

Design and implementation of a control system in an autoclave as an educational tool for biomedical engineering students

Diseño e implementación de un sistema de control en autoclave como herramienta educativa para estudiantes de ingeniería biomédica

Deybi Maldonado Lopez¹  , Eynar Calle Viles¹  , Elio Denis Machuca Flores¹  , Rommer Alex Ortega-Martinez¹  

¹Universidad Privada del Valle. Cochabamba. Bolivia.

Cite as

Maldonado Lopez D, Calle Viles E, Machuca Flores ED, Ortega-Martinez RA. Design and implementation of a control system in an autoclave as an educational tool for biomedical engineering students. SAP Biomedical & Chemical Engineering Innovation. 2026; 5:375. <https://doi.org/10.56294/evk2026375>

Publication History

Submitted: 17-07-2025

Revised: 10-10-2025

Accepted: 07-12-2025

Published: 03-01-2026

Corresponding Author

Deybi Maldonado Lopez 

ABSTRACT

This study focused on the design and implementation of an automated control system for a Pelton & Crane model MC autoclave, with the aim of transforming it into a modern and didactic tool for Biomedical Engineering students. The equipment was structurally redesigned, and sensors, actuators, and a graphical user interface were integrated to illustrate the internal operation of the sterilizer in real time. The educational strategy was structured into four sequential stages: (1) identification of components and maintenance practices, (2) animated visualization of the sterilization cycle, (3) demonstration of the water treatment system, and (4) diagnosis of common faults. To validate the academic impact, knowledge surveys were applied before and after the practical experience. The results showed a significant improvement in students' understanding of sterilization principles and autoclave maintenance. The modified device achieved standard sterilization conditions (121 °C, 205 kPa), and its educational use led to a 94 % increase in average student performance on evaluations. Overall, the educational autoclave proved to be an effective tool for reinforcing hands-on learning and enhancing the training of future biomedical engineers.

Keywords: Educational Autoclave; Sterilization; Didactic Tool; Biomedical Engineering; Automated Control.

RESUMEN

Este estudio se centró en el diseño e implementación de un sistema de control automatizado para una autoclave Pelton & Crane modelo MC, con el propósito de convertirla en una herramienta moderna y didáctica para estudiantes de Ingeniería Biomédica. Se rediseñó estructuralmente el equipo y se integraron sensores, actuadores y una interfaz gráfica de usuario para ilustrar en tiempo real el funcionamiento interno del esterilizador. La estrategia educativa se estructuró en cuatro etapas secuenciales: (1) identificación de componentes y prácticas de mantenimiento, (2) visualización animada del ciclo de esterilización, (3) demostración del sistema de tratamiento de agua, y (4) diagnóstico de fallas comunes. Para validar el impacto académico, se aplicaron encuestas de conocimientos antes y después de la experiencia práctica. Los resultados mostraron una mejora significativa en la comprensión de los principios de esterilización y mantenimiento de autoclaves por parte de los estudiantes. El dispositivo modificado logró condiciones de esterilización estándar (121 °C, 205 Kpa) y su uso didáctico incrementó en un 94 % el desempeño promedio en las evaluaciones de los alumnos. En conjunto, la autoclave educativa demostró ser una herramienta eficaz para reforzar el aprendizaje práctico y potenciar la formación de futuros ingenieros biomédicos.

Palabras clave: Autoclave Educativa; Esterilización; Herramienta Didáctica; Ingeniería Biomédica; Control Automatizado.

INTRODUCCIÓN

La esterilización por vapor es uno de los métodos más utilizados en el ámbito hospitalario para la eliminación de microorganismos patógenos en materiales médicos. Este proceso, basado en la aplicación de vapor saturado a alta temperatura y presión, asegura una esterilización eficaz cuando se alcanzan condiciones controladas de 121 °C y 205 kPa durante un tiempo mínimo de 15 minutos. La comprensión de este proceso no solo implica conocimientos en microbiología y termodinámica, sino también en mecánica de sistemas presurizados, control automático y normas internacionales como la EN 13060 (esterilizadores de vapor de pequeña capacidad) o AAMI ST79 (para calidad de agua y procedimientos de validación).

En el contexto de la formación de ingenieros biomédicos, el dominio del funcionamiento y mantenimiento de autoclaves constituye una competencia fundamental. Sin embargo, en la mayoría de los programas universitarios la enseñanza de tecnologías médicas se encuentra limitada a clases teóricas o prácticas limitadas a la observación, principalmente por la complejidad operativa y los riesgos inherentes al manejo de autoclaves reales en funcionamiento. Esta falta de contacto con el equipo durante la etapa formativa deriva en egresados con escasa experiencia práctica, dificultad para identificar fallas técnicas y dependencia del soporte externo para tareas de mantenimiento preventivo o correctivo.

