90 IPN ANIVERSARIO

30 ANIVERSARIO UPIITA

Memoria del

1er. COLOQUIO INTERNACIONAL

Saberes integrales en el mundo contemporáneo

24, 25 y 26 de noviembre de 2026



Educación
Secretaría de Educación Pública

Instituto Politécnico Nacional
"La Técnica al Servicio de la Patria"

DE LA BIOINSTRUMENTACIÓN AL MODELADO COMPUTACIONAL: UNA VISIÓN INTEGRAL DE LA INGENIERÍA BIOMÉDICA

Arturo Vera-Hernández[1] · José Javier Reyes-Lagos[1] · Rafael Bayareh-Mancilla[2]

[1] Sección de Bioelectrónica, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Cinvestav-IPN

[2] Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas, IPN

arvera@cinvestav.mx · javier.reyes@cinvestav.mx · rbayarehm@ipn.mx

RESUMEN

La ingeniería biomédica reúne conocimientos de diferentes disciplinas para estudiar fenómenos que no siempre pueden comprenderse mediante una sola medición. En este artículo reflexionamos sobre la relación entre bioinstrumentación, modelado computacional y experimentación, a partir de experiencias con tecnologías que utilizan ultrasonido y radiaciones electromagnéticas. Nos interesa discutir qué decisiones deben tomarse antes de diseñar un dispositivo, qué información aporta una medición y cuáles son las limitaciones de una representación computacional. El calentamiento de tejidos permite ilustrar la importancia de considerar sus características físicas y biológicas y de comparar las simulaciones con observaciones experimentales. También retomamos el análisis de la variabilidad de la frecuencia cardiaca como ejemplo de cómo una señal puede generar preguntas sobre la regulación nerviosa y la respuesta inmunitaria. Con estos casos buscamos mostrar por qué la ingeniería biomédica requiere integrar conocimientos, revisar las interpretaciones y considerar las condiciones en que una tecnología podría utilizarse en el área de la salud.

Palabras clave: Bioinstrumentación; modelado computacional; interdisciplinariedad; pensamiento sistémico; ingeniería biomédica.

ABSTRACT

Biomedical engineering brings together knowledge from different fields to study phenomena that cannot always be understood through a single measurement. In this article, we reflect on the relationship between bioinstrumentation, computational modeling, and experimentation, drawing on work involving ultrasound and electromagnetic radiation. We discuss the decisions made before designing a device, what a measurement can tell us, and the limits of computational representations. Tissue heating illustrates why the physical and biological characteristics of tissues matter and why simulations must be compared with experimental observations. We also consider heart rate variability as an example of how a physiological signal can raise questions about nervous regulation and immune responses. These cases highlight the need to connect knowledge from different disciplines, review the interpretations of results, and consider the conditions in which a biomedical technology might be used.

Keywords: Bioinstrumentation; computational modeling; interdisciplinarity; systems thinking; biomedical engineering.

Introducción

En ingeniería biomédica podemos encontrar proyectos muy distintos: equipos para diagnóstico, sistemas de rehabilitación, dispositivos de tratamiento o programas que ayudan a estudiar una señal fisiológica. A primera vista, parece que cada uno pertenece a un campo diferente. Sin embargo, cuando revisamos cómo se desarrolla una de estas tecnologías, encontramos decisiones semejantes. Antes de elegir componentes o escribir un programa, es necesario comprender qué fenómeno queremos estudiar y qué información permitiría responder nuestra pregunta.

Pensemos en un sistema que utiliza energía para modificar la temperatura de un tejido. Podemos controlar su funcionamiento, conocer la potencia suministrada y obtener una gráfica de la temperatura registrada. Eso no significa que sepamos exactamente qué sucede dentro del cuerpo. La distribución del calor depende de las características de los tejidos y de las condiciones en que se aplica. Si pasamos por alto esas diferencias, un instrumento que funciona correctamente podría llevarnos a una interpretación incompleta.

