

Desarrollo de una aplicación móvil con realidad aumentada para la visualización interactiva de curvas compuestas y análisis Pinch en procesos de integración energética

María Alejandra Cortés García

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Químico

Director

Giovanni Morales Medina

PhD. Ingeniería química

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías físicoquímicas
Escuela de Ingeniería Química
Bucaramanga
2026

Tabla de contenido

Introducción	8
1. Objetivos	10
1.1. Objetivo general	10
1.2. Objetivos específicos	10
2. Marco conceptual	10
2.1. Integración energética en ingeniería química	11
2.2. Análisis Pinch	12
2.2.1. Fundamentos y evolución del método:	12
2.2.2. Curvas compuestas, punto de Pinch y efecto del DTmin:	12
2.2.3. Aplicaciones industriales y educativas.	13
2.3. Limitaciones en la enseñanza y aplicación del análisis Pinch	14
2.3.1. Complejidad en la interpretación de diagramas 2D.	14
2.3.2. Brecha entre teoría académica y práctica industrial.	15
2.4. Realidad aumentada (RA): fundamentos y aplicaciones	15
2.5. RA en la ingeniería química y en el análisis Pinch	16
2.5.1. Potencial de la RA en la visualización de procesos térmicos.	16
2.5.2. Modelado 3D de intercambiadores de calor y esquemas de planta.	17
2.5.3. Posibilidades de interactividad para comprender curvas compuestas y DTmin.	17
3. Descripción metodológica	19
3.1. Tipo y enfoque de investigación	19

	3
3.2. Población y muestra	19
3.3. Técnicas e instrumentos de recolección de datos	19
3.4. Técnicas de procesamiento y análisis de los datos	19
3.5. Procedimiento	21
3.5.1. Etapa 1. Diseño de modelos tridimensionales de equipos y procesos	21
3.5.2. Etapa 2. Programación de curvas compuestas y punto de Pinch en RA	21
3.5.3. Etapa 3. Desarrollo de la interfaz de usuario	22
3.5.4. Etapa 4. Validación con caso de estudio académico	23
4. Resultados	24
4.1. Diseño y optimización de Modelos digitales de intercambiadores de calor para entornos de realidad aumentada	24
4.1.1 Selección y Modelado Paramétrico de Equipos	25
4.1.2. Optimización de Mallas y Texturizado (Baking)	27
4.1.3. Resultados del Diseño de Activos	27
4.2. Visualización interactiva de curvas compuestas mediante la implementación de la lógica algorítmica	28
4.2.1. Identificación y Visualización del Punto de Pinch en RA	29
4.2.3. Desarrollo del Sistema de Interactividad y Sensibilidad (DTmin)	29
4.2.2. Entregable: Módulo Funcional	30
4.3. Arquitectura de la interfaz de usuario (UI) y sistema de exploración interactiva en tiempo real	30

4.4. Validación de la herramienta mediante caso de estudio y evaluación del impacto didáctico en la formación de ingenieros	33
4.4.1 Demografía y relación inicial con la RA	33
4.4.2 Resultados de la percepción de evaluación técnica	34
4.4.3 Validación del conocimiento posterior al uso	36
4.4.4. Percepciones de los estudiantes sobre el uso de modelos 3D	37
5. Conclusiones	39
6. Recomendaciones	42
Referencias Bibliográficas	43
Apéndices	46

Lista de tablas

Tabla 1. Catálogo técnico de la biblioteca de activos (HEN Library).	26
Tabla 2. Matriz de Programación y Funcionalidad del Módulo de RA.	30

Lista de Apéndices

Apéndice A. Interfaz de modelado 3D del intercambiador de calor de tubo-coraza.	47
Apéndice B. Detalle interno de tubos del intercambiador de calor modelado.	48
Apéndice C. Diseño esquemático 2D del intercambiador de calor de tubo y coraza.	49
Apéndice D. Diseño esquemático 3D del intercambiador de calor de tubo y coraza.	49
Apéndice E. Texturizado de superficies/elementos del modelo 3D del intercambiador de calor.	50
Apéndice F. Esquema de visualización de curvas compuestas.	50
Apéndice G. Interfaz de usuario de Unity+Vuforia.	51
Apéndice H. Participantes en la encuesta	51
Apéndice I. Tiempo de resolución de ejercicios por parte de cada grupo	51
Apéndice J. Experiencia previa de los participantes en el manejo de RA	52
Apéndice K. Resultados en torno a la visualización espacial	53
Apéndice L. Claridad al identificar componentes internos	53
Apéndice M. Resultados sobre la capacidad de visualizar la transparencia del modelo	54
Apéndice N. Resultados sobre facilidad para rotar y diseccionar equipo	54
Apéndice O. Percepción en mejoras del 3D frente al 2D	55
Apéndice P. Experiencias efectivas a partir del uso de modelos 3D	55
Apéndice Q. Estado del arte	56
Apéndice R. Protocolo de Evaluación: Análisis Pinch Tradicional vs. App AR-Unity	59
Apéndice S. Código HTML App	61

Resumen

Título: Desarrollo de una aplicación móvil con realidad aumentada para la visualización interactiva de curvas compuestas y análisis Pinch en procesos de integración energética¹

Autor: María Alejandra Cortés García²

Palabras clave: Análisis Pinch, Integración Energética, Realidad Aumentada (RA), Curvas Compuestas, Optimización de Procesos, Unity, Vuforia, Redes de Intercambio de Calor.

Descripción: La optimización de sistemas térmicos mediante el análisis Pinch es una estrategia fundamental para la eficiencia energética y el diseño industrial sostenible. Sin embargo, la interpretación de curvas compuestas en formatos bidimensionales convencionales suele presentar barreras cognitivas que dificultan la comprensión técnica de la interacción entre corrientes y el impacto crítico del ΔT_{min} . Esta investigación desarrolla una aplicación móvil basada en Realidad Aumentada (RA), utilizando los motores Unity y Vuforia, diseñada para la visualización tridimensional e interactiva de redes de intercambio de calor.

La metodología se estructura en cuatro fases, partiendo por el modelado 3D de equipos de transferencia de calor, la programación de algoritmos para el renderizado dinámico de perfiles térmicos y el punto de Pinch, el desarrollo de una interfaz de usuario interactiva y la validación mediante un caso de estudio académico. La herramienta permite la manipulación de parámetros operativos en tiempo real, facilitando la observación de cambios en la carga térmica acumulada y la configuración de la red. Al integrar elementos virtuales sobre el entorno físico, se mejora la percepción de fenómenos complejos como los flujos de calor invisibles y los gradientes térmicos. Este proyecto reduce la brecha de abstracción en la formación de ingenieros químicos, y también se posiciona como un recurso avanzado para el análisis y la toma de decisiones en procesos de integración energética industrial.

¹ Trabajo de Grado

² Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Giovanni Morales Medina. PhD en Ingeniería Química.

Abstract

Title: Development of a mobile application with augmented reality for the interactive visualization of composite curves and Pinch analysis in energy integration processes³

Author: María Alejandra Cortés García⁴

Keywords: Pinch Analysis, Energy Integration, Augmented Reality (AR), Composite Curves, Process Optimization, Unity, Vuforia, Heat Exchanger Networks.

Description: The optimization of thermal systems through Pinch analysis is a fundamental strategy for energy efficiency and sustainable industrial design. However, interpreting composite curves in conventional two-dimensional formats often presents cognitive barriers that hinder the technical understanding of stream interactions and the critical impact of DT_{min} . This research develops a mobile application based on Augmented Reality (AR), using the Unity and Vuforia engines, designed for the three-dimensional and interactive visualization of heat exchanger networks.

The methodology is structured in four phases: starting with the 3D modeling of heat transfer equipment, programming algorithms for dynamic rendering of thermal profiles and the Pinch point, developing an interactive user interface, and validating through an academic case study. The tool allows real-time manipulation of operating parameters, facilitating the observation of changes in accumulated heat load and network configuration. By integrating virtual elements into the physical environment, the perception of complex phenomena such as invisible heat flows and thermal gradients is enhanced. This project reduces the abstraction gap in the training of chemical engineers and also positions itself as an advanced resource for analysis and decision-making in industrial energy integration processes.

³ Degree Work

⁴ Faculty of Physicochemical Engineering. School of Chemical Engineering. Director: Giovanni Morales Medina. Ph.D. in Chemical Engineering.

Introducción

El diseño de redes de intercambio de calor mediante el análisis Pinch constituye una herramienta fundamental en la optimización energética de plantas de procesos, al permitir identificar el punto óptimo de integración térmica y minimizar el consumo de servicios externos (Linnhoff & Hindmarsh, 1983). No obstante, su enseñanza y aplicación práctica presentan limitaciones, ya que la interpretación bidimensional de curvas compuestas y del punto de Pinch dificulta la comprensión de la interacción entre múltiples corrientes térmicas y parámetros como

el DT_{min} , lo que genera una condición no deseada en la formación de ingenieros químicos (Kemp, 2011a).

La realidad aumentada (RA) ofrece una alternativa para superar estas barreras al posibilitar la visualización tridimensional e interactiva de fenómenos complejos, favoreciendo el aprendizaje y la toma de decisiones en ingeniería (Chollet & Scherer, 2017). Sin embargo, su aplicación en procesos químicos sigue siendo limitada frente a otros campos, lo que evidencia una brecha tecnológica y pedagógica (Mutambara & Bayaga, 2021). Ante esta situación, se propone el desarrollo de una aplicación móvil en Unity y Vuforia que permita visualizar en RA las curvas compuestas, el punto de Pinch y los flujos de calor sobre esquemas de planta, incorporando controles interactivos para modificar DT_{min} en tiempo real.

Esta desconexión entre la teoría abstracta y su ejecución técnica se vuelve crítica en un entorno industrial que demanda una transición energética acelerada y la implementación de tecnologías de Industria 4.0. Mientras que el análisis Pinch tradicional se basa en representaciones estáticas, la complejidad de las plantas modernas —caracterizadas por una integración térmica intensiva y la necesidad de respuestas dinámicas ante variaciones operativas— exige herramientas que reduzcan el sesgo de interpretación. La integración de la

Realidad Aumentada no solo actúa como un facilitador pedagógico, sino como un puente hacia el concepto de “gemelo digital” aplicado a la eficiencia térmica, permitiendo que el ingeniero visualice la termodinámica del proceso no como un gráfico aislado, sino como una variable espacialmente distribuida en la planta. En este sentido, la capacidad de manipular el ΔT_{min} de forma interactiva sobre la geometría real de los equipos abre una nueva frontera en la síntesis de redes de intercambio de calor (HEN), donde la intuición técnica es potenciada por la visualización inmersiva.

1. Objetivos

1.1. Objetivo general

Desarrollar una aplicación móvil basada en realidad aumentada que permita la representación tridimensional e interactiva de las curvas compuestas, el punto de Pinch y los flujos de calor en esquemas de planta, con el fin de facilitar la comprensión y el análisis de redes de intercambio de calor en ingeniería química.

1.2. Objetivos específicos

- I. Diseñar modelos tridimensionales de intercambiadores de calor y esquemas de procesos térmicos para su implementación en realidad aumentada.
- II. Programar la visualización interactiva de curvas compuestas y del punto de Pinch en un entorno virtual, integrando controles dinámicos para la variación de DT_{min} y flujos de calor.
- III. Desarrollar una interfaz de usuario intuitiva en Unity + Vuforia que permita la manipulación y exploración de los modelos tridimensionales en tiempo real.
- IV. Validar la aplicación mediante un caso de estudio académico de análisis Pinch, evaluando su utilidad como recurso didáctico y de apoyo en el diseño de integración energética.

2. Marco conceptual

2.1. Integración energética en ingeniería química

La integración energética en la ingeniería química consiste en diseñar procesos para maximizar la reutilización interna de energía térmica, minimizando el uso de utilidades externas (vapor, agua de enfriamiento, electricidad térmica). Este enfoque, conocido también como heat integration o process integration, busca optimizar el intercambio de calor entre corrientes dentro de un proceso de tal forma que el consumo neto de calor sea el mínimo posible. En ese sentido, la integración energética no es solo una mejora operativa, sino un componente central en el diseño sostenible y en la reducción de costos energéticos (Tan & Foo, 2023).

La integración energética se integra con otras áreas del diseño de procesos, como el balance de materia, el análisis termodinámico y la simulación de procesos, formando un enfoque holístico. En lugar de ver cada unidad de proceso aisladamente, se analizan sinergias térmicas posibles entre todas las corrientes de un sistema — por ejemplo, aprovechar el calor residual de una corriente caliente para calentar otra corriente fría en lugar de recurrir a utilidades externas — con lo que se reduce el consumo energético global. En los últimos cuarenta años, los avances en integración energética (incluyendo análisis Pinch y métodos complementarios de optimización matemática) han contribuido significativamente a la eficiencia energética en plantas industriales (Carrillo et al., 2013).

Un desafío en la integración energética es el compromiso entre la inversión en intercambiadores de calor (mayor área, mayor costo) frente al ahorro de operación por menor uso de utilidades externas. Por ello, muchos estudios combinan el análisis energético con criterios económicos (análisis costo-beneficio) y restricciones reales (espaciales, de materiales, control, disponibilidad de utilidades) para hallar un diseño factible y rentable (Tan & Foo, 2023).

2.2. Análisis Pinch

2.2.1. Fundamentos y evolución del método:

El análisis Pinch es una metodología estructurada para determinar el consumo energético mínimo y las condiciones ideales de intercambio de calor dentro de un proceso químico. Su fundamento reside en construir perfiles de calor que representan todas las corrientes calientes (que liberan calor) y frías (que requieren calor), y luego analizar sus posibilidades de emparejamiento bajo restricciones de gradientes térmicos (Kemp, 2011).

El origen del método se remonta a finales de los años setenta, cuando Bodo Linnhoff y colegas desarrollaron la idea del “punto de Pinch” como el cuello de botella térmico que define la barrera máxima para intercambio interno de calor. Desde entonces, el método ha evolucionado para incorporar variantes — por ejemplo, integración con energías renovables, extensiones para sistemas agua-hidrógeno, redes eléctricas y sistemas híbridos (Terrapon-Pfaff et al., 2018). Estas extensiones permiten aplicar el análisis Pinch en contextos más complejos y adaptarse a las demandas modernas de sostenibilidad (Tan & Foo, 2023).

Una revisión reciente presenta una tipificación de las técnicas clásicas y extendidas, abarcando análisis de calor, agua, hidrógeno y redes de potencia, señalando cómo algunas versiones modernas combinan el Pinch clásico con programación matemática para optimización multiobjetivo (abordando energía, costo y emisiones) (Cao et al., 2021).

2.2.2. Curvas compuestas, punto de Pinch y efecto del DT_{min} :

El método Pinch se basa en la construcción de curvas compuestas: una curva compuesta caliente que representa la suma térmica de todas las corrientes calientes, y una curva compuesta fría que representa la suma de las corrientes frías. Estas curvas se grafican típicamente como

carga térmica acumulada vs. temperatura, permitiendo visualizar el potencial máximo de intercambio interno (Kemp, 2011b).

El punto de Pinch se identifica como el punto de mínima separación entre ambas curvas (temperatura caliente y fría). Por encima del Pinch, las corrientes deben ceder calor hacia abajo; por debajo del Pinch, deben recibir calor hacia arriba. Una regla fundamental del diseño es que no debe haber cruce de intercambio térmico a través del Pinch, pues de hacerlo se violaría la segunda ley de la termodinámica. La localización del Pinch delimita la zona donde la recuperación térmica es óptima (Kemp, 2011b).