Diversos autores enfatizan la importancia de complementar la enseñanza teórica con herramientas prácticas e interactivas para mejorar la comprensión de tecnologías biomédicas.⁽¹⁾ En el caso de los esterilizadores, una capacitación inadecuada puede derivar en fallas recurrentes y en una dependencia excesiva del personal especializado para resolverlas. Por ello, surge la necesidad de desarrollar plataformas didácticas que permitan a los estudiantes explorar el funcionamiento interno de equipos complejos como las autoclaves de manera segura y controlada. Estudios previos han reportado bajos niveles de conocimiento sobre procesos de esterilización en personal de salud, evidenciando lagunas formativas que podrían abordarse mediante estrategias educativas más prácticas.



Figura 1. Muestra el equipo didáctico final, resultado del proceso de modernización. Autoclave Pelton et al. modificada como herramienta didáctica, mostrando el interior de la cámara de esterilización y componentes del nuevo sistema de control (sensores, cableado y actuadores)

En esta línea, el presente artículo describe el diseño, implementación y validación de una autoclave educativa modernizada, a partir de un equipo clínico fuera de servicio, adaptado para su uso como herramienta didáctica interactiva. La propuesta incluye un sistema de control basado en Raspberry Pi, sensores de precisión, una interfaz gráfica de usuario desarrollada en PyQt5 y una planta de tratamiento de agua demostrativa. La estructura pedagógica se divide en cuatro módulos secuenciales que guían al estudiante desde el reconocimiento de componentes internos hasta la resolución de fallas simuladas. Se presentan resultados técnicos de operación, pruebas de esterilización, así como datos cuantitativos del impacto educativo en estudiantes de Ingeniería Biomédica.

MÉTODO

El proyecto se desarrolló tomando como base una autoclave de mesa marca Pelton & Crane, modelo MC, previamente fuera de

servicio. A continuación, se describen los procedimientos seguidos en el rediseño del equipo, el desarrollo del sistema de control e interfaz educativa, y la validación didáctica con estudiantes, conforme a un enfoque experimental en laboratorio. Todas las etapas se documentaron siguiendo una secuencia lógica de implementación.

Rediseño mecánico y eléctrico de la autoclave

Se inició con una inspección exhaustiva del esterilizador original para identificar componentes, averías y oportunidades de modificación para uso pedagógico. Se llevó a cabo un mantenimiento correctivo que incluyó el mantenimiento o reemplazo de componentes dañados y la optimización del circuito de tuberías de la autoclave para facilitar su comprensión visual. Asimismo, se incorporaron dispositivos de seguridad eléctrica, mecánica y por software. La carcasa externa del equipo fue adaptada para exponer elementos internos de interés y lograr un equilibrio entre la visibilidad de los componentes y la operación segura de la autoclave por parte de los estudiantes. Adicionalmente, se montó un tablero de control frontal con indicadores luminosos y una distribución adecuada y de fácil acceso para la realización de actividades de medición, verificación y mantenimiento. En resumen, la autoclave fue reacondicionado para servir como plataforma educativa, manteniendo su funcionalidad de esterilización, pero añadiendo elementos que facilitan su manipulación y entendimiento en un entorno académico.

Sistema de control automatizado

Paralelamente al refaccionamiento físico, se diseñó un sistema electrónico basado en una Raspberry Pi 4 con circuitos de interfaz para sensores y actuadores. Se desarrolló una placa de control personalizada con acondicionadores de señal y drivers de potencia para gobernar los componentes de la autoclave. El sistema incluye: un sensor de temperatura PT100 con conversor A/D, sensor de presión piezorresistivo, sensores de nivel de agua, resistencias calefactoras y electroválvulas para entrada y purga. El control ejecuta un algoritmo programado que regula temperatura y presión según el ciclo de esterilización, usando lógica de modulación PWM conforme a la norma EN 13060. Se incorporó una rutina de eliminación de aire al inicio del ciclo para garantizar la penetración y distribución homogénea del vapor. También se implementaron alarmas de seguridad (por sobrepresión, sobre temperatura, falta de agua o fallos de sensores) que activan alertas visuales y sonoras, deteniendo el ciclo si es necesario. Todos los datos y eventos del proceso se almacenan en una base de datos SQLite para seguimiento académico y mantenimiento.