A partir de experiencias relacionadas con ultrasonido, radiaciones electromagnéticas, bioinstrumentación y modelado computacional, nos interesa discutir cómo se construyen las explicaciones en ingeniería biomédica. Incorporamos también un ejemplo de análisis de señales cardiacas para mostrar que una medición puede llevarnos a estudiar la participación de varios sistemas del organismo. No presentamos un nuevo dispositivo ni una comparación de resultados experimentales. El propósito es reflexionar sobre lo que aporta cada disciplina y sobre las decisiones que debemos tomar para que una tecnología tenga sentido en un problema de salud.

Comprender el problema antes de diseñar la solución

Una de las dificultades de trabajar en ingeniería biomédica es que el problema rara vez pertenece a una sola especialidad. Para diseñar un sistema terapéutico basado en energía necesitamos conocimientos de física y electrónica, pero también debemos saber qué estructuras biológicas estarán involucradas y qué respuesta se espera producir. La pregunta médica ayuda a establecer qué sería útil estudiar; la ingeniería permite pensar cómo hacerlo. Si alguna de estas partes se considera hasta el final, es posible que el proyecto avance mucho sin haber resuelto lo más importante.

Hay momentos en los que pensamos en la colaboración interdisciplinaria como la suma de tareas independientes: una persona diseña el circuito, otra hace la simulación y otra interpreta los resultados. Esa organización puede hacer el trabajo más fácil, pero no garantiza que haya una explicación compartida. El modelo puede cambiar por un cambio en las características del tejido; una limitación de la medición nos puede obligar a modificar la pregunta original. Por eso, la comunicación entre los especialistas debe ser continua durante todo el proceso y no solo cuando se presente el resultado final (National Academy of Sciences et al., 2005).

Bioinstrumentación: decidir qué necesitamos medir

En un ejercicio de laboratorio normalmente empezamos identificando qué sensor vamos a utilizar y cómo vamos a obtener los datos. En un problema biomédico es conveniente invertir por un momento ese orden. Lo primero que hemos de concretar es qué necesitamos saber, por qué esa variable es relevante y en qué circunstancias podremos medirla. Luego podremos debatir si el instrumento escogido es suficiente. La calidad de una medición depende de su precisión, pero también de la relación que tiene con el fenómeno que tratamos de explicar.

El caso de la hipertermia es ilustrativo de esta situación. Su principio general es subir de forma controlada la temperatura de una región del organismo con fines terapéuticos. Parece una idea sencilla hasta que pensamos que la energía no está repartida de forma idéntica en todos los tejidos. Varían sus propiedades, sus dimensiones y su disposición anatómica. Por eso, saber cómo opera la máquina no es igual que conocer la temperatura que alcanza cada zona. El diseño debe basarse en información procedente de diversos campos.

Los estudios realizados con tecnologías ultrasónicas y electromagnéticas han puesto de relieve la importancia de relacionar el comportamiento físico de la energía con sus posibles efectos biológicos. Por ejemplo, Vera Hernández y colaboradores (2001) se ocuparon de los fundamentos físicos y biológicos de la hipertermia electromagnética. Lo que nos importa aquí no es tanto el funcionamiento de estos sistemas sino recuperar una enseñanza de ese tipo de trabajo: la elección de un instrumento depende de lo que se quiere conocer del tejido, no sólo de las características que ofrece el equipo.

El modelo computacional y sus límites

Otra forma de acercarnos a estos problemas la brinda el modelado computacional. Si no podemos medir una condición directamente o es difícil reproducirla en laboratorio, podemos construir una representación para poder estudiar diferentes escenarios. En ella se pueden modificar parámetros, observar tendencias y comparar alternativas, antes de fabricar un prototipo. Esta ventaja explica por qué los modelos se han convertido en una práctica habitual en el desarrollo de tecnología médica. Permite también trabajar con preguntas que de otra manera requerirían muchos ensayos.

