

Laboratorio remoto para inducción electromagnética basado en un dispositivo de medición industrial

Remote laboratory for electromagnetic induction based on an industrial measurement device

Raúl E. Romero^{1*}, Sebastián A. Villar^{1,2}, Bettina Bravo^{1,2}

¹ Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires. Av. del Valle 5737, (B7400JWI) Olavarría. Argentina.

² Núcleo INTELYMEC, CIFICEN (UNCPBA, CICPBA, CONICET), Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires. Av. del Valle 5737. (B7400JWI) Olavarría. Argentina.

*E-mail: rromero@fio.unicen.edu.ar

Resumen

En este trabajo se presentan características generales de la construcción y aplicación de un laboratorio remoto para inducción electromagnética. El diseño se basa en una problemática habitual de la industria, la detección de fallas en dispositivos metálicos rotantes. Cuenta con elementos mecánicos, un sensor magnético de proximidad experimental, un sistema de adquisición de datos y una interfaz de usuario. El registro de la señal de salida del sensor permite el análisis e interpretación de diferentes fenómenos eléctricos o mecánicos. El sistema mecánico a analizar y el dispositivo de medición se integran en un único experimento, lo que permite construir actividades de enseñanza que van desde el análisis de los fenómenos físicos intervinientes hasta el análisis de la señal eléctrica del sensor y su relación con el sistema mecánico.

Palabras clave: Laboratorios remotos; Inducción electromagnética; Dispositivos de medición; Sensores magnéticos; Enseñanza de la física.

Abstract

This paper presents general characteristics of the construction and application of a remote laboratory whose main theme is electromagnetic induction. The design is based on a common problem in the industry, the detection of failures in rolling metal devices. It features mechanical elements, an experimental magnetic proximity sensor, a data acquisition system, and a user interface. The recording of the sensor output signal allows the analysis and interpretation of different electrical and/or mechanical phenomena. The mechanical system to be analyzed and the measurement device are integrated into a single experiment, which allows the construction of different activities ranging from the analysis of the physical phenomena involved to the analysis of the electrical signal of the sensor and its relationship with the analyzed mechanical system.

Keywords: Remote laboratory; Electromagnetic induction; Measurement device; Magnetic sensor; Physics teaching.

I. INTRODUCCIÓN

La enseñanza de la física se sitúa en la vanguardia de las disciplinas que aprovechan al máximo las posibilidades tecnológicas para promover la comprensión de conceptos, leyes y teorías, así como para desarrollar habilidades relacionadas con la experimentación, la resolución de problemas, el trabajo en equipo y la comunicación efectiva, entre otras.

En los últimos años, las tecnologías de la información y la comunicación (TIC) han introducido nuevos contextos de aprendizaje que demandan la exploración de enfoques pedagógicos innovadores, entre los cuales destacan los laboratorios remotos (LR). Estos LR pueden entenderse como entornos o plataformas de aprendizaje que integran elementos físicos reales, como materiales experimentales, actuadores, sensores, motores, instrumentos de medición, sistemas de adquisición de datos y cámaras de video, con sistemas informáticos que engloban interfaces de usuario, servicios y bases de datos. En esencia, los LR brindan una experiencia experimental similar a la de un laboratorio tradicional, aunque a distancia. Esto implica que se trabaja con actividades experimentales genuinas, con la incertidumbre inherente a los procesos de medición (Arguedas-Matarrita y Concari, 2018).

Una de las ventajas más significativas de los LR radica en su capacidad para llevar a cabo actividades experimentales con instrumental real sin requerir que los usuarios se encuentren físicamente en el mismo lugar que los equipos experimentales. Esto no solo permite experimentar con materiales y equipos de medición reales, incluso aquellos que son peligrosos o delicados, sino que también amplía el tiempo de experimentación disponible en comparación con los laboratorios tradicionales.