Interfaz gráfica educativa

Se implementó una aplicación con interfaz gráfica de usuario (GUI) utilizando la biblioteca PyQt5 sobre el entorno Linux de la Raspberry Pi. La GUI fue desplegada en una pantalla táctil LCD de 10 pulgadas acoplada al equipo. El diseño de la interfaz siguió lineamientos de usabilidad para entornos de aprendizaje, organizando la información en módulos didácticos claramente identificados. En particular, se definieron cuatro ventanas principales, correspondientes a las cuatro etapas de la secuencia educativa planificada. Cada ventana presenta gráficos, animaciones y controles interactivos específicos, facilitando la exploración guiada por parte del estudiante:

- **Primera etapa (Componentes y mantenimiento):** la interfaz muestra individualmente todos los componentes del sistema (figura 2). Al desplazar cada componente en la pantalla, el sistema despliega una breve descripción de su función, su importancia dentro del conjunto y recomendaciones de mantenimiento preventivo o correctivo asociadas. Además, los actuadores (por ejemplo, electroválvulas, resistencias calefactoras) cuentan con interruptores virtuales On/Off que permiten activarlos momentáneamente de forma aislada, de manera que el estudiante pueda observar su operación individual y su efecto inmediato en el sistema (por ejemplo, ver las resistencias funcionando y medir su consumo eléctrico o ver el cambio de estado de una electroválvula). Esta etapa inicial busca familiarizar al usuario con la identificación de cada parte de la autoclave y sentar bases para las etapas posteriores; el estudiante desarrolla destrezas de reconocimiento y aprende procedimientos básicos como verificar el estado de una junta, verificar el estado de un sensor o realizar el trabajo de mantenimiento de una electroválvula, apoyándose en guías prácticas adjuntas provistas como material complementario.



Figura 2. Ejemplo de ventanas de Primera etapa

• **Segunda etapa (Proceso de esterilización):** en este módulo, la pantalla exhibe un diagrama sinóptico animado que representa en tiempo real el ciclo completo de esterilización dentro de la autoclave (figura 3). Se incluyen animaciones para las fases de llenado, calentamiento, homogenización, esterilización (exposición), despresurización y secado/enfriamiento, sincronizadas con la operación real del equipo. Indicadores visuales señalan el estado de cada sensor y actuador durante el ciclo (p. ej., la válvula de descarga abriéndose en la fase de despresurización, la resistencia encendida durante el calentamiento, etc.). Complementariamente, gráficos dinámicos de presión y temperatura pueden ser visualizados en una sub-ventana, permitiendo seguir las curvas termodinámicas del proceso en vivo. El estudiante interactúa iniciando el ciclo desde la GUI, tras lo cual observa el desarrollo del mismo con apoyo de textos explicativos que aparecen en cada etapa, describiendo qué sucede y por qué. Esta segunda etapa vincula los componentes aprendidos previamente con su rol funcional, ayudando a comprender cómo interactúan las distintas partes durante el funcionamiento normal de la autoclave.



Figura 3. Ventana segunda etapa

• **Tercera etapa (Tratamiento de agua):** se integró al sistema una planta de tratamiento de agua, conectada a la autoclave, para enfatizar la relevancia de la calidad del agua en el proceso de esterilización. En la interfaz, una ventana dedicada ilustra esquemáticamente las etapas de purificación: prefiltración, suavización, ósmosis inversa y almacenamiento (figura 4). Mediante imágenes demostrativas, el estudiante puede seguir el recorrido del agua desde un tanque de abastecimiento inicial hasta llegar a ser tratada. Cada sub-etapa presenta información sobre su función (por ejemplo, eliminación de partículas, reducción de dureza, eliminación de sales y microorganismos) y su importancia para evitar daños en la autoclave (incrustaciones, corrosión) y garantizar una esterilización eficaz. Esta sección está alineada con estándares internacionales (como la recomendación AAMI ST79 y EN 13060 sobre pureza del agua para esterilización) y provee datos de referencia de la calidad del agua obtenida. La inclusión de este módulo permite reforzar conceptos interdisciplinarios de ingeniería biomédica relacionados a la preservación de equipos médicos.



