

## **Un sistema experimental para la investigación y enseñanza en el ámbito del Structural Health Monitoring del proyecto aeroespacial TOMOPLEX**

Alexander Hilgarth, Julius-Maximilians-Universität Würzburg, [alexander.hilgarth@uni-wuerzburg.de](mailto:alexander.hilgarth@uni-wuerzburg.de)

Pedro Sousa, Julius-Maximilians-Universität Würzburg, [pedro.sousa@uni-wuerzburg.de](mailto:pedro.sousa@uni-wuerzburg.de)

Michael A. Dorin, University of St. Thomas, [mike.dorin@stthomas.edu](mailto:mike.dorin@stthomas.edu)

Sergio Montenegro, Julius-Maximilians-Universität Würzburg, [sergio.montenegro@uni-wuerzburg.de](mailto:sergio.montenegro@uni-wuerzburg.de)

### **RESUMEN**

Se ha desarrollado un concepto para un sistema experimental y didáctico en el ámbito de la aeronáutica y, en particular, del Structural Health Monitoring (SHM). Este sistema tiene como objetivo facilitar la familiarización con contenidos de investigación que están relacionados con fondos de terceros y no forman parte del plan de estudios. De este modo, en el futuro, los estudiantes y nuevos empleados podrán ser introducidos rápidamente a un tema, permitiéndoles ser operativos lo antes posible. A través de este sistema, se impartirán todos los conceptos, procedimientos y métodos de medición relevantes, tanto en hardware como en software. En la concepción del sistema se han tomado en cuenta las experiencias y resultados de cursos anteriores del departamento.

**PALABRAS CLAVES:** Structural Health Monitoring, Electrical Impedance Tomography, Raspberry Pi

### **INTRODUCCIÓN**

El Departamento de Tecnología de la Información Aeroespacial de la Universidad Julius-Maximilians de Würzburg (Alemania) está activo tanto en investigación como en docencia. Una particularidad radica en el hecho de que aproximadamente el 90 % de los científicos trabajan en proyectos financiados por terceros. Estos proyectos se enfocan principalmente en la investigación y solo secundariamente en la enseñanza. Esto también se refleja en los planes de los proyectos. Sin embargo, la inclusión de estudiantes no está prohibida, sino que, por el contrario, es bien recibida. Sin embargo, un problema frecuente es la falta de tiempo disponible para la supervisión.

Un proyecto de investigación típico en el departamento incluye a dos investigadores y tiene una duración de dos años. Además, a lo largo de todo el proyecto, se planifican dos puestos adicionales para estudiantes colaboradores, quienes trabajan entre 20 y 60 horas al mes en el proyecto, asumiendo tareas adecuadas. Los estudiantes provienen principalmente de programas de maestría, aunque ocasionalmente algunos estudiantes de licenciatura muy destacados tienen la capacidad necesaria para calificar y participar en estos proyectos.

Los temas de investigación en el ámbito aeroespacial suelen tener un carácter marcadamente interdisciplinario y abarcan áreas muy diversas. Por ello, este campo de investigación se denomina a veces humorísticamente como "una tienda de variedades". La familiarización con estas diversas áreas ya exige un gran esfuerzo por parte de los investigadores del proyecto, lo que prolonga aún más el tiempo de capacitación de los estudiantes asistentes en este campo. Finalmente, muchos de los métodos, procedimientos y tecnologías utilizados no forman parte del plan de estudios.

En el pasado, el departamento no solo ha llevado a cabo proyectos con una relación directa con la aeronáutica y la astronáutica, como el desarrollo de un satélite o un rover lunar, sino también proyectos de transferencia de tecnología en áreas que, a primera vista, tienen poco que ver con la aviación. Entre estos se incluyen proyectos como una infraestructura de TI para abejas y apicultores (sistema de monitoreo de colmenas "HONEYCLOUD") [1-2], la realización de un concepto que combina el transporte público con drones, o la implementación de un dispositivo automatizado para la recolección de muestras ambientales, específicamente esporas de hongos. Estos ejemplos de proyectos muestran que los temas abordan áreas tan diversas como la biología, la bioeconomía, la tecnología automotriz y la infraestructura de transporte, la química, la ingeniería de procesos, etc., muchas de las cuales se alejan considerablemente del ámbito de la informática.

Esto presenta grandes desafíos en términos de tiempo de familiarización con los contenidos del proyecto y el entorno de trabajo específico. Con el concepto de una plataforma experimental y didáctica que aquí se presenta, se busca proporcionar a los investigadores y estudiantes un acceso más rápido a este campo de investigación tan específico.

