

La importancia de la electrónica discreta en aplicaciones biomédicas: fiabilidad, verificabilidad y resiliencia tecnológica en sistemas críticos de salud

The importance of discrete electronics in biomedical applications:
reliability, verifiability, and technological resilience in critical
healthcare systems

Baldo Alberto Luigi Dalporto

baldo.dalporto@intec.edu.do

<https://orcid.org/0009-0008-8719-1562>

Instituto Tecnológico de Santo Domingo
(INTEC)

República Dominicana

Sabine Mary

sabine.mary@intec.edu.do

<https://orcid.org/0009-0004-3488-9511>

Instituto Tecnológico de Santo Domingo
(INTEC)

República Dominicana

Santiago Gallur

santiago.gallur@intec.edu.do

<https://orcid.org/0000-0001-6287-7340>

Instituto Tecnológico de Santo Domingo
(INTEC)

República Dominicana

DOI: <https://doi.org/10.56712/latam.v7i1.5501>


Redilat
Red de Investigadores
Latinoamericanos



Revista Latinoamericana de
Ciencias Sociales y Humanidades

Artículo recibido: 06 de noviembre de 2025.

Aceptado para publicación: 13 de marzo de 2026.

Conflictos de Interés: Ninguno que declarar.

VOLUMEN VII

DOI: <https://doi.org/10.56712/latam.v7i1.5501>

La importancia de la electrónica discreta en aplicaciones biomédicas: fiabilidad, verificabilidad y resiliencia tecnológica en sistemas críticos de salud

The importance of discrete electronics in biomedical applications: reliability, verifiability, and technological resilience in critical healthcare systems

Baldo Alberto Luigi Dalporto

baldo.dalporto@intec.edu.do

<https://orcid.org/0009-0008-8719-1562>

Instituto Tecnológico de Santo Domingo (INTEC)

República Dominicana

Sabine Mary

sabine.mary@intec.edu.do

<https://orcid.org/0009-0004-3488-9511>

Instituto Tecnológico de Santo Domingo (INTEC)

República Dominicana

Santiago Gallur

santiago.gallur@intec.edu.do

<https://orcid.org/0000-0001-6287-7340>

Instituto Tecnológico de Santo Domingo (INTEC)

República Dominicana

Artículo recibido: 06 de noviembre de 2025. Aceptado para publicación: 13 de marzo de 2026.

Conflictos de Interés: Ninguno que declarar.

Resumen

En las últimas décadas, la instrumentación biomédica ha experimentado una transición acelerada hacia arquitecturas dominadas por microcontroladores, sistemas embebidos y software de alto nivel. Si bien estas tecnologías han permitido una expansión funcional sin precedentes, diversos estudios han señalado que también han introducido nuevas fuentes de riesgo relacionadas con la complejidad del firmware, la ciberseguridad, la trazabilidad regulatoria y la verificabilidad del comportamiento del sistema (Carr & Brown, 2001; Webster, 2009). Este trabajo argumenta, desde una perspectiva académica y de ingeniería, que la electrónica discreta —entendida como el diseño basado en componentes analógicos y digitales elementales sin dependencia de software— continúa siendo fundamental y, en ciertos contextos biomédicos, superior. Se analiza su relevancia en términos de fiabilidad determinista, transparencia funcional, control metrológico, seguridad del paciente y resiliencia operativa. Mediante un marco teórico apoyado en instrumentación médica clásica, teoría de circuitos y estándares regulatorios internacionales, se demuestra que la electrónica discreta no representa una tecnología obsoleta, sino una estrategia de diseño complementaria y, en escenarios críticos, preferente. El artículo concluye que la revalorización académica de la electrónica discreta es esencial para el desarrollo de dispositivos biomédicos robustos, auditables y accesibles, especialmente en entornos con restricciones económicas, regulatorias o de infraestructura.