Figura 4. Ventana tercera etapa

• **Cuarta etapa (Diagnóstico de fallas):** en la etapa final, la herramienta didáctica plantea escenarios de fallas frecuentes en autoclaves a vapor, simulados en la interfaz (figura 5). El estudiante puede navegar entre distintos casos de averías comunes (por ejemplo: falla de calefactor, fuga por válvula, sensor de temperatura defectuoso, etc.) usando

controles de avance/retroceso. Para cada fallo, el alumno debe seguir una lista estructurada de pruebas y comprobaciones para identificar la causa raíz. Estas pautas de diagnóstico se basan en protocolos reales de mantenimiento recomendados por fabricantes de autoclaves, adaptados al nivel educativo. El objetivo pedagógico es consolidar todos los conocimientos adquiridos en las etapas previas, aplicándolos en una situación de resolución de problemas de la vida real. De esta forma, el estudiante desarrolla habilidades de pensamiento crítico y metodología de mantenimiento, esenciales para su futura práctica profesional. Una vez concluido el diagnóstico en la interfaz, se discuten con el instructor las medidas correctivas adecuadas, fomentando el análisis y la discusión técnica.

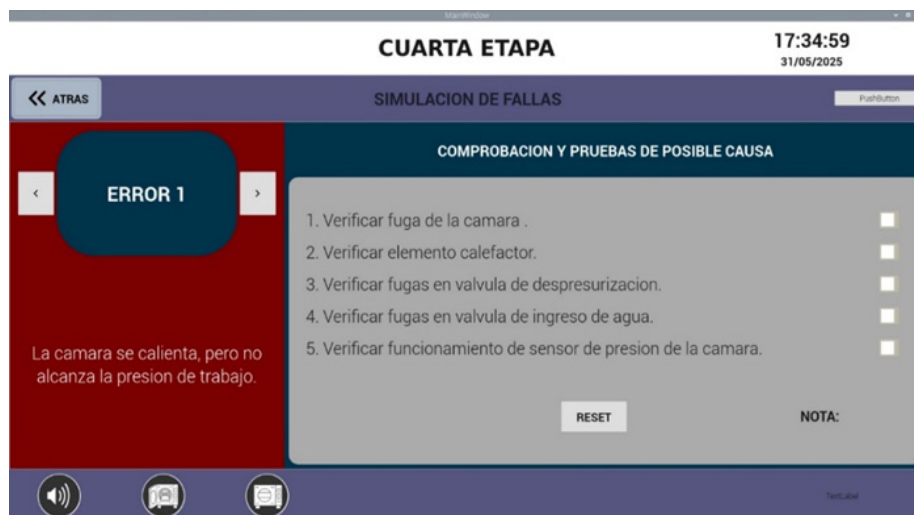


Figura 5. Ventana cuarta etapa

Cabe mencionar que todas las ventanas y funciones de la interfaz gráfica fueron programadas en PyQt5, asegurando consistencia visual y facilidad de uso que resultó ser intuitiva, permitiendo a estudiantes con poca experiencia previa navegar por las cuatro etapas sin dificultades significativas.

Validación funcional y didáctica

Finalizada la implementación, se procedió a verificar el correcto funcionamiento de la autoclave bajo control automatizado. Se llevaron a cabo múltiples ciclos de esterilización de prueba con cargas simuladas, monitoreando las curvas de temperatura y presión registradas. Los resultados mostraron que, tras ajustes en la secuencia de remoción de aire y en los parámetros del controlador PWM, el sistema alcanzó una meseta de esterilización estable de 121 ± 1 °C durante el tiempo requerido (15 min), manteniendo la presión acorde a vapor saturado (~205 kPa absolutos) (figura 6). Estos valores cumplen con las recomendaciones de la norma EN13060 para autoclaves clase N. Para confirmar la eficacia de esterilización, se utilizaron indicadores químicos clase 4 colocados en diferentes puntos de la cámara en ciclos completos. En todos los casos se observó el correcto viraje en los indicadores, evidenciando que se alcanzaron las condiciones necesarias de tiempo, temperatura y vapor saturado. Esta validación práctica aseguró que el equipo cumple plenamente su función clínica de esterilización, pero con un enfoque educativo.



Figura 6. Grafica final del ciclo de esterilización

Finalmente, para evaluar la utilidad didáctica de la autoclave, se llevó a cabo una experiencia piloto con estudiantes de Ingeniería Biomédica. Antes de la intervención educativa, se aplicó una prueba diagnóstica escrita de 10 preguntas de opción múltiple a 30

estudiantes de 7.º semestre que cursaron la materia “Instrumentación Médica II”. Esta asignatura incluye contenidos teóricos sobre autoclaves y sistemas de tratamiento de agua, por lo que el examen buscó medir los conocimientos previos adquiridos por métodos tradicionales. Las preguntas abordaron temas como principios de funcionamiento, medidas de seguridad y nociones básicas sobre el agua utilizada en esterilización. Los resultados mostraron un rendimiento bajo: solo el 35 % de respuestas fueron correctas en promedio, y algunas preguntas alcanzaron hasta un 90 % de error, lo que evidenció debilidades significativas en el aprendizaje teórico.