El parámetro DT_{min} (diferencia mínima de temperatura entre las corrientes caliente y fría en un intercambio) es crítico: al disminuir DT_{min} se permite una mayor recuperación de calor, reduciendo las utilidades externas, pero con el costo de mayores áreas de intercambio y complejidad constructiva. En contraste, un DT_{min} elevado reduce la inversión requerida, pero aumenta la demanda de utilidades externas. Este efecto de compensación es uno de los elementos centrales del diseño de redes de intercambio. La sensibilidad del diseño al valor de DT_{min} es alta: pequeños cambios en DT_{min} pueden desplazar el punto de Pinch, modificar las exigencias de calor y enfriamiento mínimos y alterar el número de intercambiadores requeridos. Por ello, en la práctica de diseño, los ingenieros suelen probar varios valores de DT_{min} y comparar resultados energéticos y económicos. (Tan & Foo, 2023).

2.2.3. Aplicaciones industriales y educativas.

En la práctica industrial, el análisis Pinch se ha aplicado exitosamente en sectores como petroquímica, refinerías, producción química, plantas de gas y plantas de energía térmica. Por ejemplo, ha sido usado para optimizar secuencias de destilación integradas térmicamente, eliminar intercambios contraPinch y equilibrar carga de utilidades con recuperación interna (New

directions in Pinch Methodology, 2018). También se ha extendido a aplicaciones de integración de calor y potencia (heat & power Pinch) para optimizar simultáneamente la generación energética y el intercambio térmico (Tan & Foo, 2023).

Desde el punto de vista educativo, el análisis Pinch es un tema típico en cursos de diseño de procesos y eficiencia energética. Sin embargo, muchos estudiantes perciben el método como abstracto y difícil de visualizar, especialmente en ejercicios con múltiples corrientes que generan curvas complejas. Libros de referencia como Kemp: Pinch Analysis and Process Integration (2006) siguen siendo un pilar en la enseñanza del método, proporcionando tanto la teoría como ejemplos prácticos y casos de estudio.

2.3. Limitaciones en la enseñanza y aplicación del análisis Pinch

2.3.1. Complejidad en la interpretación de diagramas 2D.

Una de las limitaciones más frecuentes en la enseñanza del análisis Pinch radica en cómo los estudiantes perciben e interpretan las curvas compuestas bidimensionales. Aunque conceptualmente elegantes, las gráficas representan un gran nivel de abstracción: combinar múltiples corrientes en curvas sumadas, identificar el punto de Pinch y luego trasladar esa información a una red de intercambiadores exige un salto de pensamiento complejo. Muchos estudiantes tienen dificultad en conectar los datos termodinámicos (temperaturas, flujos de calor, capacidades térmicas) con la forma geométrica de las curvas.

Además, en los enfoques tradicionales de enseñanza, las curvas son estáticas y no permiten una exploración dinámica — por ejemplo, cambiar DT_{min} y ver cómo las curvas se separan o se acercan en tiempo real — lo cual limita la comprensión profunda de la sensibilidad del diseño. Esta falta de interactividad impide que el alumno comprenda de forma intuitiva cómo pequeñas variaciones en los parámetros afectan el diseño energéticamente óptimo.

2.3.2. Brecha entre teoría académica y práctica industrial.

Otra restricción significativa es la brecha entre los ejemplos académicos idealizados y las condiciones reales en la industria. En la enseñanza, con frecuencia los ejercicios se diseñan con datos completos, sin pérdidas de calor, sin restricciones espaciales, sin penalizaciones de tuberías ni coste de bombeo, y con intercambios ideales posibles. Sin embargo, en la industria los ingenieros deben considerar aspectos prácticos que no se reflejan en esos ejercicios: restricciones de espacio, pérdidas térmicas, costos de tuberías, mantenimiento, control térmico, problemas operativos y limitaciones de operación.

Además, muchas veces los softwares industriales integran versiones más complejas del análisis (considerando dinámica, costos específicos y restricciones adicionales) que no suelen enseñarse en el aula. Al ingresar al entorno industrial, el ingeniero recién formado puede verse sorprendido por los matices prácticos omitidos en la formación académica, lo que reduce la aplicabilidad directa del conocimiento adquirido.

2.4. Realidad aumentada (RA): fundamentos y aplicaciones

La realidad aumentada (RA) es una tecnología que superpone elementos virtuales (modelos 3D, animaciones, datos numéricos) sobre el mundo real en tiempo real, promoviendo una percepción híbrida entre lo tangible y lo digital. En contraste con la realidad virtual (VR), que reemplaza completamente el entorno sensorial, la RA mantiene la conexión con el entorno físico, enriqueciendo la experiencia sin aislarla. En educación y entrenamiento, la RA ha demostrado aumentar la motivación, mejorar la visualización de conceptos complejos y fomentar la interacción directa (Chang et al., 2022).

En el ámbito educativo STEM (ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas), la RA ha sido usada para visualizar estructuras moleculares, fenómenos físicos invisibles (como flujos de

calor o campos de fuerza), diagramas 3D superpuestos a modelos reales y guías interactivas en laboratorios. Por ejemplo, un estudio sobre aplicaciones de RA en ingeniería química recopiló veintidós casos en los que se usó RA para apoyar el aprendizaje de operaciones unitarias, procesos químicos y equipos industriales, encontrando mejoras en comprensión espacial y motivación (Kumar et al., 2021).

Las aplicaciones de RA centradas en dispositivos móviles han sido exploradas como herramientas complementarias para cursos de ingeniería, proporcionando visualización en el entorno real del aula; no obstante, la implementación de RA enfrenta desafíos: requerimientos tecnológicos (hardware, calibración, potencia de procesamiento), desarrollo de software especializado, formación docente y evaluación pedagógica apropiada. El éxito de una aplicación de RA depende tanto de su diseño técnico como de su integración pedagógica.

2.5. RA en la ingeniería química y en el análisis Pinch

2.5.1. Potencial de la RA en la visualización de procesos térmicos.

Dentro de la ingeniería química, uno de los ámbitos más prometedores de la RA es la visualización de procesos térmicos invisibles, como flujos de calor, gradientes de temperatura y distribución espacial del intercambio térmico. Un enfoque innovador es superponer mapas de calor (colores, vectores) sobre modelos reales de equipos o tuberías, permitiendo al usuario "ver" cómo se intercambia calor en tiempo real. Esto reduce la barrera cognitiva entre la representación gráfica y la operación real del proceso.

Por ejemplo, experiencias de RA han sido usadas para representar en tiempo real conducción térmica en objetos físicos: el proyecto holo.lab empleó gafas inteligentes para mostrar con false-color la distribución de temperatura en objetos metálicos durante experimentos de laboratorio, entregando retroalimentación visual inmediata a los estudiantes (Strzys et al.,

2017). Esta estrategia permite que el alumno relacione acto experimental, predicción teórica y observación visual simultáneamente, fortaleciendo la comprensión de procesos térmicos.

2.5.2. Modelado 3D de intercambiadores de calor y esquemas de planta.

La RA permite proyectar modelos tridimensionales de intercambiadores (tipo casco y tubo, de placas, etc.) en el entorno real del aula o laboratorio, superponiéndolos sobre mesas o dispositivos físicos. Los estudiantes pueden moverse alrededor, inspeccionar secciones internas, visualizar el flujo de fluidos y observar gradientes térmicos dentro del equipo. Esta experiencia inmersiva ayuda a interiorizar cómo funciona un intercambiador de calor en la práctica, más allá del diagrama plano.

Además, los esquemas tridimensionales de planta o redes de intercambio pueden visualizarse sobre un espacio real, permitiendo a los usuarios ver interconexiones térmicas entre unidades y anticipar rutas de optimización energética dentro del diseño de planta. Esta capacidad espacial facilita la concepción de redes de calor en tres dimensiones y conecta la teoría del análisis Pinch con la topología real de una planta industrial (Strzys et al., 2017).

2.5.3. Posibilidades de interactividad para comprender curvas compuestas y DT_{min} .

Una de las contribuciones más potentes de la RA al análisis Pinch es la posibilidad de introducir interactividad en las curvas compuestas y en el parámetro DT_{min} . Por ejemplo, un usuario podría variar el valor de DT_{min} mediante controles interactivos y observar cómo las curvas compuestas se ajustan en tiempo real (acercándose o alejándose), cómo cambia el punto de Pinch, y cuál es el efecto sobre los requerimientos de utilidades térmicas. Al tocar segmentos de las curvas o puntos del intercambio, podrían desplegarse datos específicos (temperaturas, flujos, capacidades térmicas) contextualizados visualmente.

Adicionalmente, la RA podría superponer directamente los intercambiadores propuestos dentro del espacio de la gráfica, permitiendo al usuario "arrastrar" intercambiadores o modificar configuraciones térmicas de la red mientras observa el impacto energético al instante. Con codificación visual (colores, animaciones, advertencias visuales) podrían marcarse zonas inviables térmicamente (cuando las curvas cruzan inapropiadamente) o mostrar pérdidas térmicas implícitas. Esta retroalimentación visual amplifica el aprendizaje activo y la experimentación con parámetros, algo difícil de replicar con métodos tradicionales.

3. Descripción metodológica

3.1. Tipo y enfoque de investigación

El proyecto se desarrollará bajo un enfoque aplicado y cuantitativo-descriptivo, orientado a la construcción de herramientas tecnológicas que faciliten la representación y análisis del método Pinch en procesos térmicos. Se combina el desarrollo experimental de software con la validación en un caso de estudio académico.

3.2. Población y muestra

La población corresponde a los métodos de análisis de integración energética utilizados en ingeniería química, específicamente el análisis Pinch. La muestra estará representada por un caso de estudio académico de redes de intercambio de calor tomado de la literatura especializada con parámetros fijos, que servirá como base para la validación de la aplicación en las variaciones del ΔT_{min} .

3.3. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Se empleará la revisión bibliográfica de literatura científica y libros de referencia en integración energética y realidad aumentada. Adicionalmente, se recopilarán parámetros técnicos de procesos térmicos (DTmin, balances de energía, configuraciones de intercambio) para alimentar los modelos en la aplicación.

3.4. Técnicas de procesamiento y análisis de los datos

Los datos recolectados se organizarán en tablas y modelos matemáticos simplificados para representar curvas compuestas y puntos de Pinch. Estos se procesarán dentro de Unity mediante rutinas programadas en C#, lo que permitirá la representación tridimensional y la manipulación dinámica de las variables. La estructuración y procesamiento de los activos de datos orientados al modelado de curvas compuestas bidimensionales se ejecutará a través de un

entorno virtual dinámico, cuya interfaz se fundamentará en lenguajes de marcado y programación web (.html); Esta arquitectura tecnológica permitirá la incorporación de controladores lógicos para la parametrización y manipulación de las variables críticas, garantizando un entorno de análisis robusto para la evaluación de los resultados obtenidos

El análisis se realizará comparando los resultados visualizados en la aplicación con los obtenidos en el método Pinch convencional. Adicionalmente, el procesamiento de los datos incluirá el desarrollo de un algoritmo dinámico en C# encargado de procesar las propiedades termodinámicas de las corrientes, tales como temperaturas de entrada y salida, así como la capacidad calórica (mCP). Este módulo permitirá ejecutar de manera iterativa el Algoritmo de la Tabla del Problema en tiempo real dentro del entorno de realidad aumentada.

La lógica programada permitirá realizar automáticamente las siguientes operaciones:

1. **Normalización de datos:** clasificación automática de corrientes en fuentes (calientes) y sumideros (fríos).
2. **Cálculo de entalpías acumuladas:** generación de intervalos de temperatura y cálculo de la carga térmica total para cada segmento, construyendo las coordenadas ((H,T)) que definen las curvas compuestas.
3. **Renderizado procedimental:** utilización de componentes *Line Renderer* de Unity para representar las curvas compuestas directamente en el entorno de realidad aumentada, manteniendo una escala visual proporcional a las magnitudes energéticas del proceso analizado.

Asimismo, se implementará la integración entre Unity y Vuforia mediante *Image Targets* de alta calificación, permitiendo mantener la estabilidad espacial de la estructura del intercambiador de calor, aun cuando el usuario desplace el dispositivo móvil. La programación

incluirá sistemas de oclusión y manejo de capas para generar una percepción tridimensional coherente, favoreciendo la inspección interactiva de 360 grados del sistema térmico representado.

3.5. Procedimiento

Con el fin de dar cumplimiento a los objetivos, se plantean las siguientes etapas:

3.5.1. Etapa 1. Diseño de modelos tridimensionales de equipos y procesos

- **Actividades:**

- o Levantamiento bibliográfico y selección de equipos representativos (intercambiadores de calor y esquemas de planta).
- o Modelado 3D en software DCC (Digital Content Creation) y adaptación para Unity.
- o Desarrollo de esquemas de procesos térmicos integrados que representen un caso de estudio real.
- o Diseño de la topología de la red térmica, considerando una disposición espacial que evite el solapamiento visual (*visual clutter*) y facilite la inspección de los nodos de mezcla dentro del entorno de realidad aumentada.
- o Implementación de una distribución de planta que respete distancias de seguridad teóricas y permita la navegación e interacción del usuario alrededor del sistema.
- o Aplicación de codificación de color industrial basada en la norma ASME/ANSI para la diferenciación de corrientes calientes y frías, utilizando rojo para fuentes térmicas y azul para sumideros.

- **Entregable:** Biblioteca de modelos 3D optimizados para integración en la aplicación.

3.5.2. Etapa 2. Programación de curvas compuestas y punto de Pinch en RA

- **Actividades:**

- o Implementación en HTML de las curvas compuestas y del punto de Pinch.
- o Desarrollo de sliders y controles para variar DTmin y visualizar cambios dinámicos.
- o Programación del algoritmo dinámico de construcción de curvas compuestas mediante programación web, optimizando la exploración visual y el análisis técnico de los flujos de información procesados.
- o Configuración del flujo de datos para el cálculo de entalpías y la traslación algorítmica de resultados a un sistema de coordenadas cartesianas X, Y para su representación bidimensional.
- o Integración de tecnologías de visualización dinámica (como API Canvas o SVG) para la generación de gráficos vectoriales que representen las curvas compuestas de forma fluida y con baja latencia.
- o Desarrollo de un motor de mapeo que garantice la precisión geométrica de las curvas, asegurando que la representación visual se ajuste proporcionalmente a las escalas térmicas independientemente de la resolución del dispositivo.
- o Implementación de controladores basados en eventos (DOM) para la manipulación de variables en tiempo real, junto con una arquitectura de capas (Z-index) que permita la superposición e interacción clara entre los datos térmicos y las referencias gráficas.

- **Entregable:** Módulo funcional de visualización interactiva de curvas y Pinch.

3.5.3. Etapa 3. Desarrollo de la interfaz de usuario

- **Actividades:**
 - o Diseño de una interfaz amigable para la interacción con los modelos (intercambiador & curvas.
 - o Integración de controles de manipulación en tiempo real (rotación, zoom, interacción).

- **Entregable:** Interfaz gráfica integrada y funcional en dispositivo móvil (APLICATIVO RA EN FORMATO.APK + APLICATIVO WEB EN FORMATO .HTML).

3.5.4. Etapa 4. Validación con caso de estudio académico

- **Actividades:**

- o Selección de un caso de red de intercambio de calor de la literatura.
- o Comparación entre resultados del método Pinch convencional y la aplicación de tecnologías con RA.

- **Entregable:** Informe de validación con resultados comparativos y análisis de desempeño de la aplicación.

4. Resultados

4.1. Diseño y optimización de Modelos digitales de intercambiadores de calor para entornos de realidad aumentada

En la tabla 1 se presenta la biblioteca de activos digitales (assets) que representan con precisión técnica los componentes de una red de intercambio de calor (HEN). A diferencia del modelado CAD convencional para fabricación, el diseño orientado a RA requiere un equilibrio crítico entre el realismo técnico y la eficiencia computacional (low-poly count) para garantizar una tasa de refresco estable en dispositivos móviles.