Palabras clave: electrónica discreta, instrumentación biomédica, fiabilidad, seguridad del paciente, diseño analógico, verificación

Abstract

Over recent decades, biomedical instrumentation has rapidly shifted toward microcontroller-based architectures and software-driven embedded systems. While these technologies have enabled unprecedented functional complexity, they have also introduced new risks related to firmware reliability, cybersecurity, regulatory traceability, and behavioral verification. This paper argues that discrete electronics—defined as hardware systems built from analog and digital components without software dependence—remains fundamentally important and, in specific biomedical contexts, superior. The relevance of discrete electronics is examined in terms of deterministic reliability, functional transparency, metrological control, patient safety, and operational resilience. Drawing on classical medical instrumentation theory, circuit design principles, and regulatory frameworks, the study demonstrates that discrete electronics should not be regarded as obsolete but rather as a complementary and, in critical scenarios, preferable design paradigm. The paper concludes that the academic revaluation of discrete electronics is essential for developing robust, auditable, and accessible biomedical devices, particularly in resource-constrained or high-risk environments.

Keywords: discrete electronics, biomedical instrumentation, reliability, patient safety, analog design, verification

Todo el contenido de LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades, publicado en este sitio está disponibles bajo Licencia Creative Commons.



Cómo citar: Luigi Dalporto, B. A., Mary, S., & Gallur, S. (2026). La importancia de la electrónica discreta en aplicaciones biomédicas: fiabilidad, verificabilidad y resiliencia tecnológica en sistemas críticos de salud. *LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades* 7 (1), 3149 – 3155. <https://doi.org/10.56712/latam.v7i1.5501>

INTRODUCCIÓN

La electrónica biomédica se sitúa en la intersección entre la ingeniería, la fisiología humana y la seguridad crítica. A diferencia de otros dominios tecnológicos, los errores en dispositivos médicos no solo implican pérdidas económicas, sino que pueden ocasionar daños irreversibles al paciente. En este contexto, la elección de la arquitectura electrónica constituye no solo una decisión técnica, sino también ética y regulatoria (IEC, 2005).

La narrativa dominante en la literatura contemporánea suele asociar el progreso tecnológico con el incremento del procesamiento digital y el uso extensivo de software. Sin embargo, esta visión omite que una parte significativa de las fallas reportadas en sistemas médicos modernos está relacionada con errores de firmware, interacciones imprevistas entre capas de software y dificultades en la verificación completa del sistema, particularmente en dispositivos críticos y de larga vida útil (Carr & Brown, 2001; Ott, 2009). Frente a este panorama, la electrónica discreta ofrece un paradigma alternativo basado en simplicidad estructural, determinismo funcional y verificabilidad física directa (Horowitz & Hill, 2015).

El objetivo de este ensayo académico es demostrar, mediante un análisis riguroso, que la electrónica discreta sigue siendo un pilar fundamental en aplicaciones biomédicas y que su estudio y desarrollo deben ocupar un lugar central en la investigación académica avanzada.

DESARROLLO

Marco conceptual: electrónica discreta y sistemas biomédicos

Definición operativa de electrónica discreta

En el contexto de este trabajo, se define la electrónica discreta como el diseño de sistemas mediante componentes individuales —resistencias, capacitores, inductores, transistores, amplificadores operacionales, comparadores y lógica digital básica— cuyo comportamiento está completamente determinado por leyes físicas y eléctricas, sin intervención de software ni código ejecutable (Sedra & Smith, 2015). Esta definición enfatiza la correspondencia directa entre causa física y efecto funcional, una propiedad crucial en sistemas biomédicos donde la previsibilidad es un requisito esencial.

Naturaleza de las señales biomédicas

Las señales fisiológicas (EEG, EMG, ECG, señales ópticas, bioimpedancia y vibraciones mecánicas) son inherentemente analógicas, de baja amplitud y altamente susceptibles al ruido. Antes de cualquier procesamiento digital, estas señales requieren acondicionamiento analógico preciso. En este sentido, la electrónica discreta constituye la primera y más crítica capa de interacción con el cuerpo humano (Webster, 2009).