Figura 7. Participación de estudiantes en capacitación practica con el uso de la herramienta didáctica

Posteriormente, se realizó una sesión de capacitación práctica con 10 estudiantes en el laboratorio del centro de investigación UMA (figura 7), siguiendo las cuatro etapas didácticas definidas: (1) identificación y mantenimiento de componentes reales, (2) observación de un ciclo de esterilización con apoyo visual animado, (3) demostración del sistema de tratamiento de agua, y (4) análisis de fallas simuladas para su diagnóstico. Durante la práctica, los estudiantes interactuaron directamente con el equipo: activaron electroválvulas, midieron variables eléctricas con multímetros, y monitorearon temperatura y presión en tiempo real. La actividad fue guiada por un instructor, quien promovió el aprendizaje mediante preguntas y retroalimentación constante. Al concluir la capacitación (de aproximadamente 2 horas de duración), se aplicó una segunda encuesta diagnóstica con preguntas similares a la inicial, a fin de medir el incremento en el aprendizaje alcanzado.

RESULTADOS

Rendimiento del sistema implementado

La autoclave modificada respondió satisfactoriamente en las pruebas funcionales. Se logró completar ciclos automáticos de esterilización cumpliendo los parámetros requeridos. La figura 1 ilustra el aspecto final del sistema, donde pueden apreciarse las modificaciones realizadas. Durante las pruebas, tras corregir problemas de sellado y control, se alcanzó una temperatura de 121 °C mantenida por 15 minutos en la fase de esterilización, con una presión estable de ~130 Kpa manométrico, en concordancia con las condiciones de vapor saturado. La gráfica de la última prueba mostró una meseta estable sin caídas abruptas de presión al final del ciclo, indicando una buena eliminación del aire y un control de potencia adecuado en el calentamiento. Los indicadores químicos utilizados viraron completamente después del ciclo, validando la eficacia del proceso. Estos resultados confirman que la integración del nuevo sistema de control no comprometió la funcionalidad clínica del equipo, sino que incluso la optimizó. Asimismo, el sistema de adquisición de datos en la Raspberry Pi demostró ser confiable: se generaron reportes de cada ciclo con sus respectivas curvas de temperatura/presión, que podrán ser aprovechados para análisis posteriores en clase.

En cuanto al comportamiento de la interfaz didáctica, durante la sesión práctica, los estudiantes navegaron sin dificultad por las cuatro etapas de la interfaz. La respuesta táctil fue fluida y las animaciones se sincronizaron correctamente con el proceso real, destacándose el interés por la visualización gráfica del ciclo de esterilización, que facilitó la comprensión teórico-práctica. También valoraron la posibilidad de controlar manualmente componentes internos, lo que permitió una interacción segura con el sistema. No se registraron fallos de software ni desconexiones, demostrando la estabilidad de la integración hardware-software.

Impacto en el aprendizaje de los estudiantes: La comparación de los resultados de las evaluaciones inicial y final reveló un aumento sustancial en el nivel de conocimientos de los estudiantes tras interactuar con la herramienta didáctica. En la prueba

diagnóstica previa a la capacitación, el puntaje promedio fue de 35/100, reflejando un dominio bajo de los conceptos relacionados con autoclaves. Por el contrario, en la prueba posterior al entrenamiento práctico, el promedio se elevó a 68/100 puntos. Esta diferencia representa aproximadamente una mejora del 94 % respecto al desempeño inicial de los estudiantes. Además del incremento en la calificación promedio, se observó que el porcentaje de respuestas correctas aumentó en las 10 preguntas de la encuesta. Inicialmente, cerca del 65 % de las respuestas totales fueron erróneas; después de la intervención, el porcentaje de error disminuyó al 32 %. En particular, notamos avances significativos en ítems que abordaban temas prácticos: por ejemplo, la pregunta sobre procedimiento de purga de aire en la autoclave pasó de un 7 % de aciertos antes de la capacitación a un 80 % de aciertos después; la identificación del componente encargado de eliminar la dureza del agua (suavizador) subió de 20 % a 90 % de aciertos; y así sucesivamente en los demás tópicos. Esto indica que la experiencia directa con la autoclave educativa reforzó tanto conocimientos generales como específicos, especialmente aquellos que difícilmente se consolidan solo con clases teóricas. Cabe destacar que incluso conceptos de seguridad, como la respuesta ante una sobrepresión, fueron mejor comprendidos tras la práctica (evidenciado por un aumento del 50 % al 100 % de aciertos en la pregunta correspondiente). Todos los estudiantes encuestados expresaron, de manera informal, que la actividad les pareció muy útil para visualizar y afianzar lo aprendido en aula, y varios sugirieron que este tipo de herramientas se implementen en más asignaturas de la carrera. Si bien la muestra de la evaluación práctica fue reducida (10 alumnos), los resultados cuantitativos obtenidos brindan un indicio claro de la efectividad pedagógica de la autoclave diseñada.