A pesar de los avances logrados en los últimos años en la promoción del uso masivo de los LR, acelerado por la pandemia covid-19 que confinó la educación a un ámbito totalmente virtual, aún queda mucho por desarrollar y optimizar en relación con los recursos actualmente disponibles. Al respecto, se reconoce la necesidad e importancia de diseñar LR especialmente concebidos para enriquecer el aprendizaje de la física aprovechando al máximo su potencial educativo, y que sean de acceso libre y gratuito a fin de optimizar su uso por grandes poblaciones de estudiantes y docente y en distintos contextos educativos.

II. EL FENÓMENO DE INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA EN LA ENSEÑANZA DE LA FÍSICA

La inducción electromagnética (IE) es un fenómeno central en la interpretación y vinculación de principios fundamentales de la electricidad y el magnetismo, en tanto permite comprender cómo se generan las corrientes eléctricas inducidas en circuitos eléctricos. A su vez la IE es la base de numerosas tecnologías y dispositivos utilizados en nuestra vida cotidiana, desde transformadores eléctricos hasta generadores y motores eléctricos, pasando por tecnologías de carga inalámbrica y comunicaciones, sensores, antenas, transmisores y receptores, es decir, tecnologías ampliamente utilizadas no solo a nivel industrial sino también en el ámbito cotidiano.

Temáticas como esta, que admiten relacionar de forma inmediata ciencia y tecnología, tienen un potencial didáctico invaluable, ya que se establece una relación directa entre los conceptos teóricos y su aplicación práctica lo que promueve una comprensión más profunda de los saberes científico – tecnológicos. A su vez permite el planteo de un enfoque educativo centrado en problemas relevantes para estudiantes de ciclo básico de carreras científico – tecnológicas y, con ello, motivar el aprendizaje de la física y favorecer el desarrollo de habilidades inherentes a la resolución de problemas.

Identificada la importancia de abordar esta temática, es relevante destacar una problemática directamente vinculada a la enseñanza, la cual se relaciona con las dificultades para llevar a cabo prácticas de laboratorio que permitan a los estudiantes estudiar el fenómeno de la IE de manera empírica, realizando mediciones que conduzcan al reconcomiendo de las variables involucradas, y de las relaciones que se establecen entre ellas. La complejidad de realizar estas prácticas radica principalmente en la disponibilidad de materiales e instrumentos de medición necesarios para lograr los objetivos planteados. Lamentablemente, estos recursos no siempre están disponibles en los laboratorios destinados a fines educativos.

La situación descrita, y el reconocimiento de que las actividades experimentales son una instancia didáctica con gran potencial para favorecer el aprendizaje de la física, desde el "Centro de Innovación Tecnológica para la Educación Científica y Tecnológica: CENEX" de la Facultad de Ingeniería de Olavarría (FIO) al que pertenecen los autores de este trabajo, se vienen desarrollado diversos recursos tecnológicos, entre ellos, un LR diseñado para propiciar la comprensión del fenómeno de IE en el ciclo básico de carreras de ingeniería pero que puede extenderse sin dificultad a otras disciplinas o áreas de conocimiento como electrónica o mecánica.

El objetivo de este trabajo es describir la arquitectura general del LR, presentar un ejemplo de manipulación y su relación con el fenómeno de IE y proponer potenciales actividades que podrían implementarse en el ciclo básico de carreras científico tecnológicas a fin de favorecer el aprendizaje de dicho fenómeno y reconocer algunas de sus aplicaciones tecnológicas.

III. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL LR

En el contexto de la enseñanza de la física en carreras de ingeniería y con el fin de generar prácticas experimentales que sitúen a los estudiantes en situaciones similares a las que se enfrentarán como futuros ingenieros, se diseñó un LR que permite realizar prácticas experimentales en el contexto de la problemática de la detección de fallas en dispositivos mecánicos rotantes.