Tabla 1. Catálogo técnico de la biblioteca de activos (HEN Library).

Categoría de Activo	Componente Digital	Especificación Técnica	Funcionalidad Dinámica en RA
Equipos de Transferencia	Intercambiador de Tubo y Coraza (TEMA Clase R)	Malla de media poligonalización (Mid-poly) con Normal Maps.	Cambio de color dinámico (Rojo/Azul), visualización de flujo interno y transparencia de coraza.
Equipos de Transferencia	Intercambiador de Placas	Geometría compacta optimizada para visualización de alta densidad.	Animación de expansión de placas para inspección de canales de flujo.
Servicios Externos	Calentador de Proceso (Heater)	Modelo con textura de aislamiento térmico y puntos de conexión (nodes).	Indicador visual de consumo de utilidad caliente (QHmin).
Servicios Externos	Enfriador (Cooler / Air-cooler)	Diseño con ventiladores animados por script de velocidad variable.	Indicador visual de consumo de utilidad fría (QCmin).
Infraestructura	Red de Tuberías y Válvulas	Sistema modular con Snap Points para ensamble dinámico.	Codificación cromática de fluidos según norma ASME/ANSI.
Interfaz (UI)	Canvas de Datos Energéticos	Paneles translúcidos con actualización de datos vía C#.	Despliegue de temperaturas de entrada/salida y carga térmica (Q).

La biblioteca se diseñó bajo un concepto de Modularidad Reactiva. A diferencia de los modelos CAD industriales convencionales, estos activos permiten una interacción bidireccional entre el usuario y la simulación, en el Apéndice A se presenta interfaz de diseño de modelado 3D del intercambiador en mención. Uno de los mayores aportes de estos modelos es la capacidad de "rayos X". Mediante un control de transparencia en la interfaz, el usuario puede desvanecer la coraza del intercambiador para visualizar los haces de tubos internos (ver Apéndice B). Sobre estos tubos se proyectan partículas vectoriales que representan el flujo del fluido, facilitando la comprensión del intercambio de calor en contracorriente o flujo cruzado, lo cual es vital para validar el diseño de la HEN frente a las predicciones del análisis Pinch.

Para asegurar que esta biblioteca funcione sin latencia en dispositivos móviles, se aplicó una técnica de Texture Baking (quemado de texturas), que permite tener sombras y reflejos realistas de acero inoxidable sin consumir recursos de procesamiento gráfico en tiempo real. Esto garantiza que, al mover el dispositivo alrededor del marcador, los activos se mantengan estables y con un alto nivel de detalle visual (en el cual se definió un color rojo para distinguir el flujo caliente del flujo frío), cumpliendo así con los estándares de una herramienta de grado profesional.

4.1.1 Selección y Modelado Paramétrico de Equipos

Se seleccionaron los equipos más representativos de los procesos de transferencia de calor industrial, que son los intercambiadores de tubo y coraza (Shell & Tube), enfriadores y calentadores. El modelado se realizó bajo un enfoque paramétrico, asegurando que las proporciones espaciales correspondieran a estándares industriales (como los de la TEMA - Tubular Exchanger Manufacturers Association), lo que permite al usuario una asociación inmediata con un entorno real (Apéndice C y D).

4.1.1.1 Jerarquía de Objetos y Puntos de Anclaje

Para garantizar una manipulación coherente y una respuesta dinámica de los activos digitales dentro del motor de desarrollo Unity, se implementó una arquitectura de nodos jerárquicos. Bajo este esquema, cada modelo de equipo térmico no se comporta como un bloque sólido único, sino como un conjunto organizado de sub-componentes vinculados mediante relaciones de parentesco transformacional (Parent-Child hierarchy o jerarquía de "objetos padre e hijos").

En esta estructura, el objeto raíz o "padre" (el chasis o coraza del intercambiador) actúa como el contenedor de las coordenadas globales. Los componentes críticos como cabezales, boquillas de entrada/salida y haces de tubos internos se configuran como "objetos hijos", lo que asegura que cualquier transformación de posición, escala o rotación aplicada al equipo principal se transmita de forma íntegra y proporcional a sus partes dependientes. Esta jerarquización es técnicamente fundamental por tres razones específicas en el contexto de la Realidad Aumentada:

1. *Estabilidad Espacial y Tracking*: Al estar anclados a un nodo raíz, los sub-componentes mantienen su posición relativa sin riesgo de desfase visual (*jittering*) cuando el sistema de Vuforia realiza el seguimiento del marcador físico en un entorno tridimensional.
2. *Definición de Pivotes de Interacción*: Se establecieron puntos de anclaje (*pivots*) precisos en las bridas y conexiones. Esto permite que el algoritmo de RA reconozca las coordenadas exactas donde deben nacer los vectores de flujo y las etiquetas de datos térmicos, garantizando que la información visual coincida con la geometría real de la planta.
3. *Modularidad de Materiales*: La estructura jerárquica permite aplicar *scripts* de transparencia o cambios de color (rojo/azul) a sub-objetos específicos sin afectar la integridad visual de los

elementos internos (como los tubos), facilitando la visualización de "rayos X" indispensable para el análisis técnico de la red.

4.1.2. Optimización de Mallas y Texturizado (Baking)

Para asegurar que la aplicación sea funcional en smartphones de gama media, se aplicaron técnicas de optimización de nivel profesional:

- *Retopología*: Se redujo el número de polígonos en áreas no críticas (superficies planas) manteniendo la curvatura en bridas y cabezales mediante normal mapping.
- *UV Unwrapping y Texturizado*: Se utilizaron mapas de texturas PBR (Physically Based Rendering) para simular acero al carbono y acero inoxidable, lo que proporciona un realismo que mejora la inmersión del usuario sin aumentar el peso del archivo (ver figura 5).
- *Compatibilidad con Motores de RA*: Los modelos fueron exportados en formato .FBX, conservando la escala 1:1, lo que permite que al ser visualizados a través de Vuforia, mantengan una coherencia espacial respecto a los marcadores físicos (Image Targets) (Apéndice E).

4.1.3. Resultados del Diseño de Activos

Como resultado final de esta fase de modelado y optimización geométrica, se consolidó un repositorio robusto de activos digitales (*assets*) optimizados para su implementación en tiempo real. Es fundamental precisar que la arquitectura de la aplicación se basa en la independencia de componentes, mientras que los equipos físicos se integran como modelos 3D con propiedades espaciales, las representaciones termodinámicas se generan de manera procedimental.

Nota sobre la Integración en Unity: Es imperativo destacar que, dentro de la arquitectura de la interfaz en Unity, solo los modelos tridimensionales de los intercambiadores de calor se incorporan como activos físicos fijos en la escena de Realidad Aumentada. Las *curvas compuestas* y el *punto de Pinch* no forman parte del modelado 3D estático; estos se desarrollan como un módulo de visualización independiente y dinámico que se superpone a la infraestructura física. Este desacoplamiento permite que las curvas reaccionen de forma autónoma a los cálculos algorítmicos y a la manipulación del ΔT_{min} , constituyendo así la base lógica para la siguiente etapa de desarrollo del sistema.

4.2. Visualización interactiva de curvas compuestas mediante la implementación de la lógica algorítmica

Tras la consolidación de los activos tridimensionales, la segunda fase de resultados se centró en la programación de la inteligencia de la aplicación. Este proceso consistió en ejecutar la transformación de los datos estáticos de corrientes térmicas en representaciones dinámicas dentro del motor de desarrollo Unity, integrando la tecnología de seguimiento de Vuforia para el anclaje de la información en el espacio físico (Ver detalle en tabla 2).

Tabla 2. Matriz de Programación y Funcionalidad del Módulo de RA.

Componente del Sistema	Lógica / Algoritmo (C#)	Representación Visual en RA	Interactividad y Dinamismo
Motor de Cálculo Pinch	Implementación del Algoritmo de la Tabla del Problema para balances de entalpía (H).	Generación de coordenadas relativas en el espacio 3D.	Recálculo instantáneo al detectar cambios en los datos de entrada de las corrientes.
Renderizado de Curvas Compuestas	Uso de Line Renderers con interpolación de puntos según segmentos de temperatura.	Curvas roja (caliente) y azul (fría) proyectadas en el plano vertical del marcador.	Desplazamiento lateral de la curva fría en el eje de entalpía al variar el ΔT_{min} .
Identificador de Pinch	Script de detección de colisión matemática o	Marcador visual destacado (esfera o	Actualización de la posición del punto de

	aproximación mínima entre vectores.	línea de unión) en el punto de contacto crítico.	Pinch según la sensibilidad de la red.
Control de Sensibilidad (UI)	Vinculación de Sliders de Unity con la variable global ΔT_{min} .	Barras de control superpuestas (HUD) en la pantalla del dispositivo móvil.	Modificación en tiempo real de la distancia entre curvas y actualización de áreas de transferencia.
Módulo de Utilidades	Cálculo de excedentes de energía en los extremos de las curvas (Qh_{min} y Qc_{min}).	Etiquetas flotantes dinámicas sobre los equipos de calentamiento y enfriamiento.	Variación numérica de los requerimientos de servicios externos según el valor de ΔT_{min} .
Sistema de Tracking	Integración de base de datos de Vuforia (Device Tracking).	Anclaje de las curvas compuestas sobre el esquema de planta físico.	Estabilidad visual que permite al usuario girar alrededor del gráfico sin perder la escala.

4.2.1. Identificación y Visualización del Punto de Pinch en RA

Una vez generadas las curvas, el sistema calcula matemáticamente el punto de máxima aproximación térmica. La implementación técnica de este hito se basó en la resolución del balance energético global para identificar el valor de entalpía donde la diferencia entre la curva caliente y la fría iguala exactamente al DTmin definido por el usuario. En el entorno de realidad aumentada, el punto de Pinch no se presenta como una simple coordenada, sino como un elemento visual destacado (un marcador esférico o una línea de colisión) que actúa como pivote de la red. Esta visualización permite al usuario comprender espacialmente por qué el diseño de la red de intercambiadores (HEN) debe dividirse estrictamente en dos regiones termodinámicas independientes: por encima y por debajo del Pinch (Apéndice F)

4.2.3. Desarrollo del Sistema de Interactividad y Sensibilidad (DTmin)

El mayor aporte técnico de este módulo es la capacidad de manipulación dinámica. Se diseñó una Interfaz de Usuario (UI) sobre el plano de RA que incorpora controles deslizantes (*sliders*) vinculados a las variables de diseño.

- **Manipulación del ΔT_{min}** : Al desplazar el control, el algoritmo recalcula instantáneamente la posición relativa de la curva fría respecto a la caliente. El usuario puede observar cómo un incremento en el ΔT_{min} aumenta la separación entre las curvas, lo que visualmente se traduce en una mayor necesidad de servicios externos (utilidades de calentamiento y enfriamiento) y una reducción del área de transferencia necesaria.
- **Retroalimentación en Tiempo Real:** Se implementaron "canvas" dinámicos que muestran valores numéricos actualizados de las cargas térmicas mínimas ($Q_h \min$ y $Q_c \min$). Esta vinculación entre el gesto táctil del usuario y la respuesta gráfica de las curvas facilita una comprensión intuitiva del *trade-off* económico entre el costo de capital y el costo operativo.

4.2.2. Entregable: Módulo Funcional

Como resultado final de este objetivo, se obtuvo un Módulo de Visualización Interactiva totalmente funcional. Este componente es capaz de recibir un conjunto de datos térmicos, procesarlos y proyectar una escena de RA donde las curvas compuestas y el punto de Pinch reaccionan físicamente a los cambios de parámetros, cumpliendo con los estándares de fluidez y precisión requeridos para el análisis de ingeniería.

4.3. Arquitectura de la interfaz de usuario (UI) y sistema de exploración interactiva en tiempo real

El tercer hito de este proyecto culminó con la integración del entorno visual y el motor de cálculo en una interfaz de usuario (UI) cohesiva. Este módulo constituyó el puente operativo que permite al usuario manipular variables complejas mediante gestos intuitivos en un dispositivo móvil, transformando la aplicación de una herramienta de visualización a una plataforma de análisis dinámico. El desarrollo hasta aquí planteado se materializó en la creación de dos

interfaces de usuario especializadas y operativamente independientes, desarrolladas bajo los motores Unity y Vuforia (ver Apéndice G).

Este enfoque segmentado permitió abordar, de manera separada, la inspección técnica detallada de los activos de transferencia y el análisis dinámico de la integración energética, optimizando el rendimiento computacional en dispositivos móviles y evitando la superposición de datos que pudiera comprometer la interpretación técnica. En el módulo destinado exclusivamente a la exploración de los modelos tridimensionales, se implementó una interfaz táctil que facilitó la manipulación espacial del intercambiador de calor de forma aislada. Mediante el uso de transformadas de rotación y escala, el sistema permitió inspeccionar la geometría del equipo, aprovechando la funcionalidad de transparencia programada para validar la disposición de los haces de tubos frente a la coraza en un entorno de visualización puro. Esta interfaz se centró en la fidelidad del activo y en la capacidad de despliegue de fichas técnicas vinculadas, operando como un visor de ingeniería inmersivo que no integró elementos gráficos del análisis Pinch, garantizando así una exploración enfocada exclusivamente en la infraestructura física.

Por otro lado, y de forma independiente al visualizador de equipos, se desarrolló la interfaz para la representación de las curvas compuestas, donde el diseño se orientó hacia la analítica de datos termodinámicos. En esta aplicación, se integró un panel de control con controles deslizantes de alta precisión que permitieron la modificación del parámetro ΔT_{min} de forma autónoma. El resultado fue una herramienta de sensibilidad térmica donde se observó el desplazamiento cinemático de la curva fría y la consecuente reubicación del punto de Pinch en el espacio virtual. Esta interfaz priorizó la claridad del diagrama temperatura-entalpía y el

despliegue de métricas numéricas sobre cargas térmicas de servicios, proporcionando un entorno de cálculo visual que permitió al ingeniero concentrarse en la optimización energética sin la presencia de los modelos 3D de los equipos.

Ambas interfaces compartieron una robustez técnica fundamentada en el seguimiento estable de marcadores, lo que garantizó que tanto el intercambiador en su módulo como las curvas en el suyo mantuvieran su integridad espacial durante la exploración del usuario. La respuesta de los mandos fue inmediata, asegurando que la latencia no afectara la percepción de los cambios térmicos o geométricos. De este modo, la entrega de estos dos entornos funcionales segregados cumplió con la exigencia de proporcionar una experiencia de usuario intuitiva y profesional, separando la realidad física de los equipos de la abstracción gráfica de la integración energética, tal como se requería para mantener la especificidad técnica en cada fase del análisis.

La arquitectura de software se completó mediante la integración de un sistema de gestión de estados que permitió la transición lógica entre ambos entornos operativo. Se implementó una lógica de navegación bidireccional que aseguró que el usuario pudiera alternar entre la inspección física del intercambiador y el análisis de integración térmica sin pérdida de datos en la memoria caché del dispositivo. En el módulo de modelos tridimensionales, se incorporó un sistema de retroalimentación visual mediante el uso de *shaders* de resaltado que reaccionaron al contacto táctil, permitiendo identificar componentes específicos del equipo bajo condiciones de iluminación variable, lo cual validó la robustez de la interfaz en entornos de planta reales.

