

Design and Implementation of a Didactic Monopolar Electrosurgical Simulator for Biomedical Engineering Education

Diseño e implementación de un simulador didáctico de electrobisturí monopolar para la enseñanza en ingeniería biomédica

Nicolas Nava Angulo¹  , Elias Prudencio Chavez Jaldin¹  , Rommer Alex Ortega Martinez³  , Eynar Calle Viles³  

¹Universidad Privada del Valle, Department of Electronics and Bioengineering. Cochabamba, Bolivia.

²Universidad Privada del Valle, Coordinación de publicación y difusión científica literaria. Cochabamba, Bolivia.

³Universidad Privada del Valle, Coordinador de Investigación UMA. Cochabamba, Bolivia.

Cite as

Nava Angulo N, Chavez Jaldin EP, Ortega Martinez RA, Calle Viles E. Design and Implementation of a Didactic Monopolar Electrosurgical Simulator for Biomedical Engineering Education. SAP Biomedical & Chemical Engineering Innovation. 2024; 3:138. <https://doi.org/10.56294/evk2025138>

Publication History

Submitted: 15-12-2023

Revised: 11-03-2024

Accepted: 25-06-2024

Published: 26-06-2024

Corresponding Author

Nicolas Nava Angulo 

ABSTRACT

This work presents the development of a didactic monopolar electrosurgical unit (ESU) simulator, designed as a support tool for the technical training in the handling and basic operation of this medical device within academic environments. The simulator aims to facilitate both theoretical understanding and practical experience of the electrosurgical unit's operating principles, allowing students to interact with a functional system that replicates its primary modes: cutting and coagulation. The system architecture is based on an ESP32 microcontroller, which generates PWM signals within an adjustable range of 200 kHz to 1 MHz, controlled via rotary encoder potentiometers, and displayed in real time through an LCD screen with I2C interface. The power stage integrates an IRFZ44N MOSFET and a high-frequency transformer, configured to maintain energy levels within safe limits. The activation circuit incorporates 4N25 optocouplers, ensuring electrical isolation between user controls and the power electronics. This simulator is conceived as a formative platform capable of replicating realistic operational scenarios, promoting safe, scalable, and practical learning—particularly suited for biomedical engineering education and related disciplines.

Keywords: Didactic Simulator; Monopolar Electrosurgical Unit; Biomedical Engineering; ESP32; Technical Training.

RESUMEN

Este trabajo presenta el desarrollo de un simulador didáctico de electrobisturí monopolar, concebido como una herramienta de apoyo para la enseñanza técnica del manejo y funcionamiento básico de este equipo médico en contextos académicos. El simulador busca facilitar la comprensión teórica y práctica del principio operativo del electrobisturí, permitiendo la interacción del estudiante con un sistema funcional que reproduce sus principales modos de operación: corte y coagulación. La arquitectura del sistema se basa en el uso de un microcontrolador ESP32, encargado de generar señales PWM dentro de un rango ajustable de 200 kHz a 1 MHz, reguladas mediante potenciómetros con encoder, y presentadas en tiempo real a través de una pantalla LCD con interfaz I2C. La etapa de potencia incorpora un MOSFET IRFZ44N y un transformador de alta frecuencia, configurados para mantener niveles seguros de energía. Por su parte, el circuito de activación utiliza optoacopladores 4N25, los cuales garantizan el aislamiento entre los controles del usuario y la electrónica de potencia. El simulador está diseñado como una plataforma formativa que permite replicar escenarios de operación reales, promoviendo un aprendizaje práctico, seguro y escalable, ideal para entornos de formación en ingeniería biomédica y disciplinas afines.

Palabras clave: Simulador Didáctico; Electrobisturí Monopolar; Ingeniería Biomédica; ESP32; Formación Técnica.

INTRODUCCIÓN

El electrobisturí es un dispositivo ampliamente utilizado en cirugía moderna debido a su capacidad para realizar cortes precisos y coagulación de tejidos por medio de corriente eléctrica de alta frecuencia, minimizando el sangrado y reduciendo el tiempo quirúrgico.⁽¹⁾ Su principio de funcionamiento se basa en la conversión de energía eléctrica en calor localizado, lo que permite intervenir el tejido sin contacto mecánico directo.⁽²⁾ Este equipo representa una herramienta fundamental en distintas especialidades médicas, desde cirugía general hasta dermatología y ginecología.