Para el caso particular de dispositivos mecánicos rotante como ejes, ruedas, coronas, llantas, rodillos es habitual el uso de sistemas de medición que permiten evaluar deformaciones, roturas, tolerancias, excentricidades, alabeos. Para el caso de que los dispositivos bajo análisis sean metálicos, existen equipos que permiten reconocer las fallas a partir del análisis de señales eléctricas obtenidas con sensores de proximidad magnéticos o inductivos. Además de los sensores, estos equipos, cuentan con módulos electrónicos para el acondicionamiento y registro de las señales y con módulos de software e interfaces de usuario para la visualización y análisis de las señales (Romero et al., 2018). Los sensores de proximidad son el vínculo entre el dispositivo mecánico a analizar y el sistema de medición. Por lo general aportan una señal eléctrica de salida proporcional a la distancia entre la cara de medición del sensor y el dispositivo. La salida puede ser de corriente o tensión según las características ofrecidas por cada fabricante (Pini, 2021).

En base a lo anterior el LR diseñado consiste en un dispositivo electromecánico a ensayar y un dispositivo de medición y análisis de la señal eléctrica proveniente de un sensor magnético de proximidad experimental que se manipula de forma remota.

El dispositivo electromecánico está formado por tres discos rotantes de acero A36 (<https://www.astm.org>) de 120 mm de diámetro y 10 mm de espesor que se impulsan por un motor NEMA 17 (<https://www.alldatasheet.com/>).

El dispositivo de medición lo integra un sensor de proximidad magnético de construcción propia (no comercial) y por un sistema de adquisición y control de datos remoto. El sensor está formado por un arrollamiento de 300 vueltas de alambre esmaltado de 0.2 mm sobre un núcleo de ferrite de 6 mm de diámetro y 10 mm de longitud, montado sobre un imán de neodimio de 8 mm de diámetro y 10 mm de longitud. La salida del sensor es una tensión alterna que oscila entre ± 10 mV. El sensor está montado sobre un eje accionado por un motor NEMA 17 que permite desplazar el sensor de forma paralela al eje de giro de los discos (figura 1).

El sistema de adquisición y control de datos contiene módulos electrónicos para el acondicionamiento y registro de la señal del sensor y para el control del movimiento de los dos motores. Además, el sistema incluye módulos de software para el almacenamiento de los parámetros y datos del experimento y la comunicación, visualización y control de las variables de forma remota. Los módulos de software se alojan en una computadora servidor del tipo Raspberry Pi 4B (<https://www.raspberrypi.org/>). Así, el usuario accediendo a una dirección url de la web manipula el LR por medio de una interfaz de usuario. A su vez, el sistema integra una cámara IP que permite visualizar en tiempo real el experimento (figura 1 y figura 2).



FIGURA 1. A la izquierda arriba, vista general del dispositivo mecánico a analizar. A la derecha arriba, vista superior del experimento y cámara IP. A la izquierda abajo, sistema de adquisición de datos integrado por 3 dispositivos independientes. A la derecha abajo, sensor magnético de proximidad.



FIGURA 2. Vista general de la interfaz de usuario.

A. Arquitectura de hardware y de software

La arquitectura general del LR se basa en una arquitectura típica de sistemas de Internet de las Cosas (Ávila-Camacho y Moreno-Villalba, 2023). El LR está formado por un conjunto de dispositivos interconectados (figura 1). Cada dispositivo tiene una tarea específica en el experimento y de forma coordinada los dispositivos permiten al usuario manipular el experimento. En este trabajo se presentan aspectos generales de la arquitectura dejando para trabajos posteriores la descripción y justificación de los detalles de diseño e implementación.

La figura 3 muestra un esquema general de la arquitectura. Se separa en niveles que van desde los aspectos directamente vinculados al experimento hasta los que se relacionan con la visualización y control del experimento por el usuario. El dispositivo electromecánico se sitúa en el nivel experimental. El nivel de dispositivos lo integran módulos electrónicos que trabajan de forma independiente y que manipulan directamente las variables de interés del nivel experimental. Cada dispositivo cuenta con los circuitos y elementos electrónicos necesarios para la manipulación de las variables eléctricas del nivel experimental y con la capacidad de comunicarse con los niveles superiores de la arquitectura. Cada dispositivo cuenta con un microcontrolador ESP32-C3, de la empresa Espressif (<https://www.espressif.com/>), responsable de la adquisición, control y envío de los datos de la comunicación.

