

Avance y Perspectiva

Revista de divulgación del CINVESTAV

La travesía interdisciplinaria de los osciladores: desde la navegación transatlántica hasta la neurofisiología

Karina Galache · Tuesday, October 31st, 2023

Categorías: [Ciencias Exactas](#), [Zona Abierta](#)

En este artículo se explora cómo los osciladores han impactado el avance de la ciencia y la tecnología a lo largo de la historia. Tanto los osciladores mecánicos como los electromagnéticos, junto con los modelos matemáticos que los describen, han jugado un rol importante en varios campos, como la navegación, las comunicaciones y el estudio de la neurofisiología. Se destacan contribuciones clave en la ciencia de los osciladores que han dejado una influencia duradera en otras áreas, y se resalta la influencia de figuras como John Harrison, James C. Maxwell, Heinrich Hertz, Balthasar van der Pol, Alan Hodgkin y Andrew Huxley. Se analiza cómo los osciladores han conectado disciplinas tan diferentes como las telecomunicaciones y la neurofisiología, y se expone cómo siguen siendo esenciales en la investigación actual y en la creación de enfoques interdisciplinarios avanzados.

Introducción

En el campo de la física hay conceptos que han impactado significativamente el avance de la ciencia y la tecnología. Algunos ejemplos son el gas ideal y la radiación de cuerpo negro. Sin embargo, el oscilador armónico destaca como uno de los conceptos más profundos y versátiles.

En la búsqueda constante por entender y controlar el mundo que nos rodea, pocos temas ha trascendido de una forma tan amplia y diversa como el estudio de las oscilaciones. Desde la maquinaria de los relojes, hasta las variaciones cíclicas de diversas variables fisiológicas, el mundo de los osciladores ha influenciado campos tan diversos como la navegación, las comunicaciones y la biología. A lo largo de los años, la curiosidad por entender los osciladores y la habilidad para controlarlos han llevado a avances que van más allá de las fronteras entre disciplinas, contribuyendo tanto a descubrimientos científicos como a aplicaciones tecnológicas innovadoras. En este artículo, exploramos la historia emocionante de los osciladores, examinando su papel fundamental en nuestro entendimiento del mundo y su capacidad para impulsar cambios que han transformado nuestra realidad de maneras que antes eran impensables.

El problema de la longitud y el desarrollo de los relojes

A partir del año 200 a.C., aproximadamente, la Ruta de la Seda conectaba a China y el Mediterráneo, entretejiendo una compleja red de rutas comerciales. Esto permitía que bienes e

ideas viajaran entre continentes. Sin embargo, en 1453, la caída de Constantinopla cambió las cosas. Los viajes por mar en dirección a Asia se volvieron más difíciles y costosos para los europeos. Para enfrentar este problema, algunos exploradores comenzaron a buscar rutas marítimas más directas. Esto llevó a acontecimientos históricos como el famoso viaje de Cristóbal Colón en 1492 hacia América. También a la travesía de Vasco da Gama en 1498, que rodeó África para llegar a la India, y al viaje de circunnavegación dirigido primero por Fernando de Magallanes y al final completado por Juan Sebastián de Elcano en 1522 (Parry, 1992). Estos viajes marcaron el inicio de la Era de los Descubrimientos, que transformó el comercio, la cultura y la política en todo el mundo.

Las contribuciones de los eruditos islámicos durante la Edad de Oro del Islam en disciplinas como matemáticas, astronomía, medicina y geografía, tuvieron un gran peso en los logros que caracterizaron la Era de los Descubrimientos (Hodgson, 1977). Estos académicos llevaron a cabo la importante labor de traducir y preservar obras provenientes de las épocas griega y romana, lo que dejó una influencia duradera en los intelectuales del Renacimiento. Dado que la navegación previa al siglo XVIII dependía en gran medida de observaciones celestiales, las contribuciones en los campos de la astronomía y las matemáticas se erigieron como cimientos esenciales. Sin embargo, el desafío de medir con precisión la longitud, conocido como el “problema de la longitud”, representaba una tarea extremadamente difícil debido a la complejidad inherente a la medición de esta coordenada mediante enfoques astronómicos.