Paralelamente, en la interfaz de análisis Pinch, se integraron algoritmos de suavizado de movimiento (*lerping*) en los componentes de la interfaz de usuario para garantizar que el desplazamiento de las curvas fuera orgánico y exento de saltos gráficos bruscos ante cambios mínimos en el ΔT_{min} . Asimismo, se optimizó el escalado de los elementos del *canvas* para

asegurar la legibilidad de las etiquetas termodinámicas en diversas resoluciones de pantalla, logrando una herramienta cuya ergonomía digital facilitó la exploración técnica prolongada sin generar fatiga visual en el operador, consolidando así un entorno de trabajo digital que segregó con éxito la complejidad geométrica de la rigurosidad analítica.

4.4. Validación de la herramienta mediante caso de estudio y evaluación del impacto didáctico en la formación de ingenieros

A continuación, se relacionan los resultados de la encuesta realizada a un grupo de treinta estudiantes, repartidos en dos grupos de quince. El primer grupo, denominado G1, estuvo compuesto por estudiantes que trabajaron métodos tradicionales en 2D. El segundo grupo, el 2G, estaba compuesto por los estudiantes que usaron 3D a partir de realidad aumentada (RA).

4.4.1 Demografía y relación inicial con la RA

La muestra estuvo compuesta por 30 estudiantes, los cuáles fueron repartidos en dos grupos de 15 participantes cada uno. El grupo G1 trabajó con métodos tradicionales de hojas de cálculo y diagramas 2D, mientras que el grupo G2 utilizó modelos 3D interactivos mediante realidad aumentada (ver Apéndice H). En cuanto al tiempo que los estudiantes emplearon para resolver los ejercicios, es posible notar que el G1, el cual utilizó métodos tradicionales, tuvo grandes variaciones en cuanto al tiempo que demoraron los estudiantes en desarrollar las actividades, las cuales iban de 5 a 120 minutos, con un promedio de 84 minutos, como se puede observar en el Apéndice I

Dicha dispersión muestra que hay dificultad de interpretar diagramas bidimensionales y de procesar información abstracta sin que haya un apoyo visual interactivo. Esto genera una carga cognitiva mayor y podría ser una de las causas del retraso en la resolución de los ejercicios. En contraste, el grupo experimental G2, el cual utilizó realidad aumentada, mostró tiempos

mucho más cortos y homogéneos que promediaron los 21,07 minutos. Por tanto, la visualización de modelos 3D permitió que los estudiantes identificaran componentes comprendiendo la relación entre áreas de transferencia y número de tubos y a la vez que pudiesen trabajar de forma eficiente. Aquí se revelaría que los estudiantes que utilizan RA no solamente agilizan su aprendizaje, sino que al mismo tiempo logran aumentar la precisión y la seguridad que presentan a la hora de resolver problemas.

De los estudiantes que participaron en la prueba, la mayoría no contaba con experiencia en el uso previo de herramientas de realidad aumentada. De los 30 participantes, finalmente solo seis indicaron que sí tenían experiencia, mientras los otros 24 no habían utilizado este tipo de tecnologías. Por tanto, esto mostraría que, de la población participante, la mayoría es novata en el uso de realidad aumentada. Lo que permitiría que se analicen resultados posteriores considerando que es la primera vez que utilizan este tipo de herramientas (ver Apéndice J).

4.4.2 Resultados de la percepción de evaluación técnica

En cuanto a la visualización espacial y percepción de los modelos. Dentro del grupo 1, los resultados son un poco más dispersos. Mientras seis estudiantes mostraron estar de acuerdo la mayoría, hubo un grupo de cinco estudiantes neutrales, mostrando que algunos estudiantes tienen dificultades para comprender espacialmente modelos con métodos tradicionales. Por el lado del G2, hay una tendencia más clara a opciones altas. Por ejemplo, ocho estudiantes eligieron de acuerdo y tres neutral, lo que indicaría que la mayoría percibió los modelos 3D como efectivos en cuanto a la comprensión espacial. En ese sentido, esta comparación muestra que la interacción con modelos tridimensionales sí mejora la percepción y comprensión de la disposición espacial de los componentes. La realidad aumentada no solamente facilitaría la visualización, sino que

puede homogenizar la comprensión entre los estudiantes, logrando reducir la dispersión que se puede observar con métodos tradicionales (ver Apéndice K).

En cuanto a la percepción que presentan los estudiantes respecto a la claridad al identificar los componentes internos de los sistemas de intercambio de calor, incluyendo bases de tubos, deflectores, baffles y coraza, los estudiantes del G1 presentaron resultados dispersos en cuanto a este punto. Cuatro estudiantes estaban en desacuerdo, uno en muy desacuerdo, cuatro en neutral, cuatro muy de acuerdo. Esta alta variabilidad muestra que, al momento de utilizar métodos tradicionales como los diagramas 2D y las hojas de cálculo, los estudiantes presentan dificultades para comprender la estructura interna de los equipos, y eso lleva a que la interpretación espacial no resulte homogénea. Por otro lado, el G2 mostró una tendencia más uniforme hacia opciones intermedias y altas. La mayoría eligió de acuerdo, seis estudiantes, y cinco neutrales, lo que indica que, al momento de usar realidad aumentada, sí mejora la claridad y se facilita la identificación de componentes internos de forma consistente y accesible (ver Apéndice L).

En cuanto a la capacidad de los estudiantes para percibir la transparencia del modelo, es decir, el cómo los elementos internos se visualizan dentro de un conjunto, el G1, de nuevo, mostró una alta dispersión, puesto que dos estudiantes indicaron muy en desacuerdo, dos en desacuerdo, cinco neutral y seis en de acuerdo. Se resalta el hecho de que ningún estudiante seleccionó muy de acuerdo, por tanto, los métodos tradicionales dificultan la visualización de la estructura interna, lo que genera confusiones a la hora de realizar ejercicios de percepción espacial. (ver Apéndice M).

Por otro lado, el G2, de nuevo, mostró una tendencia mayor a opciones positivas. ocho estudiantes marcaron neutral, tres de acuerdo y uno en muy de acuerdo. En contraste con el G1,

ninguno del segundo grupo optó por el muy en desacuerdo, por tanto, la realidad aumentada permitiría mejorar la percepción de la transparencia del modelo y facilitaría que los estudiantes comprendan cómo se relacionan los componentes internos con los externos, lo que podría mejorar la capacidad de integrar visualmente información de forma más eficiente y homogénea.

En cuanto a la facilidad para rotar y seccionar los modelos, persiste la tendencia del G1 a opciones muy dispersas y el G2 a alternativas más positivas. Se repite en el grupo 1 el que nadie haya elegido la opción muy de acuerdo. En este sentido, la dispersión del G1 reflejaría que los métodos tradicionales dificultan la manipulación y comprensión que los estudiantes presentan en cuanto a la orientación espacial de los componentes internos. Por el contrario, en el G2, la mayoría seleccionó las opciones positivas, seis eligieron neutral, cinco en desacuerdo y solo uno en muy de acuerdo. Esta menor dispersión reflejaría o indicaría que la interacción con modelos 3D permite explorar, rotar y seccionar el equipo de forma más intuitiva y eficiente, también que la realidad aumentada disminuiría la carga cognitiva, lo que favorecería la comprensión espacial y permitiría una experiencia más homogénea y eficaz en la manipulación de los modelos (ver Apéndice N).

4.4.3 Validación del conocimiento posterior al uso

Los estudiantes percibieron que es una ventaja el usar modelos 3D interactivos. En los dos grupos se evidencia una gran mayoría por el sí en ambos grupos. Este patrón reflejaría que la interacción con modelos tridimensionales permitiría que se identifique con mayor claridad componentes y relaciones internas que hay en los sistemas de intercambio de calor y permitiría que se dé una percepción más intuitiva y rápida. Al mismo tiempo, la distribución más homogénea en el G2 podría llegar a indicar que se reduce la variabilidad individual en cuanto a la comprensión, lo que puede llevar a un aprendizaje un poco más uniforme entre los

participantes. También mostraría a nivel pedagógico que los modelos 3D podrían complementar los métodos tradicionales, lo que llevaría a mejorar la calidad conceptual y a reducir barreras asociadas a la interpretación bidimensional (ver Apéndice O).

En cuanto a la experiencia de aprendizaje, se podría confirmar que la realidad aumentada sí potencia la eficacia en cuanto a la adquisición de conocimientos. En G1 y G2 la mayoría de los estudiantes estuvo de acuerdo con que el uso de modelos 3D efectivamente veniera experiencias de aprendizaje que resultan más efectivas, lo que mostraría una percepción positiva del grupo en cuanto al aprendizaje con modelos 3D. El poder manipular componentes, observar la relación que hay entre las variables en un espacio tridimensional facilitaría la comprensión y reduciría los errores de interpretación. Además, la tecnología 3D permite que los estudiantes construyan representaciones mentales que sean mentales precisas de los sistemas, lo que promovería la integración de la información tanto teórica como práctica. En este sentido, la RA no solamente aceleraría la resolución de problemas, sino que al mismo tiempo podría mejorar la confianza y seguridad de los estudiantes a la hora de enfrentar este tipo de situaciones (ver Apéndice P).

4.4.4. Percepciones de los estudiantes sobre el uso de modelos 3D

En la encuesta, se incluyó una pregunta abierta en la que se buscó que los estudiantes expresaran sus percepciones con respecto a la efectividad del aprendizaje a partir de modelos 3D interactivos y en comparación con los métodos tradicionales. Los resultados mostraron percepciones muy positivas hacia este tipo de herramientas. Varios estudiantes destacaron que la inspección 3D hace de la experiencia de aprendizaje algo mucho más llamativo y comprensible, dado que facilita visualizar las dimensiones y las estructuras del equipo, y permiten identificar componentes y relaciones especiales que, bajo un modelo de diagrama 2D, resultarían complejas de entender. Otros señalaron que la representación tridimensional ayuda al entendimiento de la

transferencia de calor, las entradas y salidas del intercambiador y los efectos de variables que resulten críticas, lo que ofrecería una percepción mucho más intuitiva del sistema.

A pesar de estas posiciones, algunos participantes sí mostraron dificultades a la hora de usar la herramienta, mencionando que podría ser compleja y confusa, en especial si no se cuenta con un conocimiento previo o una guía adecuada. También se destacó que es necesario familiarizarse con este tipo de aplicaciones para aprovechar al máximo los beneficios que puede llegar a ofrecer. En general, dichas respuestas indicaron que los modelos 3D interactivos no solamente permiten que se acelera la comprensión, sino que aumentan la confianza, la seguridad y la precisión en los estudiantes a la hora de resolver ejercicios prácticos, y que consolidar este tipo de tecnologías permite tener un complemento valioso frente a métodos tradicionales.

5. Conclusiones

El desarrollar una aplicación móvil que se encuentre basada en el uso de realidad aumentada para poder generar visualización tridimensional e interactiva de curvas compuestas, el punto de pinch y los flujos de calor en redes de intercambio de calor, resulta importante para la enseñanza de la Ingeniería Química. Esta herramienta posibilita que se integren elementos virtuales sobre entornos físicos y a su vez, facilita la comprensión de fenómenos complejos que suelen presentar altos niveles de abstracción bajo el uso de métodos tradicionales. Implementar modelos tridimensionales optimizados con jerarquía de objetos, objetos y puntos de anclaje garantizaría una manipulación coherente, estable y precisa de los componentes del sistema y mejoraría la percepción espacial, la comprensión de la relación entre las corrientes y la distribución de energía térmica en la planta.

Los resultados obtenidos de las encuestas aplicadas a dos grupos de estudiantes evidenciaron mejoras en la comprensión y la experiencia de aprendizaje. Aquellos estudiantes que utilizaron realidad aumentada reportaron mayor claridad en la identificación de componentes internos, en la percepción de proporciones mecánicas, la disección de equipos y en la comprensión más efectiva a la hora de relacionar entre áreas de transferencia y número de tubos. De igual forma, las respuestas de los participantes en las dinámicas del presente estudio mostraron que los modelos 3D facilitan el que los estudiantes pueden entender de forma más realista dimensiones y estructuras, facilitando así la integración de conceptos abstractos y la interpretación de curvas compuestas, lo que es una gran ventaja sobre métodos bidimensionales y tradicionales.

El que los tiempos de resolución de los ejercicios hayan sido mucho más cortos con el uso de realidad aumentada muestra que no solamente se reduce la carga cognitiva, sino que

también se facilita un aprendizaje más eficiente que brinde una retroalimentación visual inmediata y que posibilite la exploración dinámica de los parámetros operativos. Al interactuar con modelos tridimensionales se facilita la comprensión de relaciones espaciales, la identificación de elementos clave y la evaluación de la sensibilidad de los diseños frente a variaciones, lo que aumenta la precisión y la seguridad a la hora de resolver problemas complejos.

Dentro de los hallazgos obtenidos en esta investigación, se encontró que los estudiantes manifestaron que el uso de esta herramienta hace que sea más intuitiva la interpretación de la interacción entre corrientes calientes y frías, la ubicación del punto de pinch y la comprensión de los efectos de variaciones térmicas sobre la eficiencia del sistema. Si bien algunos estudiantes reportaron dificultades a la hora de manejar la aplicación, sí admiten que su correcto uso facilitaría la comprensión de múltiples variables dentro del modelo. Dentro de los resultados también se obtuvo que la realidad aumentada funciona como un complemento pedagógico bastante eficaz para la enseñanza de análisis de pinch y redes de intercambio de calor, lo que facilita la integración de teoría y práctica.

Si bien no se propone el reemplazo de diagramas 2D, dado que estos siguen siendo valiosos para el análisis sistemático y detallado, la realidad aumentada acerca al estudiante a una experiencia práctica y a una interpretación de fenómenos, lo que fortalece la capacidad de resolución de problemas y la toma de decisiones de carácter termo-económico. Al combinar visualización 3D, interactividad en tiempo real, codificación de flujos a través de colores y transparencia, se contribuye a que el aprendizaje sea más activo, motivador y que se encuentre alineado con los estándares de la ingeniería moderna, lo que permite preparar a los estudiantes y enfrentarlos a escenarios industriales reales y competentes.

Por último, se muestra que, al integrar realidad aumentada a la enseñanza de procesos térmicos complejos, se obtienen como ventajas la reducción de la abstracción, la mejora de la comprensión espacial, la aceleración para adquirir conocimientos y el aumento de la confiabilidad de los análisis. Este enfoque puede ser replicado en otras áreas de la ingeniería, y en este sentido, el presente estudio es una base para futuras investigaciones que integren RA con datos de operación en tiempo real, optimización de HEN dinámicos y simulación termo-económica,

6. Recomendaciones

Dentro de las recomendaciones que nacen a partir de las reflexiones hechas en el presente estudio, se destacaría en primer lugar el que es fundamental garantizar que las aplicaciones a usarse sean intuitivas y fáciles de manejar, de forma que los estudiantes puedan enfocarse en la comprensión de los conceptos y en la interacción con los modelos, y que así no haya un desgaste y pérdida de tiempo en el entendimiento de la interfaz. También se recomienda la inclusión de tutoriales, guías o sesiones iniciales que permitan familiarizarse con el modelo.

De igual forma, la implementación de modelos tradicionales debe tener en cuenta la claridad visual y la capacidad de interacción. Elementos como la rotación, transparencia, colores, diferenciadores y segmentación de componentes facilitan el que los estudiantes puedan comprender relaciones espaciales y funcionales de forma más eficiente. Se sugiere que estos desarrollos incluyan feedback inmediato, buscando corregir errores y reforzar el aprendizaje. Para futuros proyectos, se aconsejaría evaluar el impacto de estas herramientas a través de encuestas, análisis de tiempos de resolución y observaciones directas. Identificando fortalezas y áreas de mejora, también sería recomendable combinar la realidad aumentada con métodos tradicionales, como diagramas o simulaciones, para que así se aproveche lo mejor de ambos enfoques y se posibilite el ofrecer un aprendizaje más completo.