DISCUSIÓN

Los hallazgos obtenidos reflejan claramente que el uso de la autoclave adaptada como herramienta didáctica mejoró la comprensión y retención de conocimientos en los estudiantes. La drástica diferencia entre los puntajes de la evaluación teórica inicial y la posterior a la sesión práctica pone de manifiesto las limitaciones del enfoque tradicional de enseñanza cuando no va acompañado de experiencias prácticas suficientes. Antes de la intervención, los alumnos poseían nociones fragmentadas e incompletas sobre la operación real de un esterilizador, a pesar de haber cursado los contenidos relevantes en clase. Esto concuerda con situaciones reportadas en la literatura, donde la simple exposición teórica a equipos complejos no garantiza su dominio por parte de los futuros profesionales.⁽²⁾ Tras interactuar con la autoclave educativa, los estudiantes demostraron no solo recordar mejor los conceptos, sino entenderlos en contexto, pudiendo relacionar causas y efectos dentro del sistema (por ejemplo, cómo una falla en el suministro de agua impacta la generación de vapor). Este tipo de comprensión holística es un objetivo central en la educación en ingeniería, ya que prepara a los estudiantes para resolver problemas reales más allá de los ejercicios de libro.

En términos pedagógicos, la estrategia de dividir el aprendizaje en cuatro etapas secuenciales resultó acertada. Durante la primera etapa, el aprendizaje activo mediante la exploración de componentes y realización de tareas de mantenimiento generó una base tangible sobre la cual los alumnos construyeron conocimientos más abstractos en etapas posteriores. Esto se alinea con teorías de aprendizaje experiencial, que postulan que la manipulación directa de los objetos de estudio facilita la formación de esquemas cognitivos más sólidos. La segunda etapa, con la animación del proceso interno, permitió a los estudiantes visualizar dinámicamente fenómenos que de otro modo serían invisibles (como la distribución del vapor y la acción de los controles automáticos). Esta visualización, soportada por datos en tiempo real, actuó como un puente entre la teoría termodinámica y la práctica clínica, confirmando la utilidad de las simulaciones interactivas vinculadas a procesos físicos reales.⁽³⁾ Por su parte, la inclusión de la tercera etapa relativa al tratamiento de agua añadió un componente interdisciplinario que enriquece la formación: típicamente, los planes de estudio pueden pasar por alto detalles sobre procesos externos que van de la mano de un equipo de esterilización, pero nuestra experiencia muestra que al enfatizar este aspecto, los estudiantes comprendieron mejor por qué una autoclave puede fallar por agua de mala calidad y cómo prevenirlo. Esto es de gran relevancia, ya que estudios señalan que la acumulación de minerales por agua dura es una de las causas comunes de averías en autoclaves hospitalarias.⁽⁴⁾ Así, exponer a los alumnos a la operación de un sistema de purificación real no solo refuerza conocimientos de bioingeniería, sino que fomenta una actitud proactiva de mantenimiento preventivo, valiosa en su futuro desempeño laboral.

La cuarta etapa de diagnóstico de fallas promovió el desarrollo de habilidades de pensamiento crítico y solución de problemas, competencias transversales en ingeniería. Al simular averías y guiar a los estudiantes en su resolución, se transitó de un aprendizaje pasivo a uno activo, donde el alumno debía aplicar conocimientos previos de forma integrada. La buena recepción de esta dinámica sugiere que incorporar escenarios de solución de problemas en la enseñanza de tecnología médica es altamente beneficioso. En concordancia, autores como Çengel et al.⁽⁵⁾ han destacado que el análisis de casos prácticos y la experimentación con “qué pasaría si...” fortalecen la comprensión de los principios de ingeniería térmica aplicados, en lugar de solo memorizar valores nominales. En nuestro caso, los estudiantes no solo identificaron correctamente componentes defectuosos en las simulaciones, sino que también discutieron en grupo las medidas para corregir los problemas. Este aspecto colaborativo y reflexivo es un indicador de aprendizaje profundo, ya que los participantes lograron articular y comunicar razonamientos técnicos, algo que difícilmente se logra con evaluaciones teóricas tradicionales.⁽⁶⁾