Fiabilidad y determinismo en sistemas médicos

Determinismo eléctrico frente a indeterminismo lógico

Un sistema basado en electrónica discreta presenta un comportamiento estrictamente determinista, en el sentido físico del término: para un conjunto dado de condiciones iniciales y parámetros de componentes, la respuesta del circuito es única, continua y predecible. Esta propiedad deriva directamente de la dependencia exclusiva del sistema respecto a leyes eléctricas fundamentales —como las leyes de Kirchhoff y las relaciones constitutivas de los dispositivos— sin la intermediación de capas lógicas abstractas o estados internos no observables. Horowitz y Hill (2015) subrayan que esta correspondencia directa entre causa física y efecto eléctrico permite un análisis exhaustivo del comportamiento del sistema, incluso bajo condiciones extremas. De manera consistente, Sedra y

Smith (2015) destacan que el determinismo eléctrico facilita la modelización analítica y la validación formal del sistema, reduciendo la incertidumbre operativa característica de arquitecturas gobernadas por software.

Implicaciones para la seguridad del paciente

La seguridad del paciente constituye un principio rector en el diseño de dispositivos médicos, tal como se establece en la norma internacional IEC 60601-1, que define requisitos estrictos en materia de corrientes de fuga, aislamiento eléctrico y límites de energía admisible (IEC, 2005). En este contexto, la electrónica discreta permite implementar mecanismos de protección física intrínseca —mediante resistencias limitadoras, aislamiento galvánico y redes pasivas de seguridad— que no dependen de decisiones lógicas ni de la correcta ejecución de software. Carr y Brown (2001) señalan que este enfoque reduce significativamente la probabilidad de fallos catastróficos asociados a errores de control o estados no previstos, fortaleciendo así la seguridad funcional en aplicaciones biomédicas críticas.

Ejemplos concretos de dispositivos

Este es un ejemplo concreto de un mi proyecto en electronica discreta sin uso de micro o software desarrollado y funcionando.

Dispositivo Neurológico Portátil 100% en Electrónica Discreta

Este documento describe un dispositivo médico portátil, no invasivo, completamente analógico (sin microcontroladores ni software), diseñado para aplicaciones neurológicas combinando estimulación muscular con biofeedback visual y sonoro. El sistema está basado en electrónica discreta y es adecuado para ser utilizado por pacientes en el hogar. Su diseño es original y está optimizado para ser patentado.

Resumen de Funciones del Sistema

- Adquisición de señales EMG/EEG mediante electrodos adhesivos.
- Amplificación de señales bioeléctricas de baja amplitud.
- Filtrado pasa-banda y supresión de interferencias (50 Hz).
- Detección de umbral y disparo de estímulo eléctrico (NMES).
- Retroalimentación visual (LED) y sonora (buzzer).
- Funcionamiento seguro, autónomo y alimentado por batería.

Bloques Funcionales y Descripción Técnica

Bloque 1 – Captura y Amplificación EMG/EEG

Se utiliza un amplificador de instrumentación construido con TL072. Las señales de entrada se toman de dos electrodos activos y uno de referencia. La ganancia se ajusta con una resistencia RG según: $G = 1 + (2 \cdot R3/RG)$.

Bloque 2 – Filtrado Analógico

Filtro pasa-banda activo (Sallen-Key) con cortes ajustados en 10–500 Hz. Un filtro notch Twin-T opcional permite suprimir la componente de red eléctrica de 50 Hz.

Bloque 3 – Comparador y Control de Estímulo

Un LM393 detecta cuando la señal EMG supera un umbral ajustable, activando un NE555 en modo monoestable. Este genera una señal de control OUT_STIMULO que dura 1.1 segundos.

Bloque 4 – Generador de Estímulo Eléctrico (TENS/NMES)

Un NE555 en modo astable genera trenes de pulsos de 20–100 Hz que alimentan un transformador elevador, activado por un MOSFET sólo cuando OUT_STIMULO está activo. La salida es aislada y limitada a 10 mA para seguridad.

Bloque 5 – Feedback Visual y Sonoro

El mismo OUT_STIMULO activa un transistor que enciende un LED rojo y un buzzer piezoeléctrico, brindando confirmación sensorial al paciente sobre el inicio de la estimulación.