El LR cuenta con tres dispositivos, uno para la adquisición y registro de la señal eléctrica del sensor, otro para generar el movimiento del motor del eje de los discos y otro para generar el movimiento del motor que desplaza el sensor. Cada dispositivo se conecta a la red de internet a través de una red wifi y se comunica con el nivel de procesamiento/persistencia por el protocolo MQTT (Azzedin y Alhazmi, 2023).

El nivel de procesamiento/persistencia lo integra una API, Application Programming Interface, (Fielding, 2000) desarrollada en el entorno de ejecución Node.js (Haro, Guarda, Peñaherrera y Quiña, 2019) que se utiliza para gestionar el flujo de información proveniente de los dispositivos, realizar la persistencia de los datos del experimento y de proporcionar un canal de comunicación con el nivel visualización/control. Para la persistencia y manejo de los datos se utilizan dos bases de datos diferentes, una del tipo relacional (<https://www.mysql.com/>) para la persistencia de los datos propios del experimento (velocidad de muestreo, dispositivos conectados, descripciones, configuraciones) y otra del tipo de series temporales (<https://www.influxdata.com/>) para el registro de logs de los dispositivos (de forma periódica cada dispositivo envía mensajes a la API indicando su estado de conexión a la red, si registró fallos, etc.).

La comunicación entre el nivel de procesamiento/persistencia y el nivel de visualización/control se realiza por medio de peticiones HTTP GET/POST (Alam, Cartledge, y Nelson, 2014). El nivel de visualización/control cuenta con dos interfaces de usuario realizadas con la herramienta para la visualización de datos Grafana (<https://grafana.com/>). Una de las interfaces está destinada a usuarios estudiantes y otra a usuarios administradores. La interfaz de administrador le permite al administrador del LR hacer un seguimiento del estado de funcionamiento de los dispositivos conectados al LR. Por último, los estudiantes acceden a la experiencia por medio del campus (plataforma Moodle) disponible en la universidad, donde además del acceso al LR cuenta con guías didácticas y orientaciones para manipular el experimento.



FIGURA 3. Esquema general de la arquitectura del LR.

IV. EL EXPERIMENTO

Al utilizar el LR los usuarios manipulan el movimiento de los discos (sentido y velocidad de giro), el movimiento del sensor y realizan registros de la tensión inducida en el sensor a una frecuencia de muestreo fija de 1000 muestras por segundo. El registro obtenido se visualiza en una gráfica en función del tiempo cuyos valores se puede descargar en formato de archivo .csv para ser analizados posteriormente.

Un experimento típico con el LR consiste en:

- posicionar el sensor de forma tal que quede enfrenteado a la cara lateral de un de los discos (A, B o C);
- hacer girar los discos a una de las velocidades posibles (4 o 8 rpm);
- iniciar el registro de 40 segundos de la señal del sensor.

Luego con los datos obtenidos se analizan aspectos de la señal registrada.

A. La señal de salida del sensor y su relación con el fenómeno físico

Para analizar el fenómeno físico interviniente se considera el caso para el cual el sensor se ubica en frente de la cara lateral del disco A (figura 4). El paso de la hendidura por debajo del sensor provoca en la bobina del sensor una tensión inducida (Riad, 2023). Para analizar por qué la señal de salida del sensor tiene las características presentadas en la figura 4 (lado derecho) se parte de un modelo físico simplificado (figura 5). Se considera que:

- El radio R del disco es constante y que gira sobre un eje ubicado en el centro C del disco a velocidad angular ω constante.
- El disco tiene una hendidura cuya área es de dimensiones similares al área de la bobina y cuya profundidad es igual en longitud al diámetro de la bobina.
- El sensor consiste en un imán permanente de neodimio y una bobina ubicados de forma perpendicular al eje de giro del disco y a una distancia D de la superficie lateral del disco.
- La espira es una espira ideal, es decir se considera un arrollamiento perfectamente compacto cuyo espesor tiene a cero y con una única vuelta.
- El campo magnético inducido en la espira se considera despreciable. Se supone que el área de la bobina es similar al área del imán y que el espesor del disco es de dimensiones similares al diámetro de la espira.
- Los campos magnéticos generados por el imán y el disco se modelarán como si fueran campos uniformes y variables en el tiempo.
- La espira forma un circuito eléctrico cerrado con una resistencia r cuyo valor no interesa en este análisis.
- La tensión inducida en la espira se registra con un osciloscopio (representado en la figura 5 como un voltímetro).



FIGURA 4. A la izquierda, disposición de los discos del experimento. A la derecha, señal de salida del sensor durante un registro completo para el caso de estar ubicado en frente de la cara lateral del disco A.

Debido que el material del disco es ferroso (acero A36) y suponiendo que inicialmente no está magnetizado, se asume que la magnetización neta del material tiende a cero en todas las regiones del disco que no estén próximas al sensor (figura 5, flechas azules).

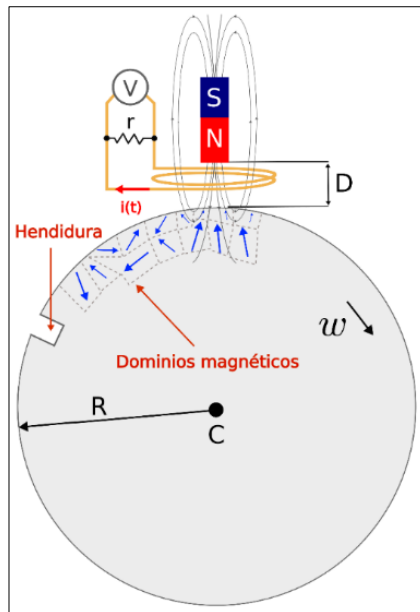


FIGURA 5. Modelo simplificado del disco A y el sensor magnético.

A medida que el disco gira (figura 6, ítems a-e), parte de los dominios magnéticos del material del disco, los que se encuentran cerca del imán del sensor, se magnetizarán de forma tal que el campo magnético generado al interactuar con el campo magnético del imán generará un campo magnético neto en el centro de la espira (posición de interés) menor en intensidad que la intensidad del campo magnético del imán.

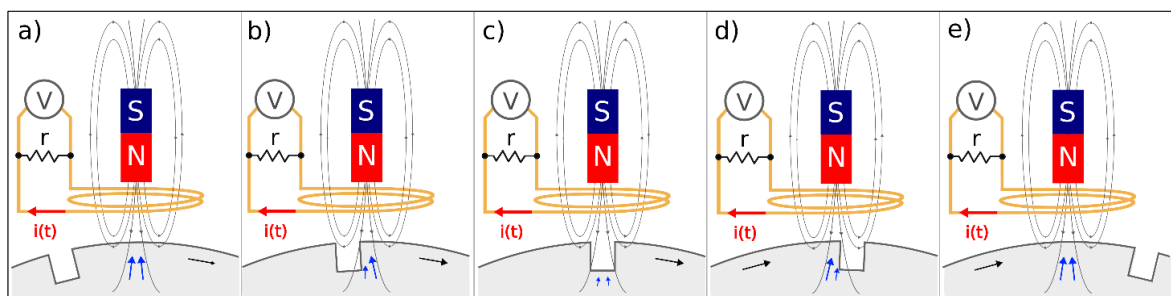


FIGURA 6. Cambio en la magnetización del material del disco cuando la hendidura se aproxima al sensor.

Siempre que la hendidura se encuentre lejos del sensor el flujo de campo magnético en la espira permanecerá constante. Se realiza aquí una nueva suposición: que los dominios magnéticos en todo el material son iguales y están igualmente distribuidos.