Otro punto a destacar en la discusión es la viabilidad y sostenibilidad de este tipo de proyecto. La transformación de un equipo obsoleto en un recurso educativo activo demuestra una estrategia eficiente de aprovechamiento de recursos institucionales. Con una inversión relativamente modesta (financiada en este caso por la universidad) en componentes electrónicos, sensores y materiales de reuso, se recuperó un dispositivo valioso para la docencia. Esto abre la puerta a que otras instituciones consideren implementar iniciativas similares, ya que muchas veces laboratorios universitarios cuentan con equipamiento fuera de servicio que podría adaptarse con fines académicos. Además, la implementación sobre plataformas abiertas (Raspberry Pi, Python/PyQt) facilita la reproducibilidad y futuras mejoras sin depender de tecnologías propietarias costosas. Desde el punto de vista de gestión académica, incorporar la autoclave educativa en la currícula práctica de la carrera puede mejorar significativamente las competencias de egreso

relacionadas con gestión de tecnología sanitaria. Los ingenieros biomédicos formados con este tipo de herramientas estarán mejor preparados para enfrentar desafíos reales en hospitales, como calibrar equipos, entrenar personal clínico en el uso correcto de dispositivos, o implementar planes de mantenimiento preventivo.⁽⁷⁾

Por último, es pertinente comparar brevemente nuestra propuesta con otras metodologías de enseñanza en ingeniería biomédica. En años recientes, se ha incrementado el uso de simuladores virtuales y laboratorios remotos para la enseñanza de dispositivos médicos. Si bien estas herramientas son valiosas para ampliar el acceso (por ejemplo, cuando no se dispone físicamente de un equipo), presentan limitaciones en cuanto a la experiencia sensorial y la interacción tangible con los sistemas. La autoclave educativa combina lo mejor de ambos mundos: es un sistema real, con todas las variables e impredecibilidades de un equipo físico, pero controlado de tal forma que brinda seguridad y un entorno de aprendizaje estructurado. Esta filosofía de “aprendizaje en entorno real” está alineada con las tendencias de educación STEM que promueven entornos de laboratorio más activos y participativos. Los resultados obtenidos apoyan la idea de que aprender haciendo (learning by doing) en el campo de la ingeniería biomédica aumenta la motivación del estudiante y la retención de conocimientos. Asimismo, la documentación generada (manual del usuario, guías de prácticas, base de datos de ciclos) queda como recurso permanente para las generaciones futuras, lo que garantiza un impacto duradero más allá del grupo piloto.⁽⁸⁾

Como limitación del estudio, se reconoce que la evaluación formal se realizó con un número reducido de estudiantes. Sería conveniente en trabajos futuros ampliar la muestra, para cuantificar con mayor rigor estadístico la diferencia en el aprendizaje. También se podrían explorar métricas adicionales, como seguimiento a mediano plazo de la retención de conocimientos o desempeño de los estudiantes en prácticas profesionales relacionadas. No obstante, incluso con las limitaciones mencionadas, los hallazgos actuales constituyen una evidencia positiva del beneficio educativo de la autoclave didáctica.⁽⁹⁾

CONCLUSIONES

Se implementó exitosamente una autoclave educativa que proporciona a los estudiantes de Ingeniería Biomédica una experiencia de aprendizaje práctica, segura e interactiva sobre los procesos de esterilización y mantenimiento de equipos médicos. El sistema desarrollado integra hardware reutilizado con tecnología moderna de control (Raspberry Pi, sensores, actuadores) y una interfaz gráfica intuitiva, logrando convertir un esterilizador convencional en una potente herramienta didáctica. La secuencia pedagógica estructurada en cuatro etapas permitió a los alumnos comprender progresivamente desde la identificación de componentes hasta la resolución de fallas, consolidando un conocimiento integral del funcionamiento de la autoclave y de su sistema auxiliar de tratamiento de agua.

