com/co/es/productos/software/mindsphere.html>

Silvestre, G. (2024, 14 de octubre). ¿Por qué la fermentación oscura puede ser una alternativa sostenible para valorizar residuos? AINIA. Recuperado de <https://www.ainia.com/ainia-news/por-que-la-fermentacion-oscura-puede-ser-una-alternativa-sostenible-para-valorizar-residuos/>

Sobrino, C. (2022, 5 diciembre). Gemelos digitales: Definición, tipos y características. CAPTIA. Recuperado de <https://www.captia.es/blog/gemelos-digitales.html>

Universidad de Málaga. (s.f.). Gemelos abiertos. Recuperado de <https://www.uma.es/sala-de-prensa/noticias/ingenieros-de-la-uma-desarrollan-gemelos-digitales-de-ultima-generacion-mas-accesibles-y-versatiles/>

Varas Chiquito, M., García Plua, J. C., Bustamante Chong, M., & Bustamante Chong, C. (2020). Gemelos digitales y su evolución en la industria. *RECIMUNDO*, 4(4), 300–308. [https://doi.org/10.26820/recimundo/4.\(4\).noviembre.2020.300-308](https://doi.org/10.26820/recimundo/4.(4).noviembre.2020.300-308)

Blender Foundation. (2023). Blender user manual. <https://www.blender.org/manual/>

- Hennessy, J. L., & Patterson, D. A. (2017). *Computer architecture: A quantitative approach* (6th ed.). Morgan Kaufmann.
- Patterson, D. A., & Hennessy, J. L. (2021). *Computer organization and design* (5th ed.). Morgan Kaufmann.
- Sommerville, I. (2019). *Software engineering* (10th ed.). Pearson.
- Stallings, W. (2020). *Computer organization and architecture* (11th ed.). Pearson.