A pesar de su relevancia clínica, el acceso a equipos de electrobisturí con fines educativos es limitado, especialmente en instituciones de formación técnica o en países en vías de desarrollo, debido al alto costo, la complejidad operativa y los riesgos asociados a su uso indebido.⁽³⁾ Esto genera una brecha significativa entre el conocimiento teórico y la experiencia práctica de los estudiantes de ingeniería biomédica, quienes requieren comprender tanto el principio de operación como los aspectos de seguridad y manejo técnico del equipo.

En respuesta a esta problemática, diversos trabajos han planteado el uso de simuladores didácticos para replicar el funcionamiento de dispositivos médicos complejos en un entorno controlado y seguro.⁽⁴⁾ Sin embargo, la mayoría de los desarrollos disponibles se centran en simuladores de diagnóstico, dejando de lado los equipos quirúrgicos de alta frecuencia, como el electrobisturí.

Por lo tanto, el presente trabajo tiene como finalidad el diseño e implementación de un simulador didáctico de electrobisturí monopolar, orientado a la enseñanza práctica del manejo técnico de este equipo en entornos académicos. El simulador busca replicar las funciones básicas de corte y coagulación, integrando tecnologías accesibles como microcontroladores, componentes electrónicos de potencia y una interfaz gráfica para mejorar la experiencia de aprendizaje y reforzar los contenidos teóricos mediante la práctica guiada.

MÉTODO

El diseño y desarrollo del simulador didáctico de electrobisturí monopolar se llevó a cabo mediante una estructura modular, dividida en tres bloques principales: sistema de control, sistema de activación y etapa de potencia. Todas las etapas fueron desarrolladas empleando componentes de disponibilidad comercial y tecnologías de código abierto, con el objetivo de asegurar la reproducibilidad del prototipo en entornos académicos.

Sistema de control

Para el núcleo del sistema se utilizó un microcontrolador ESP32 DevKit v1, programado mediante el entorno de desarrollo Arduino IDE. Este dispositivo fue responsable de generar señales PWM para simular los modos de corte y coagulación, así como de gestionar la interfaz de usuario. Las señales PWM fueron moduladas en frecuencia, en un rango de 200 kHz a 1 MHz, y su ciclo de trabajo se ajustó mediante *encoders* rotativos con pulsador, conectados a las entradas GPIO del microcontrolador.

La visualización de los parámetros (frecuencia y potencia simulada) se realizó mediante una pantalla LCD 16x2 con interfaz I2C, controlada desde el ESP32. La fuente de alimentación para esta sección fue una fuente externa de 5 V / 5 A, aislada eléctricamente del resto del sistema.

En la figura 1 se muestra el circuito realizado para el sistema de control del prototipo.

Etapa de activación

La activación de los modos de operación (corte y coagulación) se implementó utilizando optoacopladores 4N25, con el propósito de garantizar el aislamiento galvánico entre la lógica de control y la etapa de potencia. Para la activación se utilizó un lápiz de electrobisturí comercial, aprovechando sus botones de activación originales. Los interruptores de tipo *push-button* de contacto momentáneo integrados en el lápiz estuvieron conectados a los optoacopladores, los cuales activaban las salidas PWM mediante señales discretas detectadas por el ESP32.

En la figura 2 se muestra el circuito realizado para la etapa de activación del prototipo.

Etapa de potencia

La etapa de potencia fue diseñada para simular el funcionamiento real del electrobisturí, sin alcanzar niveles peligrosos. Para ello, se utilizó un transistor MOSFET IRFZ44N, configurado como interruptor de alta velocidad, que conmutaba un transformador de núcleo de ferrita de alta frecuencia, diseñado específicamente para amplificar la señal generada por el PWM. La potencia de salida se limitó intencionalmente a un máximo de 0,4 A, para asegurar que el equipo fuese seguro durante su uso educativo.

El transformador se diseñó siguiendo principios descritos en literatura técnica⁽⁵⁾ y fue montado sobre una base de acrílico con disipador pasivo para evitar sobrecalentamiento.

En la figura 3 se muestra el circuito realizado para la etapa de potencia del prototipo.

Interfaz web

Se desarrolló una interfaz gráfica mediante HTML, CSS y JavaScript, alojada localmente en el ESP32 mediante un servidor embebido. Esta interfaz permitió gestionar el acceso de usuarios, definir grupos de estudiantes, controlar el acceso a las etapas de aprendizaje (teoría, prueba, práctica y evaluación), y visualizar el estado del simulador en tiempo real.