Por último, se recomienda que se fomente la innovación y la creatividad en el diseño de este tipo de aplicaciones, para que se exploren distintos sectores o áreas del conocimiento y se promueva la adaptabilidad de herramientas a diferentes niveles de experiencia y estilos de aprendizaje. Este tipo de enfoques asegura que la realidad aumentada se utilice de forma efectiva, atractiva y a su vez útil en lo que respecta a la adquisición de conocimientos tanto prácticos como conceptuales.

Referencias Bibliográficas

- Cao, Y., Dong, Y., Wang, F., Yang, J., Cao, Y., & Li, X. (2021). Multi-sensor spatial augmented reality for visualizing the invisible thermal information of 3D objects. *Optics and Lasers in Engineering*, 145, 106634. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2021.106634>
- Carrillo, C., Obando Montaña, A. F., Cidrás, J., & Díaz-Dorado, E. (2013). Review of power curve modelling for wind turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 21, 572–581. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.01.012>
- Chang, H.-Y., Binali, T., Liang, J.-C., Chiou, G.-L., Cheng, K.-H., Lee, S. W.-Y., & Tsai, C.-C. (2022). Ten years of augmented reality in education: A meta-analysis of (quasi-) experimental studies to investigate the impact. *Computers & Education*, 191, 104641. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2022.104641>
- Chollet, M., & Scherer, S. (2017). Perception of Virtual Audiences. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 37(4), 50–59. <https://doi.org/10.1109/MCG.2017.3271465>
- Gadalla, M. A. (2015). A new graphical method for Pinch Analysis applications: Heat exchanger network retrofit and energy integration. *Energy*, 81, 159–174. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.12.011>
- Kemp, I. C. . (2011a). *Pinch Analysis and Process Integration : a User Guide on Process Integration for the Efficient Use of Energy*. Elsevier Science.
- Kemp, I. C. . (2011b). *Pinch Analysis and Process Integration : a User Guide on Process Integration for the Efficient Use of Energy*. Elsevier Science.

- Kumar, V. V., Carberry, D., Beenfeldt, C., Andersson, M. P., Mansouri, S. S., & Gallucci, F. (2021). Virtual reality in chemical and biochemical engineering education and training. *Education for Chemical Engineers*, 36, 143–153. <https://doi.org/10.1016/j.ece.2021.05.002>
- Lincoln, B. J., Kong, L., Pineda, A. M., & Walmsley, T. G. (2022). Process integration and electrification for efficient milk evaporation systems. *Energy*, 258, 124885. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124885>
- Linnhoff, B., & Hindmarsh, E. (1983). The Pinch design method for heat exchanger networks. *Chemical Engineering Science*, 38(5), 745–763. [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(83\)80185-7](https://doi.org/10.1016/0009-2509(83)80185-7)
- Mohammadi, M., Assaf, G., & Assaad, R. H. (2024). Real-time spatial-temporal mapping and visualization of thermal comfort and HVAC control by integrating immersive augmented reality technologies and IoT-enabled wireless sensor networks: Towards immersive human-building interactions. *Journal of Building Engineering*, 94, 109887. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.109887>
- Mutambara, D., & Bayaga, A. (2021). Determinants of mobile learning acceptance for STEM education in rural areas. *Computers & Education*, 160, 104010. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2020.104010>
- Rebello, C. M., Deiró, G. F., Knuutila, H. K., Moreira, L. C. de S., & Nogueira, I. B. R. (2024). Augmented reality for chemical engineering education. *Education for Chemical Engineers*, 47, 30–44. <https://doi.org/10.1016/j.ece.2024.04.001>

Strzys, M. P., Kapp, S., Thees, M., Kuhn, J., Lukowicz, P., Knierim, P., & Schmidt, A. (2017).

Augmenting the thermal flux experiment: A mixed reality approach with the HoloLens. *The Physics Teacher*, 55(6), 376–377. <https://doi.org/10.1119/1.4999739>

Tan, R. R., & Foo, D. C. Y. (2023). Pinch Analysis for sustainable energy planning. In *Handbook of Process Integration (PI)* (pp. 573–593). Elsevier.

<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823850-9.00011-6>

Terrapon-Pfaff, J., Gröne, M.-C., Dienst, C., & Ortiz, W. (2018). Impact pathways of small-scale energy projects in the global south – Findings from a systematic evaluation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 95, 84–94. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.06.045>

Walden, J. V. M., Wellig, B., & Stathopoulos, P. (2023). Heat pump integration in non-continuous industrial processes by Dynamic Pinch Analysis Targeting. *Applied Energy*, 352, 121933.

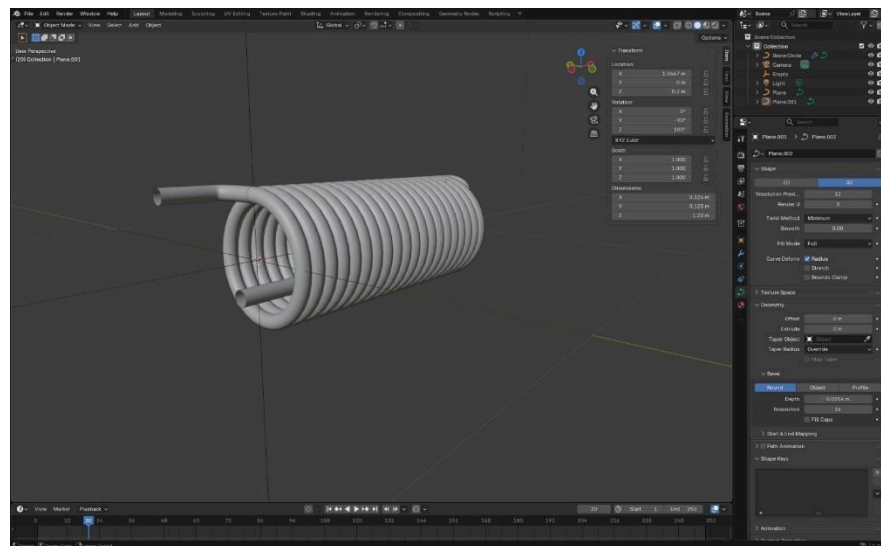
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121933>

Yang, M., Li, T., Feng, X., & Wang, Y. (2020). A simulation-based targeting method for heat pump placements in heat exchanger networks. *Energy*, 203, 117907.

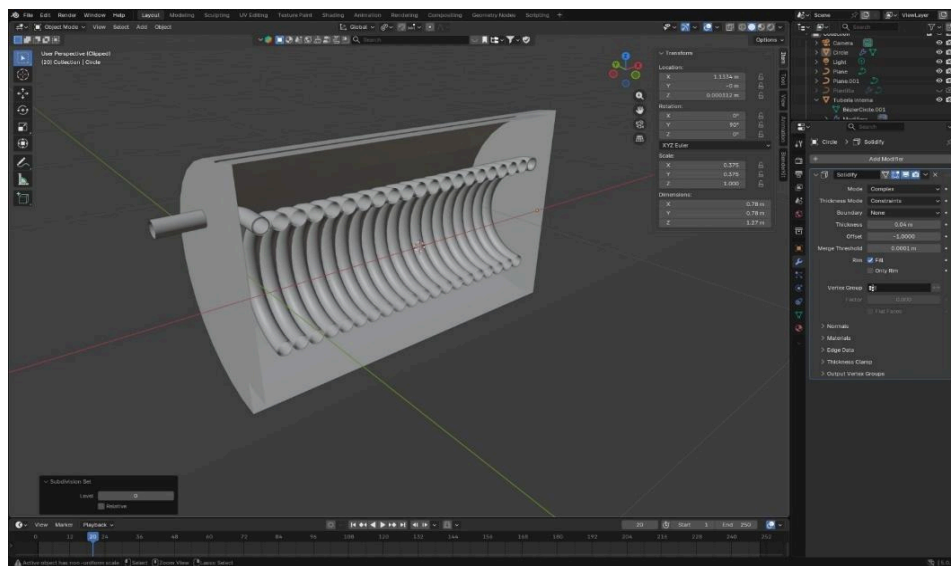
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117907>

Apéndices

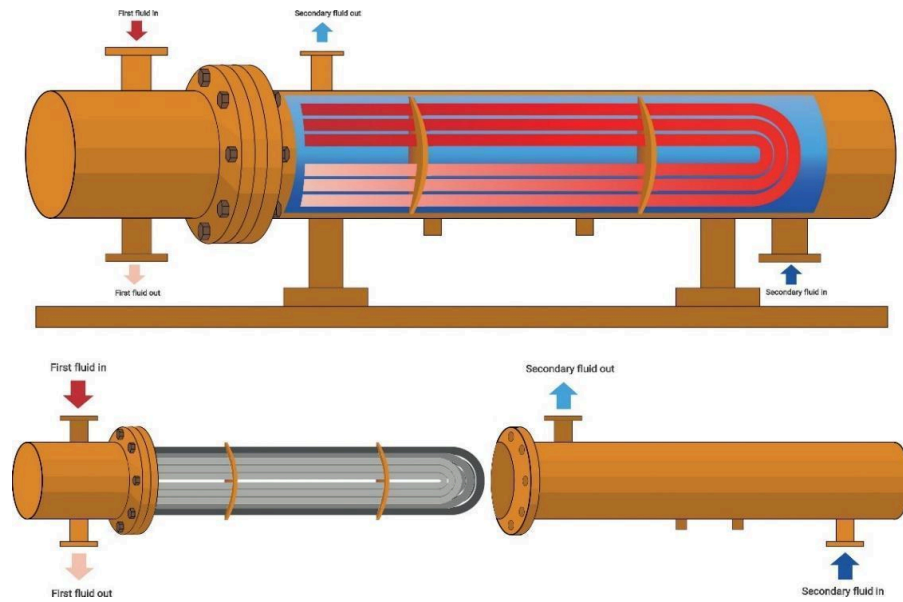
Apéndice A. Interfaz de modelado 3D del intercambiador de calor de tubo-coraza.



Apéndice B. Detalle interno de tubos del intercambiador de calor modelado.



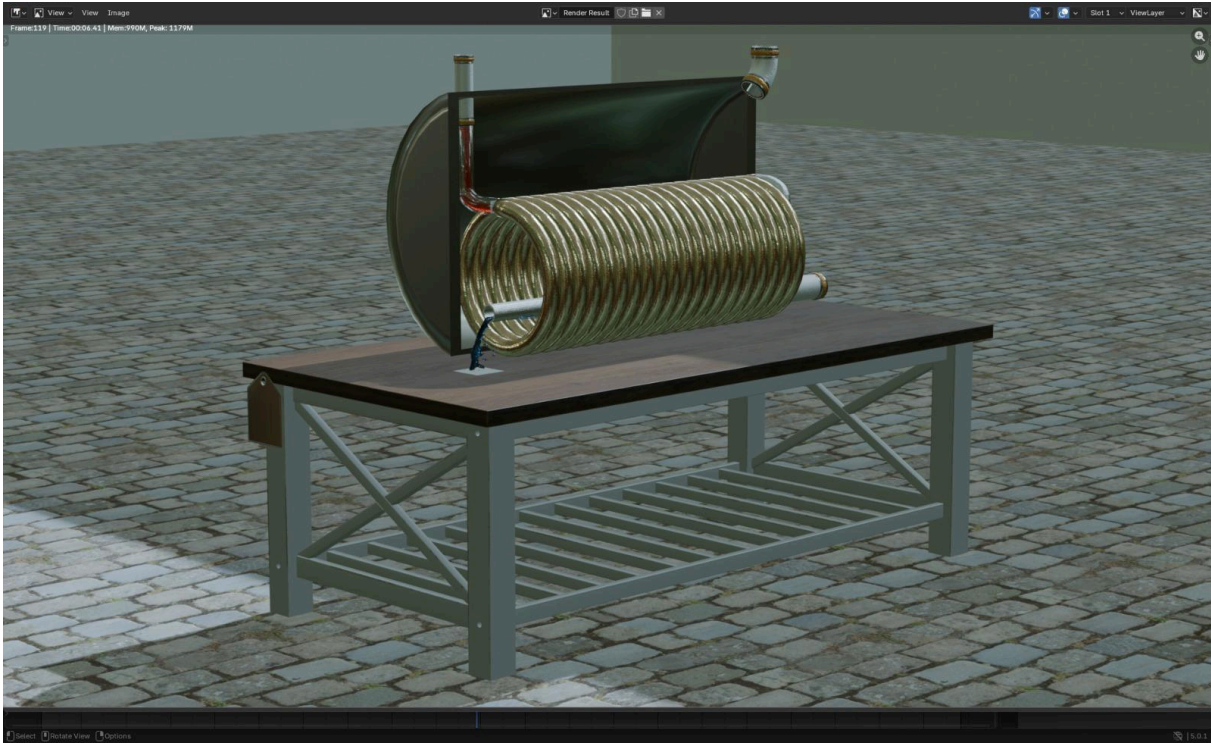
Apéndice C. Diseño esquemático 2D del intercambiador de calor de tubo y coraza.



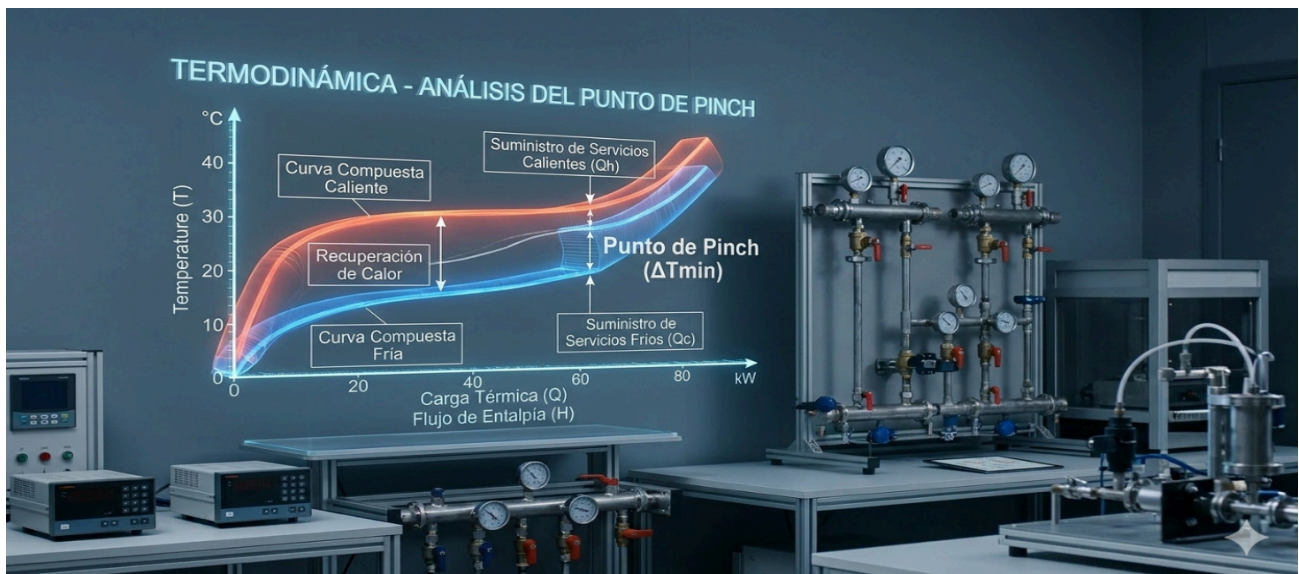
Apéndice D. Diseño esquemático 3D del intercambiador de calor de tubo y coraza.