Establecer la longitud era esencial para asegurar una navegación segura, especialmente durante viajes largos. Las embarcaciones capaces de calcular su ubicación con exactitud enfrentaban menos riesgos de quedar varadas, chocar o perderse en alta mar. Esto no sólo preservaba las vidas de los marineros, sino que también salvaguardaba la valiosa carga, reduciendo las pérdidas para los propietarios de barcos y los comerciantes. Además, una navegación eficiente acortaba los tiempos de viaje, permitiendo que las embarcaciones realizaran más travesías y mejoraran su rentabilidad. Con el fin de impulsar progresos en esta área crucial, el gobierno británico introdujo en 1714 el Premio de la Longitud, también conocido como la Ley de la Longitud. Este concurso tenía el propósito de estimular la creación de un método confiable y viable para determinar la longitud en el mar (Sobel, 2007).

John Harrison, un relojero británico, se enfrentó exitosamente al desafío de determinar la longitud. Comprendió la importancia esencial de medir el tiempo de manera precisa para resolver este problema. En lugar de depender de observaciones astronómicas, planteó que un reloj elaborado con minuciosidad podría permitir a los marineros registrar la hora en una ubicación de referencia y luego compararla con la hora local. Al cotejar estas dos horas, sería posible calcular la diferencia en horas, minutos y segundos, lo que se convertiría en un indicador confiable de la longitud.



John Harrison

Harrison nació en 1693 en Yorkshire, Inglaterra. Desde una edad temprana, demostró un talento excepcional en la carpintería y la relojería. En la década de 1720, se mudó a Londres y comenzó a crear relojes innovadores, entre ellos relojes de pie con mecanismos novedosos. Interesado en el Premio de la Longitud, se dedicó a diseñar un cronómetro marino capaz de mantener su precisión incluso en las difíciles condiciones de los viajes a través de los océanos.

Siguiendo los pasos de científicos y relojeros como Christiaan Huygens, Harrison elaboró una serie de cronómetros marinos. El primero, llamado H1, fue terminado en 1735. Presentaba innovaciones como un mecanismo de escape novedoso y una lámina bimetálica que permitía la compensación de temperatura. A pesar de esto, los desafíos que surgieron durante su uso en el mar resaltaron la necesidad de realizar más ajustes y mejoras en el diseño.

En las décadas posteriores, Harrison continuó mejorando sus diseños y construyó los modelos H2, H3 y, finalmente, el H4. Este último, finalizado en 1759, destacaba como un instrumento compacto y de alto rendimiento que respondía plenamente a las demandas de la navegación en el mar. Sometido a pruebas rigurosas en condiciones marítimas, logró mantener la hora con un margen de error mínimo de apenas unos segundos al día, lo que permitía el cálculo de la longitud con una precisión de aproximadamente medio grado.

A pesar de que en un principio la Junta de la Longitud no le otorgó plenamente el premio, los cronómetros de Harrison revolucionaron la navegación, posibilitando grandes expediciones. En esencia, su ingenioso método para resolver el problema de la longitud se basaba en un oscilador mecánico auto sostenible, en el que la energía disipada por la fricción se reponía de manera constante. Esto permitía medir el tiempo con precisión, incluso en condiciones extremas. Estos relojes náuticos impulsaron los avances en la astronomía, la navegación y otros campos durante la era científica moderna. Las contribuciones de Harrison reflejan los valores de dominio de la naturaleza, propios de la Ilustración, a través de la tecnología y el progreso científico.

La revolución eléctrica: osciladores y comunicación inalámbrica

Los cronómetros basados en osciladores mecánicos marcaron un cambio fundamental en la navegación y la cartografía durante el siglo XVIII. Sin embargo, el surgimiento de la era dorada de la electricidad en el siglo XIX trajo consigo un nuevo paradigma. Los científicos descubrieron que las ondas electromagnéticas, generadas por oscilaciones eléctricas constantes, podían transmitir datos a largas distancias. En consecuencia, las comunicaciones modernas se apoyan en oscilaciones eléctricas en lugar de mecánicas.