Los resultados académicos asociados al uso de la herramienta fueron destacados: los participantes demostraron un incremento aproximado del 94 % en su rendimiento en evaluaciones de conocimientos, evidenciando la efectividad del enfoque práctico para reforzar conceptos teórico-prácticos. Asimismo, la experiencia elevó la motivación e interés de los estudiantes, quienes pudieron vincular los contenidos de clase con la realidad operativa de un equipo biomédico crítico. Se concluye que la incorporación de este tipo de plataformas didácticas en la formación de ingenieros biomédicos fortalece competencias esenciales, como el análisis de sistemas, el pensamiento crítico y las habilidades de mantenimiento preventivo, difícilmente alcanzables mediante métodos tradicionales exclusivamente teóricos.

En términos de ingeniería, el proyecto demostró la factibilidad de modernizar tecnológicamente equipamiento médico en desuso para fines educativos, cumpliendo con los estándares de funcionamiento sin comprometer la seguridad. El sistema logró mantener parámetros críticos de esterilización: temperatura $121^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$, presión manométrica $130\text{ kPa} \pm 7\text{ kPa}$ y un tiempo de exposición de 15 minutos lo cual fue validado en múltiples pruebas con indicadores químicos clase 4 que confirmaron la eficacia del proceso de esterilización. La autoclave Pelton & Crane modificada no solo recuperó su operatividad, sino que ahora sirve como banco de entrenamiento permanente en el laboratorio universitario. Este enfoque es replicable a otros dispositivos biomédicos, fomentando la innovación educativa, la sostenibilidad institucional y el fortalecimiento de competencias técnicas en la formación de ingenieros biomédicos.

Finalmente, se recomienda continuar con la evaluación y mejora de la herramienta: incorporar nuevas funcionalidades (por ejemplo, módulos de evaluación interactiva, más escenarios de fallas), así como integrar la autoclave didáctica de forma oficial en la malla curricular de la carrera. De igual manera, compartir esta experiencia en la comunidad académica puede incentivar la creación de una red de laboratorios didácticos en ingeniería biomédica a nivel nacional, elevando el nivel de preparación práctica de los futuros profesionales. En conclusión, el proyecto presentó un impacto positivo en la formación académica, demostrando que el aprendizaje basado en la práctica con equipamiento real, apoyado de interfaces modernas, es una vía eficaz para cerrar la brecha entre la teoría y la práctica en la ingeniería biomédica.

FINANCIACIÓN

Ninguna.

CONFLICTO DE INTERESES

Ninguno.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Conceptualización: Deybi Maldonado Lopez, Eynar Calle Viles, Elio Denis Machuca Flores, Rommer Alex Ortega-Martinez.

Redacción – borrador original: Deybi Maldonado Lopez, Eynar Calle Viles, Elio Denis Machuca Flores, Rommer Alex Ortega-

Martinez.

Redacción – revisión y edición: Deybi Maldonado Lopez, Eynar Calle Viles, Elio Denis Machuca Flores, Rommer Alex Ortega-Martinez.

REFERENCIAS

1. Muñoz EJ. ¿Cómo funciona una autoclave de vapor?. Equipamiento JM; 2023 Oct 24. Disponible en: <https://equipamientojm.com/todo-sobre-autoclaves/como-funciona-un-autoclave/>
2. Robilotti S, Couso A. Procesos de esterilización. En: Compendio de Ingeniería Biomédica. Codeinap; 2011. p. 45-60.
3. Garrido N. Manual básico del uso de autoclaves. Tuttnauer; 2015. Disponible en: <https://tuttnauer.com/blog/esterilizacion-por-autoclave/que-es-un-autoclave>
4. Interempresas. Tratamiento de agua para calderas. 2021. Disponible en: <https://www.interempresas.net/Agua/Articulos/356671-Tratamiento-de-agua-para-calderas.html>
5. Çengel YA, Boles MA. Thermodynamics: An Engineering Approach. 8ª ed. McGraw-Hill Education; 2015.
6. Acosta J, Andrade R. Manual de esterilización para centros de salud. Organización Panamericana de la Salud; 2008. Disponible en: <https://www.paho.org/es/documentos/manual-esterilizacion-para-centros-salud-2008>
7. European Committee for Standardization. EN 13060: Small steam sterilizers. Brussels, Belgium: CEN; 2004.
8. Lenntech. El agua en la central de esterilización. 2024. Disponible en: <https://www.lenntech.es/aplicaciones/ultrapura/conductividad/conductividad-agua.htm>
9. Silvestre C, Fagoaga L, Garciandía MJ, Lanzeta I, Mateo MC, Zapata MC. Esterilización. An Sist Sanit Navar. 2000;23:95-103.