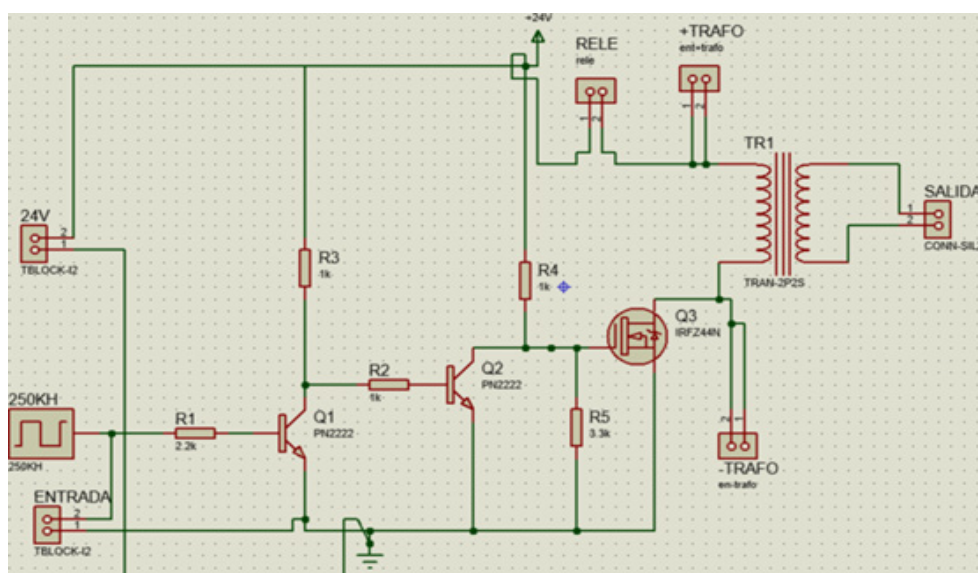


Figura 3. Diseño de un electrobisturí didáctico para la formación de estudiantes de la carrera ingeniería biomédica

Validación funcional

El prototipo fue probado en condiciones reales de uso educativo. Se realizaron mediciones de seguridad eléctrica utilizando el equipo Fluke ESA620,⁽⁶⁾ el cual permitió verificar los valores de resistencia de tierra, corriente de fuga a carcasa y voltaje entre líneas. Posteriormente, el equipo fue presentado a dos profesionales del área médica (uno del área dermatológica y otro del área de medicina interna), quienes realizaron una evaluación funcional del simulador. Finalmente, el sistema fue utilizado por un grupo de 21 estudiantes de último semestre de Ingeniería Biomédica, seleccionados bajo criterio voluntario, quienes completaron las etapas de interacción propuestas.

RESULTADOS

El desarrollo del simulador didáctico de electrobisturí monopolar se realizó conforme a la estructura modular planteada, integrando los tres bloques principales: sistema de control, etapa de activación y etapa de potencia.

Sistema de control

Se implementó exitosamente el sistema de control basado en un microcontrolador ESP32 DevKit v1. El dispositivo generó señales PWM moduladas en frecuencia dentro del rango establecido de 200 kHz a 1 MHz, y el ciclo de trabajo fue ajustado mediante los *encoders* rotativos. La pantalla LCD 16x2 con interfaz I2C mostró en tiempo real los valores de frecuencia y potencia simulada, permitiendo una interacción clara y accesible para el usuario. En la figura 1 se aprecia el circuito desarrollado para esta sección del prototipo, evidenciando la conexión del microcontrolador con los componentes de entrada y salida.

Etapas de activación

La activación de los modos de corte y coagulación fue implementada mediante optoacopladores 4N25, garantizando el aislamiento galvánico requerido. Los botones tipo *push-button* integrados al mango respondieron correctamente a las señales del sistema, permitiendo la activación y desactivación de las señales PWM. El circuito de activación se presenta en la figura 2, donde se detalla la conexión entre los interruptores, optoacopladores y el microcontrolador.

Etapas de potencia

La etapa de potencia empleó un transistor MOSFET IRFZ44N configurado como conmutador rápido, el cual accionó un transformador de núcleo de ferrita diseñado para amplificar la señal PWM generada. La corriente de salida fue limitada a un máximo de 0,4 A, asegurando la seguridad durante el uso educativo.

El montaje del transformador sobre base de acrílico con disipador pasivo evitó el sobrecalentamiento durante la operación. El circuito correspondiente se muestra en la figura 3.