Los fundamentos para entender los fenómenos de oscilación eléctrica se establecieron en los siglos XVIII y XIX, gracias a experimentos innovadores en el ámbito de la electricidad y el magnetismo. En 1820, Hans Christian Ørsted demostró que una corriente eléctrica podía originar un campo magnético, lo que representó un hallazgo crucial. Siguiendo esta línea, Michael Faraday logró establecer una conexión cuantitativa entre las fuerzas eléctricas y magnéticas. Luego, en 1873, James Clerk Maxwell unificó estas y otras teorías originalmente inconexas, en una publicación considerada como uno de los pilares de la física contemporánea (Maxwell, 2011a, b).

Maxwell sintetizó las teorías eléctricas y magnéticas en un conjunto de cuatro ecuaciones que describían sus interrelaciones. Un resultado clave de estas ecuaciones fue que los campos eléctricos y magnéticos podían propagarse por el espacio en forma de ondas electromagnéticas. Además, Maxwell reveló que la luz en realidad era una forma de onda electromagnética de alta frecuencia. A pesar de la controversia inicial que rodeó este descubrimiento, tuvo un impacto significativo en la ciencia, generando progresos en áreas como las telecomunicaciones, la astronomía y la física moderna (teoría de la relatividad y mecánica cuántica).

Aunque las ecuaciones de Maxwell indicaban que las ondas electromagnéticas podían moverse por el espacio vacío, generarlas era un gran reto. En 1887, Heinrich Hertz logró producir ondas

electromagnéticas de alta frecuencia por primera vez en un experimento innovador. Este descubrimiento ejerció una influencia profunda en la ciencia, pues allanó el camino para el desarrollo de la radio, la televisión y otras tecnologías inalámbricas.

En su laboratorio, Hertz logró generar y captar las escurridizas ondas electromagnéticas predichas por las ecuaciones de Maxwell. Para ello, diseñó un oscilador eléctrico conectado a una antena dipolo. Mediante la aplicación de voltajes elevados, las oscilaciones en el circuito generaban oscilaciones en la antena, produciendo radiación electromagnética. Para detectar estas ondas, Hertz utilizó otra antena de bucle enlazada a un circuito resonante. Cuando se ubicaba en el trayecto de la radiación, el bucle receptor experimentaba oscilaciones, proporcionando una evidencia experimental de la propagación de las ondas electromagnéticas.

El experimento de Hertz confirmó definitivamente la existencia de las ondas electromagnéticas, validando así las teorías de Maxwell. Además, Hertz examinó las propiedades de estas ondas, como la polarización, reflexión, refracción e interferencia. Sus hallazgos demostraron que estas propiedades eran similares a las de la luz visible, lo que fortaleció la idea de que la luz es un tipo de radiación electromagnética.

Los experimentos de Hertz mostraron que las oscilaciones eléctricas podrían emplearse para crear y recibir señales inalámbricas. Sin embargo, el dispositivo de Hertz tenía limitaciones. Aunque resultaba adecuado para experimentos de laboratorio, se necesitarían osciladores más potentes y eficientes para aplicaciones prácticas como la radio.

Los primeros transmisores de radio utilizaban detectores de minerales rudimentarios y generadores ineficaces de chispas para generar radiación electromagnética. La creación de oscilaciones eléctricas estables y de alta frecuencia fue fundamental para viabilizar las radiocomunicaciones. Esto involucraba ciertas analogías con osciladores mecánicos, como los empleados en los cronómetros. Un circuito resonante LC podría experimentar oscilaciones, pero las pérdidas debidas a la resistencia atenuarían estas oscilaciones con el tiempo. Para mantener oscilaciones continuas, se debía suministrar energía de manera constante al sistema, al igual que se da cuerda al resorte impulsor de un cronómetro.

En un oscilador electrónico se utilizan elementos amplificadores para reponer la energía disipada en el circuito resonante. Esta “resistencia negativa” compensa exactamente las pérdidas, permitiendo así oscilaciones persistentes de alta frecuencia. Al mantener el equilibrio energético en un sistema eléctrico armónico, los osciladores electrónicos allanaron el camino para la comunicación inalámbrica moderna.

Las similitudes entre los osciladores mecánicos y eléctricos subrayan la coherencia de los conceptos físicos a través de diferentes áreas. Ya sea ajustando el mecanismo de escape de un reloj o equilibrando amplificadores y elementos disipativos en un transmisor de radio, la meta de mantener la oscilación a pesar de las pérdidas unificó estos esfuerzos. Impulsada por los osciladores electrónicos, la tecnología de radio revolucionaría profundamente la sociedad en el siglo XX (Clarke, 2011).