Cuando la hendidura se aproxima al sensor se produce una reducción de material ferromagnético que enfrenta al sensor de forma tal que se produce un aumento de la intensidad de campo magnético neto en el centro de la espira.

Esta variación del campo magnético repercute en una variación del flujo de campo magnético en el centro de la espira. La ley de Faraday indica que una variación de flujo magnético en el área que encierra una espira conductora producirá una tensión inducida que, por ser un circuito eléctrico cerrado (espira- resistencia r), producirá una corriente eléctrica en la espira¹.

Dado que las características de la señal tensión inducida producida en la espira está relacionada con el fenómeno mecánico (la hendidura) conocer el comportamiento de la tensión inducida en función del tiempo permite indagar aspectos mecánicos que podrían derivar en fallas mecánicas (aquí la hendidura se puede interpretar como una rotura en la superficie del disco).

B. La señal de salida y su relación con el sistema mecánico

Como se mencionó anteriormente el LR se diseñó para trabajar aspectos relacionados con el fenómeno de IE pero debido a sus características es posible también hacer algunos análisis mecánicos. Siguiendo con el ejemplo anterior (el sensor ubicado en frente de la cara lateral del disco A) cada cambio brusco observado en la señal se debe al pasaje de hendidura por el sensor (figura 4, lado derecho). De esta manera se puede indagar que el disco realizó dos vueltas completas y una porción más de vuelta durante el registro. A su vez, la señal es periódica, aspecto que verifica que el disco gira a velocidad constante (considerando que el periodo de la señal tiene relación con el periodo de giro del disco). El hecho de que la señal no sea periódica podría implicar que entre el disco y el eje no hay un acoplamiento sólido o que el motor presenta una falla que altera su velocidad de giro nominal. También se puede verificar la velocidad de giro del disco extrayendo dos instantes de tiempo correspondiente a dos posiciones que claramente muestren un comportamiento periódico de la señal. Por ejemplo, para el caso de los dos primeros mínimos observados en el gráfico, el primero se ubica en el instante 3106 s y el segundo en el instante 3114 s lo que da un periodo aproximado de 8 s. Este periodo corresponde a una frecuencia de 7,5 rpm (velocidad seteada 8 rpm).

El análisis de las zonas restantes de la gráfica indica que: el disco presenta irregularidades en su superficie, que su eje de giro no se encuentra perfectamente centrado o que vibraciones mecánicas debidas a otros efectos del entorno influyen en la medición del sensor.

Por último, se podría realizar un análisis eléctrico de la señal. Justificar si la velocidad de muestreo y la cantidad de muestras del registro son adecuados para el tipo de sistema analizado o evaluar la relación señal-ruido de la señal podrían ser aspectos a trabajar en cursos como electrónica.

V. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Mediante la descripción del LR y la presentación de un experimento potencial que podría llevarse a cabo utilizando esta herramienta, se buscó resaltar las posibilidades sustanciales que ofrece este recurso en la exploración del fenómeno de IE, con el propósito de facilitar su comprensión. Como se mencionó previamente, el estudio de este tema, de gran trascendencia científica y tecnológica, suele plantear desafíos considerables para los estudiantes, especialmente aquellos en el nivel básico de programas de ingeniería a los cuales se dirige originalmente el diseño del LR.

La concepción de enfoques didácticos que incorporen este recurso puede otorgar a los estudiantes la oportunidad de abordar el fenómeno en un contexto específico, como la "detección de fallos en dispositivos mecánicos rotativos". Esto les permitiría aplicar los conceptos y principios relacionados con la IE en situaciones concretas que alinean con su futura trayectoria profesional, tales como la interpretación de señales eléctricas y la identificación de las causas subyacentes, además de establecer relaciones entre señales eléctricas y características mecánicas. La integración del LR también podría fomentar el desarrollo de habilidades vinculadas con el análisis y modelado de datos empíricos, destrezas de gran interés para los estudiantes en disciplinas científicas y tecnológicas.