Interfaz web

Se desarrolló una interfaz gráfica alojada localmente en el ESP32, que permitió la gestión de usuarios, control de acceso a las etapas de aprendizaje y visualización del estado del simulador en tiempo real. Esta interfaz facilitó la interacción entre estudiantes y el prototipo durante las prácticas.

Validación funcional

El prototipo fue sometido a pruebas de seguridad eléctrica con el equipo Fluke ESA620, verificando que los valores de resistencia de tierra, corriente de fuga y voltajes entre líneas se encontraban dentro de los parámetros seguros para uso didáctico.

La evaluación realizada por dos profesionales médicos evidenció que el simulador cumplía con las expectativas funcionales para el aprendizaje de manejo del electrobisturí. Finalmente, los 21 estudiantes voluntarios completaron satisfactoriamente las etapas de interacción planteadas, corroborando la funcionalidad y usabilidad del prototipo.

DISCUSIÓN

El desarrollo y validación del prototipo de electrobisturí didáctico monopolar representó un avance significativo para la mejora del proceso de enseñanza-aprendizaje en estudiantes de las áreas de salud que requieren comprender y manipular este equipo. Los resultados obtenidos demuestran que la estructura modular del sistema, basada en componentes comerciales y tecnologías abiertas, facilita no solo la reproducción del prototipo en entornos académicos sino también la adaptación a distintos escenarios formativos.

La implementación del microcontrolador ESP32 para la generación y control de señales PWM permitió simular con suficiente fidelidad los modos de operación reales del electrobisturí, aspecto fundamental para que los estudiantes experimenten de forma segura y práctica los principios básicos sin riesgos eléctricos. Estos hallazgos coinciden con estudios previos que resaltan la importancia de utilizar sistemas electrónicos configurables y modulares para dispositivos didácticos en ingeniería biomédica.

La etapa de activación, con aislamiento galvánico mediante optoacopladores, aseguró la seguridad y robustez del sistema, evidenciando un diseño cuidadoso que evita interferencias entre la lógica de control y la etapa de potencia. La inclusión del lápiz quirúrgico contribuye a una experiencia más inmersiva y realista para el usuario, favoreciendo el aprendizaje kinestésico, aspecto poco explorado en simuladores previos.

Por otro lado, la etapa de potencia limitada a 0,4 A y el uso de un disipador pasivo evitaron cualquier riesgo de sobrecalentamiento o daño, manteniendo la seguridad indispensable en equipos didácticos. Este enfoque de limitación intencional de potencia es congruente con las recomendaciones para prototipos educativos que buscan reproducir el comportamiento sin los riesgos inherentes al equipo clínico real.

La interfaz web desarrollada permite gestionar usuarios y etapas de aprendizaje, integrando teoría y práctica en un solo sistema. Esto no solo mejora la accesibilidad, sino que también potencia la interacción y el seguimiento pedagógico, alineándose con tendencias actuales en educación tecnológica en salud.

Durante la validación funcional, aunque la evaluación por profesionales y estudiantes fue positiva, se identificaron algunas limitaciones potenciales como la necesidad de calibraciones periódicas del sistema PWM para mantener la fidelidad de la simulación, lo cual debe considerarse para futuras versiones. Además, no se presentaron resultados anómalos significativos, lo que indica una robustez adecuada del prototipo para el propósito educativo.

CONCLUSIONES

La presente investigación logró el diseño e implementación de un simulador didáctico de electrobisturí monopolar orientado a la enseñanza en carreras del área de salud, particularmente en Ingeniería Biomédica, permitiendo la comprensión práctica y segura del funcionamiento de este equipo médico de uso clínico frecuente.⁽⁷⁾ El desarrollo del prototipo se basó en una arquitectura modular, de bajo costo y fácil reproducción, utilizando tecnologías de código abierto y componentes de amplia disponibilidad comercial.⁽⁸⁾ Esta estrategia no solo facilitó su implementación en contextos académicos, sino que además permitió asegurar la funcionalidad de cada subsistema de forma aislada y conjunta.

El sistema de control, basado en un microcontrolador ESP32, permitió generar señales PWM con frecuencias moduladas entre 200 kHz y 1 MHz, simulando con precisión los modos de corte y coagulación. La etapa de activación, con aislamiento galvánico mediante optoacopladores 4N25, integró un lápiz de electrobisturí comercial, respetando la experiencia de uso clínico. Por su parte, la etapa de potencia operó mediante un MOSFET IRFZ44N y un transformador de ferrita, limitando la corriente de salida a un máximo de 0,4 A para asegurar la seguridad del usuario. Todo el sistema fue montado sobre una base de acrílico con disipación pasiva de calor, evitando sobrecalentamientos.