### **Investigación y docencia en ingeniería sin facultad de ingeniería**

De las conversaciones con nuestros estudiantes se desprende que la elección del programa de Informática Aeroespacial está vinculada a la expectativa de un perfil profesional futuro en el que principalmente se programará. La Informática Aeroespacial en la Universidad de Würzburg se encuentra junto con otros departamentos de informática y matemáticas en una facultad común. Una particularidad del programa de estudios que ofrecemos, con relación a la temática aeroespacial, es que la aproximación al tema no se realiza desde la ingeniería mecánica, como es habitual en otras universidades, sino desde la perspectiva de las matemáticas y la informática. La Universidad de Würzburg no cuenta con una facultad de ingeniería.

Sin embargo, los estudios y el contenido de la investigación en informática aeroespacial están muy relacionados con la ingeniería. Esto da lugar a otra circunstancia que debe tenerse en cuenta, a saber, que los estudiantes no tienen que realizar formalmente unas prácticas básicas de tipo ingenieril. La consecuencia de esto es que muchos estudiantes entran por primera vez en un taller o laboratorio durante sus estudios y se espera que trabajen allí. Como resultado, el departamento tiene ahora que enseñar los contenidos y conocimientos de dichas prácticas básicas por iniciativa propia. Esto se hace principalmente a través de dos instalaciones vecinas: Un taller de construcción de aviones y un laboratorio de construcción de prototipos. Por ejemplo, el laboratorio de construcción de prototipos ofrece varias estaciones de trabajo para montaje de placas de circuito impreso, soldadura, puesta en servicio, impresión 3D, pruebas de fiabilidad y mediciones de alta frecuencia. En la actualidad, el procedimiento consiste en una sesión informativa general en el laboratorio y, a continuación, una sesión informativa específica para cada dispositivo en las estaciones de trabajo. Debido a la gran cantidad de tiempo que requiere el funcionamiento y mantenimiento del laboratorio, no está diseñado como un «espacio abierto», sino como un área cerrada a la que pueden acceder el personal científico, los empleados estudiantes y los alumnos durante sus tesis finales.

Estas medidas introducen a los estudiantes del campo de la informática en métodos de trabajo similares a los de la ingeniería y en un entorno de trabajo similar al de los ingenieros. Sin embargo, sigue existiendo un déficit, ya que los conocimientos son predominantemente generalistas y bastante genéricos, mientras que los conocimientos especializados específicos de cada proyecto y requeridos con urgencia deben adquirirse individualmente. El largo periodo de familiarización resultante es un problema práctico, ya que la duración de los proyectos es naturalmente limitada y no debe transcurrir demasiado tiempo antes de que un estudiante pueda hacer una contribución productiva.

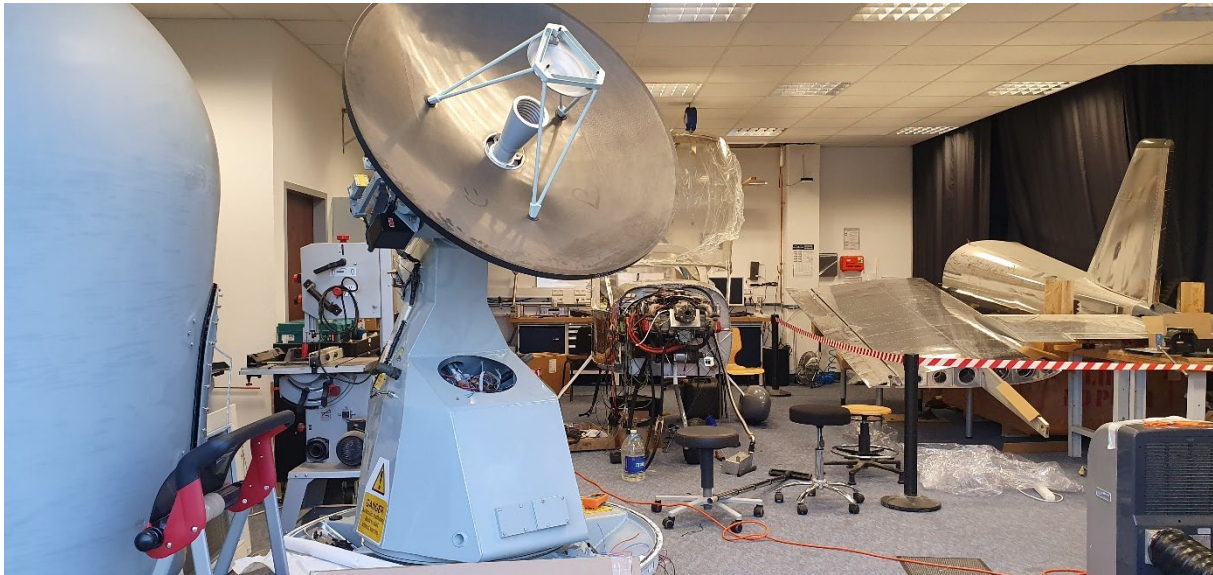


Figura N° 1. A primera vista, esta imagen no parece la de un típico laboratorio de informática, pero aquí tienen lugar numerosos proyectos de estudiantes -incluidos trabajos de programación- de informática aeroespacial.