Vale la pena destacar que una ventaja adicional del LR radica en su capacidad de operar de manera remota, permitiendo que los estudiantes participen en las actividades propuestas desde la comodidad de sus hogares. Esto implica que cada estudiante puede invertir el tiempo que requiera para interactuar con el entorno virtual del LR, lo cual constituye un aspecto altamente positivo para el proceso de aprendizaje, al conceder una mayor flexibilidad en el ritmo de estudio.

¹ Modelos físicos que representan situaciones similares, que pueden ser útiles para el planteo de modelos físicos, pueden encontrarse en trabajos como los de Manzanares, Bisquert, García-Belmonte y Fernández-Alonso (1994) o Camacho y Sosa (2013).

Finalmente, es relevante resaltar la versatilidad del LR para su aplicación en diversas disciplinas, como la mecánica y la electrónica, lo cual amplía significativamente el alcance de este recurso. Su adaptabilidad a diferentes campos disciplinarios abre nuevas posibilidades de enseñanza y exploración, contribuyendo a enriquecer la educación en distintas áreas de estudio.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece la Agencia Nacional de Promoción de la Investigación, el Desarrollo Tecnológico y la Innovación que financia el PICT "Desarrollo Iterativo de propuestas didácticas para la enseñanza y el aprendizaje de la física" en cuyo marco se lleva a cabo la investigación presentada. También a la Facultad de Ingeniería de la UNCPBA y a estudiantes y docentes de la Asignatura Física II en la que se implementó el recurso desarrollado.

REFERENCIAS

- Alam, S., Cartledge, C. L. y Nelson, M. L. (2014). Support for various HTTP methods on the web. arXiv preprint arXiv:1405.2330
- Arguedas-Matarrita, C. y Concarí, S. B. (2018). Características deseables en un Laboratorio Remoto para la enseñanza de la física: indagando a los especialistas. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 35(3), 702-720.
- Ávila-Camacho, F. J. y Moreno-Villalba, L. M. (2023). Internet de las Cosas (IoT) Retos para las Empresas en la era de la Industria 4.0. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 10(20), 10-16.
- Azzedin, F. y Alhazmi, T. (2023). Secure data distribution architecture in IoT using MQTT. *Applied Sciences*, 13(4), 2515. <https://doi.org/10.3390/app.13042515>
- Camacho, J. M. y Sosa, V. (2013). Alternative method to calculate the magnetic field of permanent magnets with azimuthal symmetry. *Revista mexicana de física E*, 59(1), 8-17.
- Fielding, R. T. (2000). Architectural styles and the design of network-based software architectures. [Tesis doctoral, Universidad de California]. https://www.ics.uci.edu/~fielding/pubs/dissertation/fielding_dissertation.pdf
- Haro, E., Guarda, T., Peñaherrera, A. O. Z. y Quiña, G. N. (2019). Desarrollo backend para aplicaciones web, servicios web restful: Node.js vs spring boot. *Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologías de Informação*, E17, 309-321.
- Manzanares, J. A., Bisquert, J., García-Belmonte, G. y Fernández-Alonso, M. (1994). An experiment on magnetic induction pulses. *American Journal of Physics*, 62(8), 702-706.
- Pini, A. (6 de agosto 2021). The Fundamentals of Proximity Sensors: Their Selection and Use in Industrial Automation. <https://www.digikey.com/en/articles/the-fundamentals-of-proximity-sensors-selection-and-use-industrial-automation>.
- Riad, I. F. (2023). Measuring g using magnetic induction. *Physics Education*, 58(3), 035008.
- Romero, R. E., de la Vega, R. J., Rossi, S., Ferraggine, G., Greco, A. y García, M. (noviembre 2018). Device For Measuring Mechanical Variables for Fault Detection in Cement Production Kilns. Presentado en *26° Congreso Argentino de Control Automático*, 7-9 de Junio, Universidad de Palermo, Buenos Aires.