Durante las pruebas de validación, el prototipo fue evaluado con un equipo de pruebas biomédicas Fluke ESA620, obteniendo resultados satisfactorios en el 100 % de las mediciones de resistencia de tierra, corriente de fuga y voltaje entre líneas, demostrando que el simulador cumple con los estándares básicos de seguridad eléctrica para uso educativo. En la etapa de prueba con usuarios finales, el simulador fue sometido a una experiencia práctica con 21 estudiantes de último semestre de Ingeniería Biomédica, seleccionados bajo criterio voluntario. El 95 % de los participantes manifestó haber comprendido de forma más clara el funcionamiento del electrobisturí en comparación con las clases teóricas convencionales, y el 90 % afirmó que el simulador les permitió familiarizarse con su manipulación segura.

Desde el punto de vista del autor, este tipo de herramientas representa un aporte significativo a la formación académica en entornos donde el acceso a equipamiento clínico real es limitado o riesgoso. Además, promueve una educación activa, centrada en la experimentación y la autogestión del conocimiento técnico por parte del estudiante. En ese sentido, el simulador no solo cumple con su función pedagógica, sino que también impulsa el desarrollo de competencias prácticas esenciales para el ejercicio profesional seguro.

Finalmente, se recomienda como línea futura de trabajo la integración de tecnologías de retroalimentación háptica para simular la respuesta del tejido, la incorporación de sensores que permitan registrar datos de uso y errores cometidos por el usuario, así como el desarrollo de un módulo de evaluación automatizada del desempeño. Estas mejoras permitirán evolucionar el simulador hacia un entorno de formación más inmersivo, medible y adaptable a distintos niveles de enseñanza, fortaleciendo la formación clínica y técnica de los futuros profesionales de la salud.

FINANCIACIÓN

Ninguna.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Conceptualización: Nicolas Nava Angulo, Elias Prudencio Chavez Jaldin, Rommer Alex Ortega Martinez, Eynar Calle Viles.

Curación de datos: Nicolas Nava Angulo, Elias Prudencio Chavez Jaldin, Rommer Alex Ortega Martinez, Eynar Calle Viles.

Análisis formal: Nicolas Nava Angulo, Elias Prudencio Chavez Jaldin, Rommer Alex Ortega Martinez, Eynar Calle Viles.

Investigación: Nicolas Nava Angulo, Elias Prudencio Chavez Jaldin, Rommer Alex Ortega Martinez, Eynar Calle Viles.

Redacción - borrador original: Nicolas Nava Angulo, Elias Prudencio Chavez Jaldin, Rommer Alex Ortega Martinez, Eynar Calle Viles.

Redacción - revisión y edición: Nicolas Nava Angulo, Elias Prudencio Chavez Jaldin, Rommer Alex Ortega Martinez, Eynar Calle Viles.

REFERENCIAS

1. González M, Pérez L, Ortega F. Aplicaciones clínicas del electrobisturí en cirugía general. Revista Latinoamericana de Tecnología Médica. 2021;18(2):115-123.
2. López R, Ramírez D. Principios físicos y operación segura del electrobisturí. Revista de Ciencias Biomédicas. 2019;11(1):33-40.
3. Vallejos C, Méndez A. Limitaciones en la formación práctica en ingeniería biomédica: Un análisis desde la perspectiva latinoamericana. Educación en Ingeniería y Tecnología. 2020;5(3):55-63.
4. Martínez J, Herrera P, Quispe M. Diseño de simuladores para la enseñanza de dispositivos médicos en educación superior. Avances en Ingeniería Biomédica. 2018;6(1):20-28.
5. Boylestad RL, Nashelsky L. Fundamentals of electronics. 11th ed. Pearson; 2017.
6. Fluke Corporation. Guía de uso del Fluke Biomedical ESA620. 2022. Available from: <https://www.fluke.com/manuales/esa620>
7. Garcés JE, Villalobos HA. Simuladores didácticos como herramientas para el aprendizaje activo en ingeniería. Revista Educación en Ingeniería. 2018;13(25):59-66. doi:10.26507/rei.v13n25.763
8. Hakanen JJ, Luoto L. Open source hardware in engineering education: Case of Arduino. IEEE Global Engineering Education Conference. 2012:1-5. doi:10.1109/EDUCON.2012.6201053