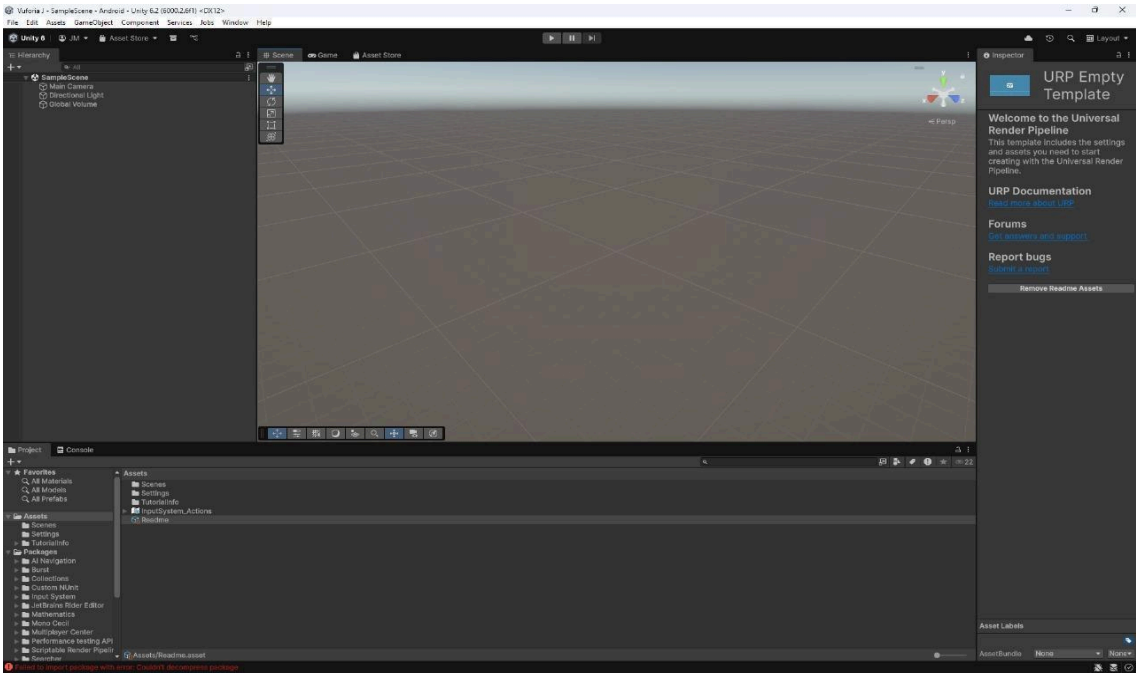
Apéndice E. Texturizado de superficies/elementos del modelo 3D del intercambiador de calor.



Apéndice F. Esquema de visualización de curvas compuestas.

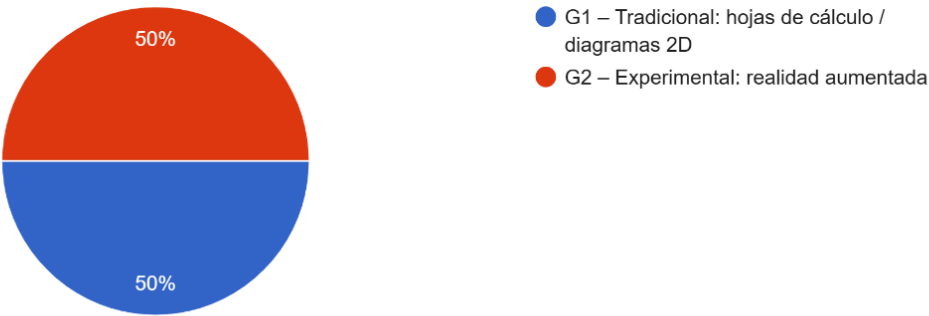


Apéndice G. Interfaz de usuario de Unity+Vuforia.



Apéndice H. Participantes en la encuesta

Grupo al que pertenece
 30 respuestas

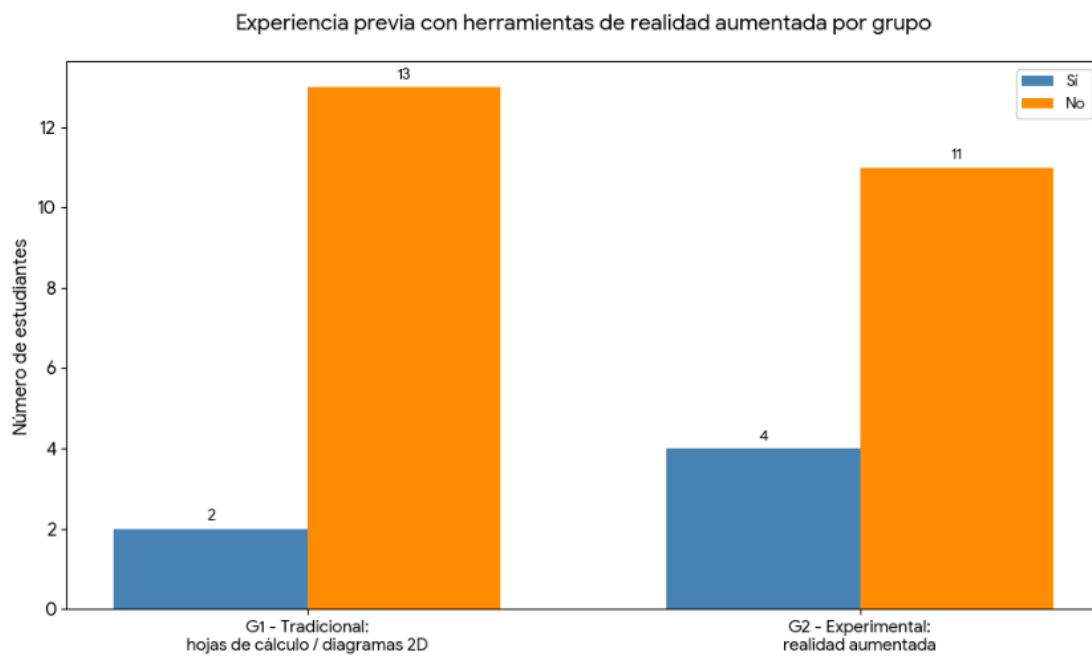


Apéndice I. Tiempo de resolución de ejercicios por parte de cada grupo

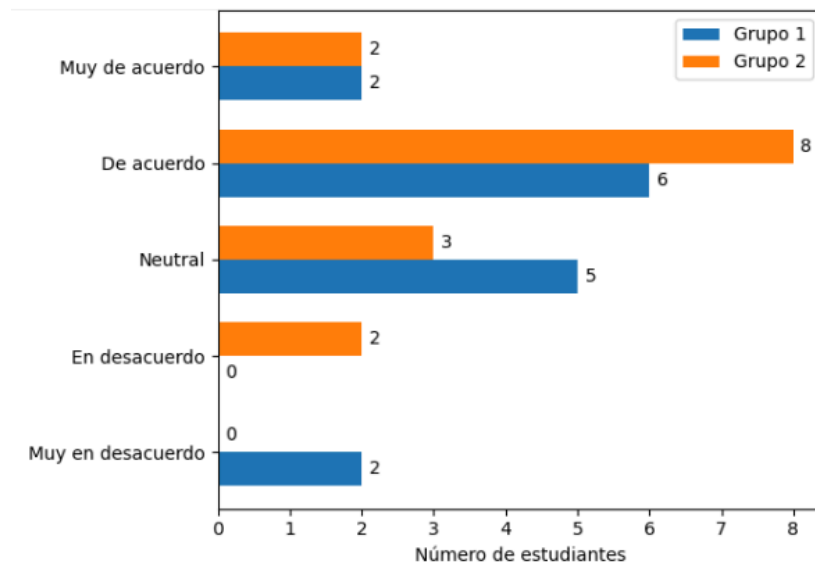
G1 – Tradicional: hojas de cálculo / diagramas 2D	G2 – Experimental: realidad aumentada
40	3
45	4

G1 - Tradicional: hojas de cálculo / diagramas 2D	G2 - Experimental: realidad aumentada
60	5
120	3
100	4
90	5
5	40
100	30
120	10
120	10
45	20
90	90
120	90
90	1
115	1
Promedio: 84 minutos	Promedio: 21.07 minutos

Apéndice J. Experiencia previa de los participantes en el manejo de RA

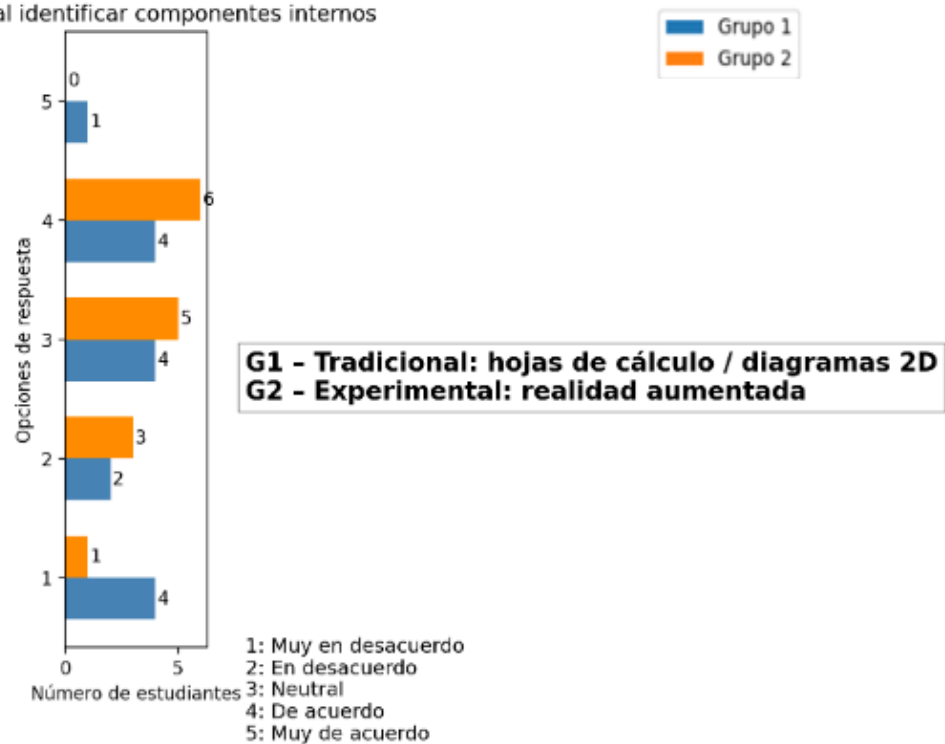


Apéndice K. Resultados en torno a la visualización espacial



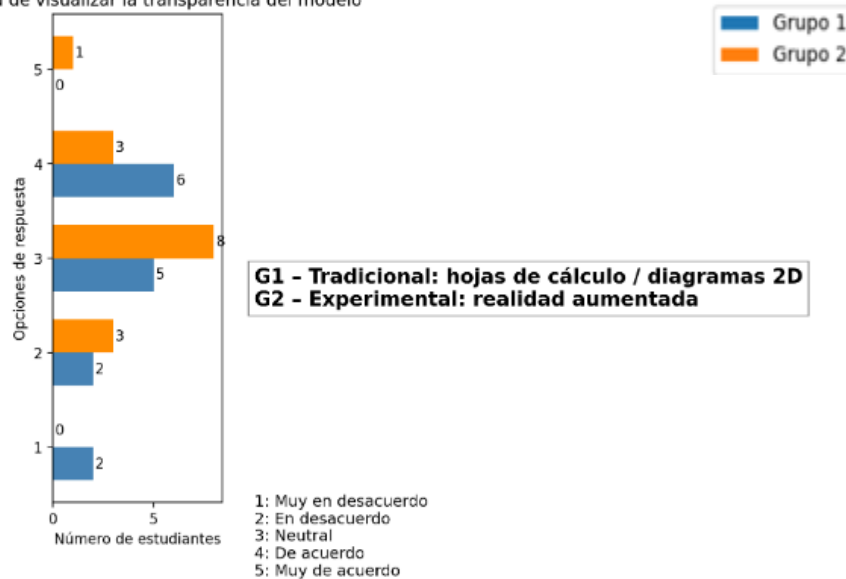
Apéndice L. Claridad al identificar componentes internos

Claridad al identificar componentes internos



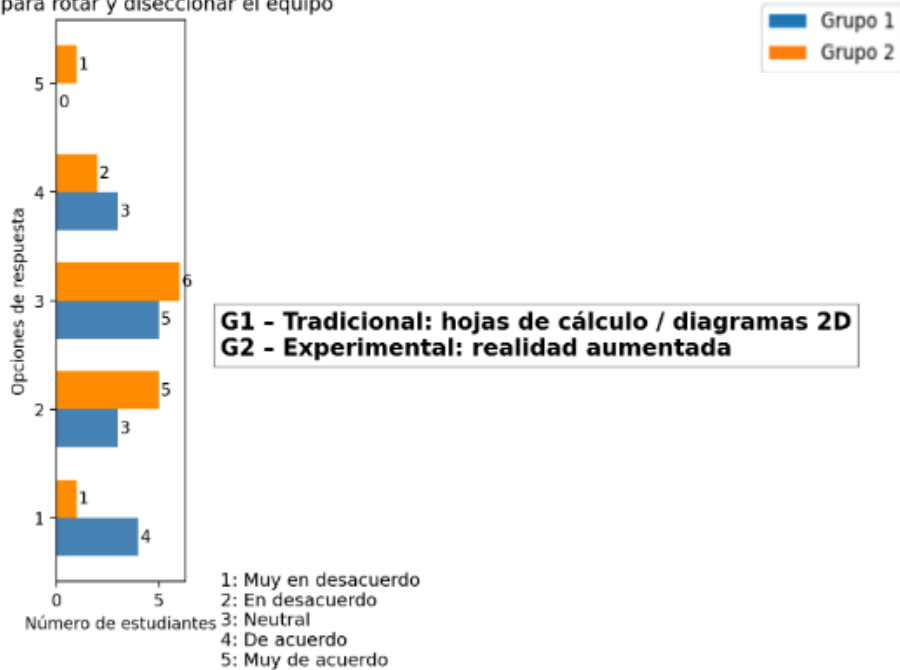
Apéndice M. Resultados sobre la capacidad de visualizar la transparencia del modelo

Capacidad de visualizar la transparencia del modelo



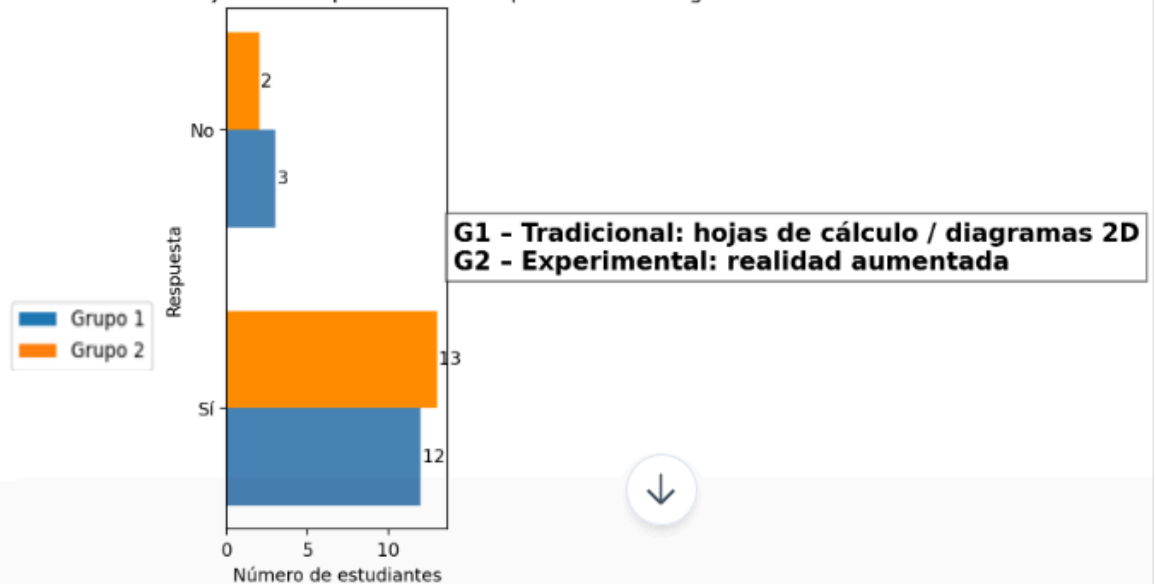
Apéndice N. Resultados sobre facilidad para rotar y diseccionar equipo