Osciladores en la neurofisiología: modelando el potencial de acción

La transmisión de señales en nervios y músculos depende de la propagación de impulsos eléctricos conocidos como potenciales de acción. Comprender la dinámica no lineal que subyace a la excitación en neuronas y células cardíacas exige la integración de conceptos de física, matemáticas

y biología. Nuevamente, los modelos de osciladores aportarían ideas cruciales, esta vez al simular los picos y ritmos generados por las células biológicas.



Balthasar van der Pol, 1939.

Balthasar van der Pol, físico holandés, se unió a los Laboratorios de Investigación Philips después de obtener su doctorado en 1913. Durante su tiempo allí, contribuyó significativamente al campo de la electrónica, especialmente en la tecnología de la radio. Van der Pol desempeñó un papel clave en el desarrollo del receptor de radio Philips, que experimentó un éxito considerable en esa época. Según uno de sus biógrafos, “La radio podría haber quedado como un área de empirismo y aventuras comerciales desenfrenadas de no ser por la influencia de personas como van der Pol, quienes resaltaron la necesidad de un enfoque más científico” (Bremmer *et al.*, 1960, Introducción).

En 1926, van der Pol formuló una ecuación diferencial no lineal para describir el comportamiento de osciladores eléctricos construidos con tubos de vacío, que se utilizaban en las radios primitivas. Al analizar su modelo, hizo un descubrimiento intrigante. Cuando el valor de un parámetro llamado coeficiente de amortiguamiento era pequeño, el sistema exhibía las características típicas de un oscilador armónico. Sin embargo, conforme el coeficiente de amortiguamiento aumentaba, las soluciones del modelo se alejaban del comportamiento convencional de los osciladores armónicos. En lugar de seguir oscilaciones sinusoidales periódicas, las soluciones del modelo mostraban períodos alternados de cambios rápidos y lentos. Van der Pol acuñó el término “oscilaciones de relajación” para describir esta conducta (van der Pol, 1926).

El comportamiento de picos de relajación del oscilador de van der Pol guardaba similitudes con los potenciales de acción que se transmiten a lo largo de las neuronas y las células del marcapasos cardíaco. Tomando esto como base, van der Pol desarrolló un circuito que constaba de tres osciladores para emular el comportamiento eléctrico del corazón. Mediante este enfoque, logró reproducir exitosamente arritmias cardíacas específicas, demostrando así la capacidad del modelo para capturar la compleja dinámica de la actividad eléctrica cardíaca (van der Pol y van der Mark, 1928).

En paralelo a los esfuerzos de modelado de osciladores, los avances tecnológicos abrieron la puerta a mediciones directas de las señales eléctricas neuronales. Un hito fundamental fue el desarrollo de los amplificadores operacionales a principios de la década de 1940. Con ellos se podían tener altas ganancias en la amplificación de señales eléctricas, así como realizar operaciones matemáticas como suma, resta, integración y diferenciación. Esto revolucionó el procesamiento y análisis de señales. En 1949, Kenneth Cole y Howard Curtis idearon la técnica de fijación de voltaje, que empleaba un circuito de retroalimentación basado en amplificadores operacionales, para controlar el voltaje a través de la membrana celular (Brown, 2020). Esto permitió por primera vez la medición precisa de las corrientes iónicas en membranas celulares.

Contribuciones significativas en termodinámica y química física de figuras como Max Planck y Walther Nernst también contribuyeron al entendimiento del comportamiento eléctrico de las

membranas biológicas. El trabajo de Nernst culminó en su ecuación homónima en 1889, que establece la relación entre el potencial de equilibrio de un ion y su gradiente de concentración. Las ecuaciones de Nernst-Planck, por su parte, ampliaron la descripción de la difusión para abarcar los efectos electrostáticos del movimiento de partículas cargadas.

Otro hito crucial fue la elección de Cole del axón gigante del calamar como modelo para estudiar las propiedades eléctricas de las membranas en 1936. Las dimensiones y el amplio lumen del axón de calamar lo convertían en un modelo más adecuado para técnicas experimentales como la medición de voltajes intracelulares, que eran prácticamente imposibles con axones de menor tamaño.