Pero un modelo no contiene toda la realidad. Para desarrollarlo elegimos propiedades, definimos condiciones y excluimos ciertos detalles. Esas decisiones son necesarias, aunque a veces no se perciban cuando sólo se mira la imagen final de una simulación. Una distribución de temperatura puede verse ordenada y convincente, pero su interpretación varía si el tejido

representado no se corresponde con las condiciones que queremos estudiar. Según Epstein (2008) los modelos no sólo sirven para predecir, sino que también cumplen otras funciones como explorar y comprender.

La necesidad de revisar esos supuestos resulta especialmente clara en proyectos relacionados con transferencia de calor. Si representamos el cuerpo con capas de espesores uniformes, simplificamos el problema y podemos estudiar su comportamiento inicial. Pero los seres humanos no tienen una anatomía idéntica. Bayareh-Mancilla y colaboradores (2026) estudiaron, en un trabajo sobre termoterapia superficial, cómo la diferencia en el espesor del tejido adiposo modifica la transferencia de calor. En este ejemplo, una condición que es de segundo orden en la simulación se vuelve importante cuando se piensa en la aplicación real.

Así pues, una parte esencial del modelado consiste en preguntarnos qué tan apropiada es la representación para el problema que hayamos escogido. Si varíamos una propiedad del tejido, ¿queda establecida la tendencia observada? Si la medición experimental no coincide con la simulación, ¿qué condiciones necesitamos controlar? La comparación no sirve sólo para decidir qué resultado es el correcto. También puede ayudar a identificar aspectos del fenómeno que aún no entendemos o que no estamos midiendo como esperamos.

Por eso consideramos que la simulación y la experimentación deben acompañarse. El modelo permite explorar condiciones que sería complicado estudiar una por una; la medición proporciona información para revisar la representación y reconocer sus límites. A veces será necesario modificar el instrumento y, en otras ocasiones, replantear los supuestos del modelo. La relación entre ambas herramientas se vuelve más útil cuando quienes conocen el problema fisiológico participan también en la interpretación de lo obtenido.

El organismo no responde por partes

La necesidad de relacionar distintos conocimientos no aparece solamente cuando aplicamos energía a un tejido. También se presenta al estudiar las señales que produce el organismo. El electrocardiograma, por ejemplo, permite registrar la actividad eléctrica cardiaca. Si identificamos los latidos y medimos el tiempo que transcurre entre ellos, observamos diferencias que pueden estudiarse mediante la variabilidad de la frecuencia cardiaca. El procedimiento parte de una señal conocida, pero la interpretación de sus cambios requiere considerar procesos fisiológicos más amplios.

La actividad del corazón está regulada, entre otros mecanismos, por el sistema nervioso autónomo. Por ello, algunas variaciones de su ritmo pueden relacionarse con cambios en las condiciones del organismo. Reyes-Lagos y colaboradores (2016) estudiaron las fluctuaciones cardiacas en un modelo experimental de inflamación y analizaron el efecto de la oxitocina. El interés de este ejemplo no está en explicar el procesamiento de la señal, sino en observar cómo una pregunta sobre el ritmo cardiaco puede conducir al estudio de la regulación nerviosa y de la respuesta inmunitaria.

Al mismo tiempo, conviene ser cuidadosos con las interpretaciones. Encontrar una asociación entre una característica de la señal y un proceso fisiológico no significa que esa característica permita reconocer por sí sola una enfermedad. La observación necesita compararse con otras mediciones y con lo que se conoce del fenómeno. Es una situación parecida a la que encontramos en los modelos de tejidos: la herramienta ofrece información útil, pero no reemplaza el análisis de las condiciones en que esa información fue obtenida.