Facilidad para rotar y diseccionar el equipo



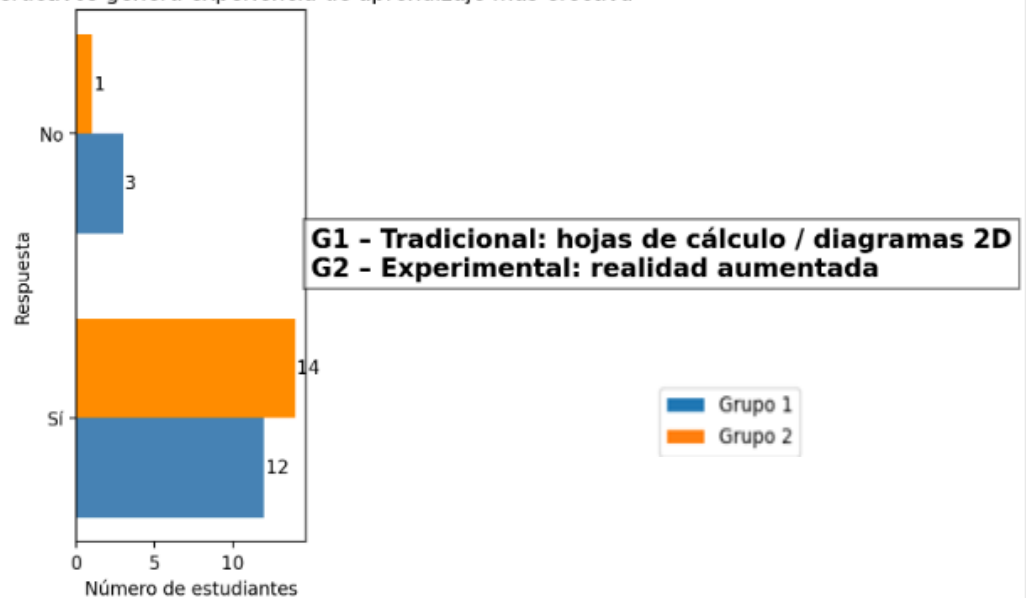
Apéndice O. Percepción en mejoras del 3D frente al 2D

¿La inspección 3D interactiva mejora la comprensión en comparación con diagramas 2D?



Apéndice P. Experiencias efectivas a partir del uso de modelos 3D

Uso de modelos 3D interactivos genera experiencia de aprendizaje más efectiva



Apéndice Q. Estado del arte

Avances recientes en integración energética y análisis Pinch

Los desarrollos recientes en integración energética han ampliado el alcance del análisis Pinch hacia contextos dinámicos y electrificados, donde la variabilidad temporal del proceso y la incorporación de bombas de calor cobran protagonismo. Walden, Wellig y Stathopoulos proponen un “Dynamic Pinch Analysis Targeting” para integrar bombas de calor en procesos no continuos usando datos anuales simulados de alta resolución, fijando metas termo-económicas factibles y mostrando que la rentabilidad óptima puede diferir del mínimo energético clásico. Este enfoque responde a una limitación persistente del Pinch estático, que es el diseño alrededor de uno o pocos puntos de operación ignora la variación horaria/estacional de cargas térmicas y precios energéticos (Walden et al., 2023).

En paralelo, la literatura reciente retoma la hibridación Pinch-electrificación para procesos térmicos: por ejemplo, Lincoln et al. (2022) demuestran en evaporación láctea que la combinación de recuperación de calor (GCC/curva compuesta de gran composición) con bombas de calor electrificadas reduce utilidades fósiles y trabajo neto, mientras que Yang et al. (2020) formulan un método de targeting por simulación para ubicar bombas de calor dentro de redes HEN respetando las reglas del Pinch y la factibilidad termodinámica. Estas contribuciones fortalecen la transición desde un Pinch exclusivamente “calor-calor” hacia marcos termo-económicos que contemplan trabajo eléctrico, perfil temporal y restricciones de operación reales.

Otra línea activa es el retrofit gráfico de redes existentes. Aunque las ideas seminales de retrofit gráfico tienen una década (p.ej., Gadalla, 2015), siguen inspirando variantes recientes aplicadas a casos industriales complejos (refinería, hidrogenación de residuo), donde se usan diagramas extendidos y reglas de diseño para eliminar cruces a través del Pinch, reubicar servicios y revelar cuellos de botella térmicos con mínimos cambios de hardware (Gadalla,

2015). La tendencia actual es combinar esa intuición gráfica con simulación y optimización para acelerar la convergencia de diseños industriales factibles.

Realidad aumentada (RA) en educación en ingeniería química y fenómenos térmicos

En educación en ingeniería química, los estudios de los últimos años muestran evidencia acumulada de que la RA mejora la motivación y el rendimiento cuando se diseña con objetivos instruccionales claros. En un ensayo cuasi-experimental con lecciones RA sobre bomba centrífuga e intercambiador carcasa-y-tubos, se pudieron reportar mejoras significativas en la motivación de aprendizaje y desempeño de estudiantes (Education for Chemical Engineers), subrayando el valor de experiencias inmersivas vinculadas a equipos reales (Chang et al., 2022). Más recientemente, un mapeo y revisión sistemática específica para ingeniería química sintetiza 22 artículos y documenta que la RA incrementa el involucramiento, apoya la exploración de operaciones unitarias y facilita la construcción de gemelos digitales con interfaces RA, aunque advierte la necesidad de diseños pedagógicos rigurosos y evaluaciones estandarizadas (Rebello et al., 2024).

En cuanto a la visualización de fenómenos térmicos invisibles, existen avances robustos desde la ingeniería de la visión y la manufactura: Cao et al. (2021) presentan un sistema de RA espacial multi-sensor que reconstruye en 3D campos de temperatura con cámara IR + RGB-D y proyecta esa información sobre el objeto físico en tiempo real, habilitando la inspección y toma de decisiones térmicas in situ. De forma complementaria, trabajos recientes integran RA con redes de sensores inalámbricos IoT para el mapeo espacio-temporal del confort térmico y la operación de HVAC, probando su potencial para controlar sistemas térmicos con retroalimentación visual inmediata (Mohammadi et al., 2024). Estas capacidades—proyección

térmica precisa y telemetría en tiempo real—son especialmente prometedoras para enseñanza/aprendizaje de transferencia de calor y para diagnóstico energético de equipos.

RA para apoyar análisis Pinch y toma de decisiones termo-económicas

Aunque la literatura aún no reporta de forma amplia aplicaciones RA directamente integradas con gráficos de Pinch (curvas compuestas/GCC) en contextos industriales, las piezas tecnológicas ya están disponibles: (i) RA con renderizado y proyección de mapas térmicos sobre equipos reales (Cao et al., 2021), (ii) RA educativa específica en ingeniería química con evidencia de mejora en resultados (Chang et al., 2022), y (iii) métodos de Pinch dinámicos/electrificados que generan metas y sensibilidades dependientes de $\Delta T_{\min}$, perfil de carga y trabajo eléctrico (Lincoln et al., 2022). Esta triada habilita casos de uso de vanguardia: superponer en RA curvas compuestas y GCC vinculadas a datos de planta, manipular $\Delta T_{\min}$ con controles interactivos y visualizar impactos en utilidades y trabajo en tiempo real, así como guiar retrofits señalando cruces prohibidos o matches candidatos directamente sobre la maqueta o el equipo real.

De cara a la práctica, una agenda de investigación inmediata es el acoplamiento RA-Pinch con datos de operación (IoT) para procesos variables: por ejemplo, combinar un modelo Pinch-dinámico con RA para entrenamiento operativo—qué ocurre con metas energéticas y coste total cuando varía $\Delta T_{\min}$, cambia la estrategia de bomba de calor o se alteran condiciones de campo. Con la sensibilización visual que habilita la RA, el análisis de compromiso energía-área-costo podría internalizarse más rápido por estudiantes e ingenieros, reduciendo la brecha entre teoría (metas) y diseño factible (HEN y utilidades) en planta.

Apéndice R. Protocolo de Evaluación: Análisis Pinch Tradicional vs. App AR-Unity

Este protocolo organiza la práctica de laboratorio en dos etapas comparativas. El objetivo es que el estudiante valide sus cálculos manuales (Etapa 1) mediante la agilidad y precisión de la simulación digital interactiva (Etapa 2).

Datos Técnicos de Entrada (Sistema Base)

Corriente	Tipo	T In (°C)	T Out (°C)	CP (kW/°C)
H1	Caliente	180	40	2.0
H2	Caliente	150	40	1.27
C1	Fría	60	180	1.5
C2	Fría	30	130	1.7

Etapa 1: Análisis Tradicional (Manual)

Enfoque: Fundamentación teórica y desarrollo matemático riguroso.

- **Fase 1: Intercambio Individual.** Utilizando únicamente las corrientes **H1** y **C1** y un ΔT_{min} de 10°C, determine los requerimientos térmicos y grafique el diagrama T-H simple.
- **Fase 2: Red en Cascada.** Incorpore las 4 corrientes. Construya la **Tabla del Problema** completa

(intervalos, CP neto y cascada de calor) para hallar el punto crítico del sistema industrial.

Etapa 2: Análisis Digital (Simulador AR-Unity)

Enfoque: Verificación instantánea, visualización 3D y análisis de sensibilidad.

- V. **Fase 1: Validación Individual.** En la App, elimine H2 y C2. Verifique si los resultados coinciden con sus cálculos de la Etapa 1 Fase 1. Observe el comportamiento lineal.
- VI. **Fase 2: Simulación Global y Sensibilidad.** Restaure todas las corrientes. Realice un análisis de sensibilidad elevando el ΔT_{min} a 40°C . Observe cómo el "cuello de botella" (Pinch) se desplaza y el consumo energético aumenta visualmente en la gráfica.

Cuadro de Control de Resultados

La siguiente tabla consolida los resultados teóricos exactos que el estudiante debe alcanzar en cada hito de la práctica:

Etapa / Fase	Configuración	ΔT_{min} ($^{\circ}\text{C}$)	Q_h (kW)	Q_c (kW)	Pinch ($^{\circ}\text{C}$)
E1 - Fase 1	Manual (H1 y C1)	10	15.0	115.0	180.0
E1 - Fase 2	Manual (4 corrientes)	10	15.0	84.7	180.0

Etapa / Fase	Configuración	ΔT_{min} (°C)	Q _h (kW)	Q _c (kW)	Pinch (°C)
E2 - Fase 1	App (Validación H1-C1)	10	15.0	115.0	180.0
E2 - Fase 2	App (Análisis Sensibilidad)	40	79.0	148.7	150.0

Nota: Los valores en la App se actualizan en tiempo real al mover los controles deslizantes. El estudiante debe anotar la variación observada para su discusión en el informe final.

Apéndice S. Código HTML App

```
<!DOCTYPE html>
<html lang="es">
<head>
<meta charset="UTF-8">
<title>Motor Pinch · AR-UNITY V5.0</title>
<style>
    @import
url('https://fonts.googleapis.com/css2?family=Share+Tech+Mono&family=Exo+2:wght@300;400;600;700&display=swap');
```

```
:root {
    --bg:      #0a0d14;
    --panel:   #0f1520;
    --border:  #1e2d45;
    --hot:     #ff4136;
    --cold:    #00b4ff;
    --pinch:   #f5c518;
    --text:    #c8d8e8;
```

```

    --muted:    #4a6070;
    --mono:     'Share Tech Mono', monospace;
    --sans:     'Exo 2', sans-serif;
  }

  *, ::before, ::after { box-sizing: border-box; margin: 0; padding: 0; }

  body {
    background: var(--bg); color: var(--text); font-family: var(--sans);
    min-height: 100vh; display: flex; flex-direction: column; overflow-x: hidden;
  }

  /* — TOP BAR — */
  .topbar { display: flex; align-items: center; gap: 12px; padding: 10px 20px; background:
#060a10; border-bottom: 1px solid var(--border); flex-wrap: wrap; }
  .brand { font-family: var(--mono); font-size: 13px; letter-spacing: 3px; color: #fff;
padding: 4px 12px; border: 1px solid var(--border); border-radius: 4px; margin-right: 6px; }
  .legend-pill { display: flex; align-items: center; gap: 6px; font-size: 11px; font-family:
var(--mono); padding: 4px 10px; border-radius: 20px; border: 1px solid; letter-spacing: 1px; }
  .legend-pill.hot { color: var(--hot); border-color: var(--hot);
background: rgba(255,65,54,0.08); }
  .legend-pill.cold { color: var(--cold); border-color: var(--cold);
background: rgba(0,180,255,0.08); }
  .legend-pill.pin { color: var(--pinch); border-color: var(--pinch);
background: rgba(245,197,24,0.08); }
  .dot { width: 8px; height: 8px; border-radius: 50%; }
  .dot.hot { background: var(--hot); box-shadow: 0 0 6px var(--hot); }
  .dot.cold { background: var(--cold); box-shadow: 0 0 6px var(--cold); }
  .dot.pin { background: var(--pinch); box-shadow: 0 0 6px var(--pinch); }
  .topbar-right { margin-left: auto; display: flex; gap: 8px; }
  .btn-sm { padding: 4px 12px; font-size: 11px; font-family: var(--mono);
background: transparent; color: var(--text); border: 1px solid var(--border); border-radius: 4px;
cursor: pointer; transition: all .2s; }
  .btn-sm:hover { background: rgba(255,255,255,0.05); }

  /* — CHART — */
  .chart-wrap { position: relative; height: 400px; padding: 20px 16px; }
  canvas#pinchChart { display: block; width: 100%; height: 100%; }

  /* — SLIDER PANEL — */
  .slider-panel { background: #080c14; border-top: 1px solid var(--border); padding: 12px
24px; display: flex; align-items: center; gap: 40px; flex-wrap: wrap; }
  .slider-group { display: flex; align-items: center; gap: 10px; }
  .slider-label { font-family: var(--mono); font-size: 11px; color: var(--muted);
letter-spacing: 1px; }