Mientras colaboraba con Cole en la década de 1930, Hodgkin se dio cuenta de la viabilidad de emplear el axón gigante de calamar para registrar potenciales de acción intracelulares. Al regresar a Cambridge en 1938, reclutó al estudiante de pregrado Andrew Huxley. La sólida formación en física y matemáticas de Huxley se combinó con la experiencia de Hodgkin en neurofisiología. Su proyecto conjunto dio como resultado una serie de artículos que aportaron ideas cuantitativas fundamentales acerca de las bases biofísicas del potencial de acción (Brown, 2020).

El último artículo de la serie elaborada por Hodgkin y Huxley sentó las bases de la biofísica cuantitativa de las membranas, fusionando el modelado matemático con observaciones empíricas. Mediante ecuaciones diferenciales acopladas y cálculos minuciosos, Hodgkin y Huxley construyeron un modelo que concordaba con los datos obtenidos mediante la técnica de fijación de voltaje. A pesar de no contar con las computadoras de hoy en día, Huxley logró una precisión destacable utilizando una calculadora de escritorio y aplicando un enfoque riguroso. Esto les permitió entender los mecanismos iónicos responsables de la iniciación y conducción del potencial de acción.

El modelo Hodgkin-Huxley representó un hito en las neurociencias, proporcionando la primera representación cuantitativa y mecanicista de la excitabilidad neuronal. Su enfoque integrador, que fusionó matemáticas y biología, arrojó luz sobre la función de los canales iónicos y catalizó áreas emergentes como la neurociencia computacional. Este logro emergió de una colaboración interdisciplinaria, ya que expertos en física, matemáticas y fisiología se unieron con el objetivo compartido de comprender el potencial de acción. La colaboración entre Hodgkin y Huxley destaca el poderío de conectar distintas disciplinas científicas para impulsar nuevos descubrimientos.

Aunque innovador, el modelo Hodgkin-Huxley presentó desafíos debido a su complejidad en una época anterior a las computadoras digitales. En la década de 1960, Richard FitzHugh en los NIH exploró las propiedades matemáticas del modelo utilizando métodos de dinámica no lineal. Para resolver las ecuaciones con diferentes parámetros, FitzHugh colaboró con John Moore para construir una computadora analógica a partir de amplificadores operacionales, multiplicadores y trazadores (Izhikevich y FitzHugh, 2006). Aunque esta herramienta les permitió visualizar gráficamente las soluciones, operar el simulador analógico requería habilidades avanzadas en ingeniería y matemáticas. La complejidad del modelo y la carencia de computación digital motivaron esfuerzos para desarrollar modelos simplificados de la excitación neuronal.

Siguiendo las ideas de Cole, FitzHugh ajustó las ecuaciones del oscilador de relajación de van der Pol para destacar los elementos clave del modelo de Hodgkin-Huxley. Su intención era separar la dinámica del flujo de iones de sodio y potasio a través de la membrana del proceso regenerativo de excitación. Inicialmente conocidas como las ecuaciones de Bonhoeffer-van der Pol, posteriormente

pasaron a llamarse ecuaciones de FitzHugh-Nagumo porque, en ese mismo período, el ingeniero japonés Jin-Ichi Nagumo desarrolló un circuito electrónico con diodos túnel que emulaba la no linealidad cúbica del modelo. El modelo simplificado de FitzHugh-Nagumo brindó una manera más asequible de abordar el complejo sistema de Hodgkin-Huxley. Al reconfigurar la computadora analógica para resolver estas ecuaciones simplificadas, se habilitó un análisis matemático más extenso de la dinámica de excitación neural.

La búsqueda para entender las bases eléctricas de la señalización neural ejemplifica el poder de la colaboración interdisciplinaria. La fusión de modelos de osciladores de la física y la ingeniería con enfoques emergentes para explorar los impulsos nerviosos resultó en conceptos fundamentales sobre los mecanismos de excitación neuronal. La creación de analogías efectivas entre osciladores biológicos y artificiales generó representaciones matemáticas asequibles que capturaban la esencia de la dinámica de los potenciales de acción. Al derribar las barreras entre la física, las matemáticas y la fisiología, científicos como Hodgkin, Huxley y FitzHugh transformaron la comprensión de los procesos fundamentales que subyacen al pensamiento mismo.