Aprender a trabajar entre disciplinas

En la formación de estudiantes de ingeniería es común organizar los conocimientos por asignaturas. Aprendemos electrónica, programación, matemáticas y procesamiento de señales en momentos diferentes, con problemas que suelen estar bien delimitados. Esta organización permite construir bases sólidas. La dificultad aparece cuando debemos trabajar con una situación real y descubrimos que no existe una única materia que nos indique cómo resolverla. En ese momento necesitamos recuperar lo aprendido y decidir qué conocimientos son pertinentes para el problema.

Un proyecto de bioinstrumentación puede ser un buen ámbito para realizar ese ejercicio. Antes de armar un circuito, el estudiante debería explicar qué variable quiere medir y qué interpretación se puede hacer con la misma. Se propone una simulación, es conveniente que identifique las condiciones que decidió simplificar y cómo podría contrastar lo obtenido. Estas preguntas son de la misma importancia que comprobar que el equipo funciona o que el programa entrega una gráfica.

Permiten valorar el razonamiento que subyace a las decisiones técnicas.

También conviene revisar la innovación desde este ángulo. A veces relacionamos una propuesta innovadora con la introducción de sensores de última generación, software más complejo o un dispositivo que ofrezca varias funciones. No obstante, si se ha identificado correctamente una necesidad, puede que una solución sencilla sea la más apropiada. En salud, además, debemos considerar quién va a utilizar la tecnología, en qué condiciones y las consecuencias que podría tener una interpretación errónea de los datos. No se puede separar por completo la utilidad del contexto.

Conclusiones

La bioinstrumentación y el modelado computacional brindan la posibilidad de abordar el estudio de los fenómenos biológicos desde puntos de vista complementarios entre sí. Un instrumento mide algunas manifestaciones del organismo; un modelo ayuda a representar su comportamiento bajo condiciones definidas. Ninguna de estas herramientas, por sí sola, ofrece una explicación completa. Su utilidad depende de la pregunta inicial, de los supuestos que adoptemos y de cómo confrontemos la información obtenida.

Nos interesa que esta forma de trabajo también tenga un lugar en la formación de ingenieros. Aprender a construir equipos y utilizar herramientas computacionales es indispensable, pero resulta igualmente importante saber qué esperamos conocer con ellas, cuándo necesitamos consultar a otros especialistas y qué límites tienen nuestras conclusiones. Desde esa perspectiva, una visión integral de la ingeniería biomédica comienza en la manera de plantear las preguntas y continúa durante el diseño, la medición y la interpretación.

Referencias y recursos electrónicos

Bayareh-Mancilla, R., Ramírez-Guzmán, T. J., Munguía-Fuentes, R., Anzueto-Ríos, Á., Vera-Hernández, A., & Trujillo-Romero, C. J. (2026). Anatomical asymmetry in adipose tissue thickness alters heat transfer during superficial thermotherapy: A computational and experimental study. Symmetry, 18(9), 1531. https://doi.org/10.3390/sym18091531

Epstein, J. M. (2008). Why model? Journal of Artificial Societies and Social Simulation, 11(4), 12. https://www.jasss.org/11/4/12.html

National Academy of Sciences, National Academy of Engineering, & Institute of Medicine. (2005). Facilitating interdisciplinary research. The National Academies Press. https://doi.org/10.17226/11153

Reyes-Lagos, J. J., Hadamitzky, M., Peña-Castillo, M. Á., Echeverría, J. C., Bösche, K., Lückemann, L., Schedlowski, M., & Pacheco-López, G. (2016). Exogenous oxytocin reduces signs of sickness behavior and modifies heart rate fluctuations of endotoxemic rats. Physiology & Behavior, 165, 223–230. https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2016.07.013

Vera Hernández, A., Chong Quero, J. E., Leija Salas, L., Hernández Mier, Y., & Marchal, C. (2001). Hipertermia electromagnética, una alternativa para el tratamiento del cáncer: antecedentes, aspectos físicos y biológicos. Revista Mexicana de Ingeniería Biomédica, 22(2), 78–88.