```

```

        .slider-val { font-family:var(--mono); font-size:13px; color:var(--text);
min-width:50px; font-weight: bold; }
        input[type=range] { -webkit-appearance:none; width:160px; height:3px;
border-radius:2px; background:var(--border); outline:none; }
        input[type=range]::-webkit-slider-thumb { -webkit-appearance:none; width:14px;
height:14px; border-radius:50%; background:var(--pinch); box-shadow:0 0 8px var(--pinch);
cursor:pointer; }

/* — STREAM TABLE — */
        .stream-table-wrap { padding:0 24px 10px; background:#080c14; border-top:1px solid
var(--border); overflow-x:auto; }
        table.streams { width:100%; border-collapse:collapse; font-size:12px;
font-family:var(--mono); }
        table.streams th { padding:7px 10px; text-align:left; color:var(--muted);
border-bottom:1px solid var(--border); letter-spacing:1px; font-size:10px; font-weight:400; }
        table.streams td { padding:5px 10px; border-bottom:1px solid #111a24; }
        table.streams td input { background:#0a1018; border:1px solid #1a2535;
color:var(--text); padding:3px 6px; border-radius:3px; width:72px; font-family:var(--mono);
font-size:11px; }
        table.streams td input:focus { outline:none; border-color:var(--cold); }
        .type-hot { color:var(--hot); }
        .type-cold { color:var(--cold); }
        .del-btn { background:none; border:none; cursor:pointer; color:var(--muted);
font-size:14px; padding:0 4px; }
        .del-btn:hover { color:var(--hot); }

/* — RESULTS BAR — */
        .results-bar { display:grid; grid-template-columns:repeat(3,1fr); border-top:1px solid
var(--border); }
        .res-card { padding:14px 24px; border-right:1px solid var(--border); text-align: center; }
        .res-card:last-child { border-right:none; }
        .res-label { font-size:10px; font-family:var(--mono); color:var(--muted);
letter-spacing:1px; margin-bottom:4px; }
        .res-value { font-size:26px; font-family:var(--mono); font-weight:700;
letter-spacing:1px; }
        .res-value.hot { color:var(--hot); }
        .res-value.cold { color:var(--cold); }
        .res-value.pin { color:var(--pinch); }
    </style>
</head>
<body>

<div class="topbar">
    <span class="brand">AR · UNITY</span>
    <span class="legend-pill hot"><span class="dot hot"></span> Corriente
Caliente</span>

```

```

<span class="legend-pill cold"><span class="dot cold"></span> Corriente Fría</span>
<span class="legend-pill pin"><span class="dot pin"></span> Punto Pinch</span>
<div class="topbar-right">
  <button class="btn-sm" onclick="agregarCorriente('Caliente')">+ Caliente</button>
  <button class="btn-sm" onclick="agregarCorriente('Fría')">+ Fría</button>
</div>
</div>

<div class="chart-wrap">
  <canvas id="pinchChart"></canvas>
</div>

<div class="slider-panel">
  <div class="slider-group">
    <span class="slider-label"> $\Delta T_{\text{min}}$ </span>
    <input type="range" id="slDt" min="1" max="40" value="20"
oninput="onDtChange()">
    <span class="slider-val" id="valDt">20 °C</span>
  </div>
  <span style="font-family:var(--mono);font-size:10px;color:var(--muted);
margin-left:20px;">
    Diagrama T-H oficial: Curvas compuestas ascendentes y estrangulamiento térmico
visible.
  </span>
</div>

<div class="stream-table-wrap">
  <table class="streams" id="streamsTable">
    <thead>
      <tr>
        <th>NOMBRE</th><th>TIPO</th><th>T IN (°C)</th><th>T OUT
(°C)</th><th>CP (kW/°C)</th><th>Q (kW)</th><th></th>
      </tr>
    </thead>
    <tbody></tbody>
  </table>
</div>

<div class="results-bar">
  <div class="res-card"><div class="res-label">Q mínimo calentamiento (Qh)</div><div
class="res-value hot" id="resQh">-- kW</div></div>
  <div class="res-card"><div class="res-label">Q mínimo enfriamiento (Qc)</div><div
class="res-value cold" id="resQc">-- kW</div></div>
  <div class="res-card"><div class="res-label">Temperatura Pinch (Caliente)</div><div
class="res-value pin" id="resTp">-- °C</div></div>
</div>

```



```

<script>
// DATOS NUEVOS: Diseñados para que el Pinch ocurra visualmente en el centro
let corrientes = [
  { id:1, nombre:'H1', tipo:'Caliente', tin:200, tout:60, cp:2.0 },
  { id:2, nombre:'H2', tipo:'Caliente', tin:150, tout:40, cp:2.0 },
  { id:3, nombre:'C1', tipo:'Fría', tin:40, tout:180, cp:2.5 },
  { id:4, nombre:'C2', tipo:'Fría', tin:30, tout:130, cp:1.5 },
];
let nextId = 5;

function onDtChange() {
  document.getElementById('valDt').textContent = slDt.value + ' °C';
  calcularPinch();
}

function calcularPinch() {
  const dTmin = parseFloat(document.getElementById('slDt').value);

  // 1. Algoritmo de la Tabla del Problema (Cascada)
  let tempSet = new Set();
  corrientes.forEach(c => {
    let s = c.tipo === 'Caliente' ? -dTmin/2 : dTmin/2;
    tempSet.add((c.tin + s).toFixed(6));
    tempSet.add((c.tout + s).toFixed(6));
  });
  let temps = Array.from(tempSet).sort((a,b) => b-a);

  let enthalpies = [];
  for (let i = 0; i < temps.length-1; i++) {
    let tH = temps[i], tL = temps[i+1];
    let cpNet = 0;
    corrientes.forEach(c => {
      let s = c.tipo === 'Caliente' ? -dTmin/2 : dTmin/2;
      let lo = Math.min(c.tin, c.tout) + s;
      let hi = Math.max(c.tin, c.tout) + s;
      if (lo <= tL + 1e-6 && hi >= tH - 1e-6)
        cpNet += c.tipo === 'Caliente' ? c.cp : -c.cp;
    });
    enthalpies.push(cpNet * (tH - tL));
  }

  let cascade = [0];
  enthalpies.forEach(dH => cascade.push(cascade[cascade.length-1] + dH));
  let minCascade = Math.min(...cascade);
  let qhMin = minCascade < 0 ? -minCascade : 0;

```

```

let cascAdj = cascade.map(q => q + qhMin);
let qcMin = cascAdj[cascAdj.length-1];

let tPinchShifted = null;
for (let i = 0; i < cascAdj.length; i++) {
    if (Math.abs(cascAdj[i]) < 1e-3) {
        tPinchShifted = temps[i];
        break;
    }
}
let tPinchHot = tPinchShifted !== null ? tPinchShifted + dTmin/2 : null;

document.getElementById('resQh').textContent = qhMin.toFixed(1) + ' kW';
document.getElementById('resQc').textContent = qcMin.toFixed(1) + ' kW';
document.getElementById('resTp').textContent = tPinchHot ? tPinchHot.toFixed(1) + '
°C' : '-- °C';

// 2. Construcción de Curvas Compuestas (Termodinámica Estándar: Ambas suben)
const hotPts = buildComposite('Caliente');
const coldPts = buildComposite('Fría');

drawChart(hotPts, coldPts, qhMin, qcMin, tPinchHot, dTmin);
renderTable();
}

function buildComposite(tipo) {
    let streams = corrientes.filter(c => c.tipo === tipo);
    if (!streams.length) return [];

    let tSet = new Set();
    streams.forEach(c => { tSet.add(c.tin); tSet.add(c.tout); });
    let tArr = Array.from(tSet).sort((a,b) => a-b); // De menor a mayor

    let pts = [];
    let qCum = 0;
    pts.push({ t: tArr[0], q: 0 }); // Inician en T mínima

    for (let i = 0; i < tArr.length - 1; i++) {
        let tL = tArr[i], tH = tArr[i+1];
        let cp = 0;
        streams.forEach(c => {
            if (Math.max(c.tin,c.tout) >= tH - 1e-6 && Math.min(c.tin,c.tout) <= tL + 1e-6) cp
+= c.cp;
        });
        qCum += cp * (tH - tL);
        pts.push({ t: tH, q: qCum });
    }
}
    
```

```

    }
    return pts;
}

function drawChart(hotPts, coldPts, qhMin, qcMin, tPinchHot, dTmin) {
    const canvas = document.getElementById('pinchChart');
    const wrap = canvas.parentElement;
    const W = wrap.clientWidth, H = wrap.clientHeight;
    canvas.width = W * devicePixelRatio; canvas.height = H * devicePixelRatio;
    const ctx = canvas.getContext('2d');
    ctx.scale(devicePixelRatio, devicePixelRatio);
    ctx.clearRect(0, 0, W, H);

    if (!hotPts.length || !coldPts.length) return;

    const ML=60, MR=40, MT=40, MB=40;
    const PW = W-ML-MR, PH = H-MT-MB;

    // 3. Desplazamiento de la Fría: Empieza en X = qcMin
    const coldShifted = coldPts.map(p => ({ t: p.t, q: p.q + qcMin }));

    const Q_hot_total = hotPts[hotPts.length-1].q;
    const qGlobalMax = Math.max(Q_hot_total, coldShifted[coldShifted.length-1].q);
    const allT = [...hotPts.map(p=>p.t), ...coldShifted.map(p=>p.t)];
    const tMin = Math.min(...allT), tMax = Math.max(...allT);

    const tPad = (tMax-tMin)*0.1 || 10;
    const qPad = qGlobalMax * 0.1 || 20;

    const mapX = q => ML + PW * (q / (qGlobalMax + qPad));
    const mapY = t => MT + PH * (1 - (t - tMin + tPad) / (tMax - tMin + tPad*2));

    // — Grid y Ejes —
    ctx.strokeStyle='#141e2c'; ctx.lineWidth=1;
    for (let i=1; i<=8; i++) { let x = ML + PW*i/8; ctx.beginPath(); ctx.moveTo(x, MT);
    ctx.lineTo(x, MT+PH); ctx.stroke(); }
    for (let i=1; i<=6; i++) { let y = MT + PH*i/6; ctx.beginPath(); ctx.moveTo(ML, y);
    ctx.lineTo(ML+PW, y); ctx.stroke(); }

    ctx.strokeStyle='#1e2d45'; ctx.lineWidth=1.5;
    ctx.beginPath(); ctx.moveTo(ML, MT); ctx.lineTo(ML, MT+PH); ctx.lineTo(ML+PW,
    MT+PH); ctx.stroke();

    // Etiquetas de Ejes
    ctx.fillStyle = "rgba(255,255,255,0.6)"; ctx.font = "12px Share Tech Mono";
    ctx.textAlign = "left";

```

```

ctx.fillText("T (°C)", ML - 40, MT - 10);
ctx.textAlign = "center"; ctx.fillText("Entalpía (Calor Q) →", W/2, H - 10);

// — Zonas Q cool y Q heat (Sombreadas) —
let xColdStart = mapX(qcMin);
if (qcMin > 0) {
    ctx.fillStyle = 'rgba(0,180,255,0.1)';
    ctx.fillRect(ML, MT, xColdStart - ML, PH);
    ctx.font = 'bold 12px Share Tech Mono'; ctx.fillStyle = 'rgba(0,180,255,0.9)';
    ctx.fillText('Q cool', ML + 15, MT + PH - 10);
}

let xHotEnd = mapX(Q_hot_total);
let xColdEnd = mapX(coldShifted[coldShifted.length-1].q);
if (xColdEnd > xHotEnd) {
    ctx.fillStyle = 'rgba(255,65,54,0.1)';
    ctx.fillRect(xHotEnd, MT, xColdEnd - xHotEnd, PH);
    ctx.font = 'bold 12px Share Tech Mono'; ctx.fillStyle = 'rgba(255,100,80,0.9)';
    ctx.fillText('Q heat', xHotEnd + 15, MT + 20);
}

// — Dibujo de Curvas Paralelas —
const draw = (pts, col) => {
    ctx.strokeStyle=col; ctx.lineWidth=3.5; ctx.shadowBlur=12; ctx.shadowColor=col;
    ctx.beginPath();
    pts.forEach((p,i) => i===0 ? ctx.moveTo(mapX(p.q), mapY(p.t)) :
ctx.lineTo(mapX(p.q), mapY(p.t)));
    ctx.stroke(); ctx.shadowBlur=0;
};
draw(hotPts, '#ff4136'); // Caliente
draw(coldShifted, '#00b4ff'); // Fría

// Títulos de las curvas
ctx.textAlign = "left"; ctx.fillStyle = "#ff4136";
ctx.fillText("Curva Compuesta Caliente", ML + 10, MT - 10);
ctx.textAlign = "right"; ctx.fillStyle = "#00b4ff";
ctx.fillText("Curva Compuesta Fría", W - MR - 10, MT - 10);

// — INDICADOR PINCH (Justo en el medio) —
if (tPinchHot) {
    const tPinchCold = tPinchHot - dTmin;

    // Obtenemos el Q interpolando en la curva caliente para que encaje perfecto
    const qPinch = interpolateQ(hotPts, tPinchHot);
    const xPinch = mapX(qPinch);
    const yH = mapY(tPinchHot);

```

```

const yC = mapY(tPinchCold);

// Línea vertical central
ctx.save();
ctx.setLineDash([4, 4]);
ctx.strokeStyle = '#f5c518'; ctx.lineWidth = 2;
ctx.shadowColor = '#f5c518'; ctx.shadowBlur = 8;
ctx.beginPath(); ctx.moveTo(xPinch, yH); ctx.lineTo(xPinch, yC); ctx.stroke();
ctx.restore();

// Palitos terminales horizontales
ctx.strokeStyle = '#f5c518'; ctx.lineWidth = 2;
ctx.beginPath(); ctx.moveTo(xPinch-12, yH); ctx.lineTo(xPinch+12, yH); ctx.stroke();
ctx.beginPath(); ctx.moveTo(xPinch-12, yC); ctx.lineTo(xPinch+12, yC); ctx.stroke();

// Círculos Neón
ctx.fillStyle = '#ff4136'; ctx.beginPath(); ctx.arc(xPinch, yH, 5, 0, 7); ctx.fill();
ctx.fillStyle = '#00b4ff'; ctx.beginPath(); ctx.arc(xPinch, yC, 5, 0, 7); ctx.fill();

// Texto ΔTmin
ctx.fillStyle = '#f5c518'; ctx.font = 'bold 12px Share Tech Mono'; ctx.textAlign =
"left";
    ctx.fillText(`ΔTmin = ${dTmin} °C`, xPinch + 15, (yH + yC)/2 + 4);
}
}

function interpolateQ(pts, t) {
    for (let i = 0; i < pts.length-1; i++) {
        let t0 = pts[i].t, t1 = pts[i+1].t;
        if (t >= t0 - 1e-6 && t <= t1 + 1e-6) {
            if (Math.abs(t1 - t0) < 1e-9) return pts[i].q;
            let f = (t - t0) / (t1 - t0);
            return pts[i].q + f * (pts[i+1].q - pts[i].q);
        }
    }
    return pts[pts.length-1].q;
}

function renderTable() {
    const tbody = document.querySelector('#streamsTable tbody');
    tbody.innerHTML = "";
    corrientes.forEach(c => {
        let q = (c.cp * Math.abs(c.tin-c.tout)).toFixed(0);
        tbody.innerHTML += `<tr>
            <td>${c.nombre}</td>
            <td class="${c.tipo==='Caliente'? 'type-hot': 'type-cold'}">${c.tipo}</td>

```

```

        <td><input type="number" value="{c.tin}"
onchange="updateStream({c.id},'tin',this.value)"></td>
        <td><input type="number" value="{c.tout}"
onchange="updateStream({c.id},'tout',this.value)"></td>
        <td><input type="number" value="{c.cp}" step="0.1"
onchange="updateStream({c.id},'cp',this.value)"></td>
        <td>{q} kW</td>
        <td><button class="del-btn" onclick="delStream({c.id})"> X </button></td>
    </tr>`;
    });
}

function updateStream(id, field, val) {
    let c = corrientes.find(c=>c.id===id);
    if (c) { c[field]=parseFloat(val); calcularPinch(); }
}
function delStream(id) { corrientes=corrientes.filter(c=>c.id!==id); calcularPinch(); }
function agregarCorriente(tipo) {
    let p=tipo==='Caliente'?'H':'C'; let n=corrientes.filter(c=>c.tipo===tipo).length+1;
    corrientes.push({ id:nextId++, nombre:p+n, tipo, tin:tipo==='Caliente'?150:30,
tout:tipo==='Caliente'?40:130, cp:1.0 });
    calcularPinch();
}

calcularPinch();
window.addEventListener('resize', calcularPinch);
</script>
</body>
</html>

```