Conclusiones

La historia de los osciladores nos revela la intrincada interacción entre la ciencia y la tecnología. Motivados por necesidades prácticas, los avances en la medición del tiempo desencadenaron transformaciones en la navegación. Esta búsqueda también condujo a descubrimientos más fundamentales.

De manera similar, los osciladores electrónicos resultaron esenciales para impulsar los sistemas de comunicación inalámbrica que revolucionaron la sociedad. Cuando se modelaron matemáticamente, también arrojaron luz sobre los ritmos eléctricos del sistema nervioso. Una y otra vez, la manipulación de sistemas oscilatorios con propósitos ingenieriles involuntariamente profundizó nuestro conocimiento científico, trascendiendo las fronteras disciplinarias.

La influencia perdurable del oscilador radica en su versatilidad como sistema modelo. El concepto de movimiento armónico simple brinda una descripción aproximada de una sorprendente variedad de sistemas, tanto físicos como biológicos e ingenieriles. Esta afinidad entre diferentes dominios permite analogías profundas que estimulan el proceso de descubrimiento.

Si se trata de ajustar mecanismos de escape, optimizar amplificadores o simular potenciales de acción, los investigadores han encontrado patrones comunes que pueden expresarse en términos matemáticos. La ciencia de los osciladores ha prosperado mediante la fusión de ideas provenientes de distintos campos. Pioneros con orígenes diversos colaboraron para traducir conceptos entre disciplinas, erigiendo puentes que conectaban territorios inesperados pero fértiles.

Al rastrear el camino de las oscilaciones a lo largo de los siglos, podemos contemplar la evolución misma de la ciencia. Aunque la curiosidad guía la exploración en campos especializados, es la síntesis la que da vida a las ideas más profundas. El recorrido de los osciladores arroja luz sobre cómo el esfuerzo humano colaborativo para comprender los ritmos naturales, sin importar su procedencia, nos impulsa hacia una comprensión más profunda de la naturaleza y contribuye a dar forma a nuestra civilización.

Referencias

Baigrie B (2006) Electricity and magnetism. Greenwood Guides to Great Ideas in Science, Greenwood Press, Westport, CT

Bremmer H, Bouwkamp C, Pol, van der B (eds) (1960) Selected scientific papers Balthasar van der Pol. North-Holland Publishing Company, Netherlands

Brown A (2020) A companion guide to the Hodgkin-Huxley papers A companion guide to the Hodgkin-Huxley papers. Physiological Society

Clarke AC (2011) How the world was one. Hachette UK

Hodgson MGS (1977) The venture of Islam: The classical age of Islam v.1. University of Chicago Press, Chicago, IL

Izhikevich E, FitzHugh R (2006) FitzHugh-nagumo model. Scholarpedia 1(9):1349, DOI 10.4249/scholarpedia.1349, URL <https://doi.org/10.4249/scholarpedia.1349>

Maxwell J (2011a) A Cambridge library collection – physical sciences A treatise on electricity and magnetism: Volume 1. Cambridge University Press, Cambridge, England

Maxwell J (2011b) A Cambridge library collection – physical sciences A treatise on electricity and magnetism: Volume 2. Cambridge University Press, Cambridge, England

Parry JH (1992) The discovery of the sea. University of California Press, Berkeley, CA

van der Pol B (1926) LXXXVIII. on “relaxation-oscillations”. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science 2(11):978–992, DOI 10.1080/14786442608564127

van der Pol B, van der Mark J (1928) LXXII. the heartbeat considered as a relaxation oscillation, and an electrical model of the heart. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science 6(38):763–775, DOI 10.1080/14786441108564652

Shamos MH (1987) Great Experiments in Physics. Dover Publications, Mineola, NY

Sobel D (2007) Longitude. Walker, New York, NY

Foto de portada: Tima Miroshnichenko en Pexels.

This entry was posted on Tuesday, October 31st, 2023 at 11:55 pm and is filed under [Ciencias Exactas](#), [Zona Abierta](#)

You can follow any responses to this entry through the [Comments \(RSS\)](#) feed. Both comments and pings are currently closed.