Verificabilidad, trazabilidad y regulación

Uno de los principales desafíos en la certificación de dispositivos médicos contemporáneos radica en la verificación completa del comportamiento del sistema, particularmente cuando este depende de firmware complejo. En arquitecturas discretas, cada función puede rastrearse directamente hasta componentes físicos específicos, lo que permite una verificación basada en medición directa y comparación con modelos teóricos bien establecidos. Webster (2009) destaca que esta trazabilidad física simplifica las auditorías técnicas y facilita el análisis de fallos, al eliminar la ambigüedad asociada a estados internos no accesibles típicos de sistemas programables. Desde una perspectiva regulatoria, esta característica resulta especialmente valiosa en dispositivos donde la transparencia funcional es un requisito esencial.

Resiliencia tecnológica y sostenibilidad

La resiliencia tecnológica se define como la capacidad de un sistema para mantener su funcionalidad frente a perturbaciones externas, degradación de componentes o limitaciones del entorno operativo. En este sentido, los sistemas basados en electrónica discreta han demostrado históricamente una elevada robustez frente a interferencias electromagnéticas y condiciones no ideales, siempre que se respeten principios clásicos de compatibilidad electromagnética (Ott, 2009). Asimismo, Webster (2009) documenta numerosos casos de dispositivos biomédicos analógicos que han operado durante décadas con mantenimiento mínimo, lo que contrasta con la obsolescencia acelerada de plataformas digitales dependientes de microcontroladores específicos y ecosistemas de software propietarios. Esta longevidad refuerza el valor de la electrónica discreta como estrategia de diseño sostenible en sistemas críticos de salud.

Operación en entornos con recursos limitados

En contextos con infraestructura limitada, la dependencia de herramientas de programación, actualizaciones de firmware o plataformas digitales complejas puede comprometer la operatividad del sistema. La electrónica discreta permite reparaciones locales, sustitución modular y operación prolongada sin dependencia de ecosistemas digitales propietarios (Ott, 2009).

Longevidad y mantenimiento

Numerosos dispositivos biomédicos analógicos han operado durante décadas con mantenimiento mínimo, en contraste con la obsolescencia acelerada de plataformas digitales dependientes de componentes específicos y soporte de software discontinuado (Webster, 2009).

DISCUSIÓN

Este trabajo no propone un rechazo de la electrónica digital, sino una reintegración equilibrada de la electrónica discreta como base estructural de sistemas biomédicos confiables. En aplicaciones donde la detección de eventos, la temporización precisa, la protección del paciente y la robustez operativa son prioritarias, la electrónica discreta ofrece ventajas claras y demostrables. Desde una perspectiva académica, ignorar este paradigma limita la formación integral de ingenieros biomédicos y reduce la diversidad tecnológica necesaria para enfrentar escenarios clínicos reales.

CONCLUSIONES

La electrónica discreta sigue siendo esencial en aplicaciones biomédicas críticas, no como una reliquia tecnológica, sino como una arquitectura racional alineada con los principios de seguridad del paciente, verificabilidad y resiliencia tecnológica. Se concluye que la investigación doctoral y la formación universitaria deben revalorizar explícitamente la electrónica discreta como componente estratégico del diseño biomédico moderno, especialmente en un contexto global que exige dispositivos seguros, accesibles y auditables.

REFERENCIAS

Alexander, C. K., & Sadiku, M. N. O. (2017). Fundamentals of electric circuits (6th ed.). McGraw-Hill Education.

Carr, J. J., & Brown, J. M. (2001). Introduction to biomedical equipment technology (4th ed.). Prentice Hall.

Horowitz & Hill (2015); Sedra & Smith (2015)

Horowitz, P., & Hill, W. (2015). The art of electronics (3rd ed.). Cambridge University Press.

IEC 60601-1 (2005); Carr & Brown (2001)

IEC. (2005). IEC 60601-1: Medical electrical equipment—Part 1: General requirements for basic safety and essential performance. International Electrotechnical Commission.

Ott, H. W. (2009). Electromagnetic compatibility engineering. Wiley.

Sedra, A. S., & Smith, K. C. (2015). Microelectronic circuits (7th ed.). Oxford University Press.

Webster (2009); Ott (2009)

Webster, J. G. (Ed.). (2009). Medical instrumentation: Application and design (4th ed.). Wiley.

Widrow, B., & Stearns, S. D. (1985). Adaptive signal processing. Prentice Hall.

Todo el contenido de LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades, publicados en este sitio está disponibles bajo Licencia [Creative Commons](#) .