## Desarrollo del concepto de enseñanza

En el pasado, la Cátedra ha adquirido una amplia experiencia en la creación de materiales didácticos y conceptos de enseñanza. A lo largo de más de 10 años, se ha desarrollado en la cátedra un montaje didáctico y experimental en el campo de la tecnología de satélites («FloatSat») [3-5]. Este montaje ha demostrado que los montajes experimentales creados para un curso específico son bien recibidos por los estudiantes si se utilizan para realizar tanto ejercicios prescritos como trabajo de proyecto libre. El trabajo de proyecto libre, en particular, libera impulsos lúdicos y enfoques creativos, que en general fueron valorados por los estudiantes como muy motivadores para sus estudios posteriores.

Otro efecto también fue evidente: las tecnologías específicas definidas hace casi una década, y por tanto en una fase muy temprana, para este montaje experimental se han conservado en gran medida hasta hoy y han sido utilizadas repetidamente por los estudiantes para otros problemas. Además, estas continuaciones del trabajo científico de los estudiantes basadas en esto se han incorporado a proyectos reales. Esto ocurrió, por ejemplo, aportando un paquete de trabajo para un proyecto financiado por terceros como parte de su propia tesis o en forma de que el graduado aceptara un puesto en el mismo departamento y siguiera utilizando sus métodos y herramientas probados para proyectos posteriores. Ahora queremos retomar esta metodología y utilizarla en un ámbito de investigación distinto. Sin embargo, esto plantea retos nuevos o diferentes que hay que abordar.

El SHM (Structural Health Monitoring) que pretendemos realizar en estructuras de aeronaves y naves espaciales (por ejemplo, alas, fuselaje de aviones, etc.) se llevará a cabo con ayuda de mediciones eléctricas. Se trata principalmente de mediciones de impedancia [6]. Los valores medidos deben analizarse mediante EIT (Electrical Impedance Tomography, tomografía de impedancia eléctrica) o métodos relacionados (por ejemplo, tomografía de capacitancia eléctrica). Para ello se requiere un hardware de medición y el correspondiente software de reconstrucción.

Al tratarse de una tecnología de nicho, sólo existe una pequeña gama de fabricantes de equipos de laboratorio y productos correspondientes. Además, estos sistemas se desarrollaron principalmente para el sector médico y, por tanto, están optimizados para una aplicación diferente. Por ejemplo, algunas de nuestras muestras de material tienen una resistencia óhmica muy alta, mientras que los productos médicos están adaptados a muestras comparativamente conductoras, como el agua salada. Esto se ve agravado por el hecho de que los sistemas existentes en el mercado tienden a situarse en un segmento de precio más elevado [7]. También existen sistemas de bajo coste en el ámbito del código abierto, pero también en este caso los diseños están orientados al uso en seres humanos y, por tanto, a otros ámbitos de medición. Además, los sistemas típicos suelen utilizar para la reconstrucción el paquete de software EIDORS [8] basado en MATLAB, que debe considerarse una referencia en el campo de las EIT. Esto significa que una configuración de medición de este tipo debe ampliarse para incluir un PC completo. Actualmente no existe una solución compacta e integrada en forma de ordenador monoplaca con electrónica de medición.

### **Raspberry Pi Shield y posibles alternativas**

El Raspberry Shield del EIT se ha diseñado para proporcionar una herramienta de SHM accesible y educativa que, como ya se ha mencionado, también puede penetrar en áreas más profundas como la aeroespacial, la informática, la electrónica, la biomedicina y las matemáticas. Dada la complejidad de la SHM, especialmente en aplicaciones aeroespaciales, este sistema Shield está diseñado para que los estudiantes se familiaricen con los principios básicos más rápidamente.

En el entorno de la educación y la investigación, los microcontroladores y las placas de desarrollo son herramientas fundamentales para los proyectos de ciencia y tecnología. Entre las plataformas más conocidas y utilizadas se encuentran Arduino y Raspberry Pi. Estas plataformas permiten realizar desde sencillos experimentos educativos hasta complejos prototipos de investigación y se caracterizan por su facilidad de uso, su asequibilidad y el apoyo activo de la comunidad. La elección entre estas plataformas suele depender de los requisitos específicos del proyecto, incluidas las capacidades de procesamiento, los requisitos de memoria y el tipo de entorno de programación que mejor se adapte a los objetivos del proyecto.

Para el escudo del EIT, se eligió la Raspberry Pi en lugar del Arduino porque había que cumplir los requisitos de rendimiento/velocidad de procesamiento y conectividad del proyecto. La Raspberry Pi ofrece una mayor potencia de procesamiento y una memoria más grande, lo que es esencial para manejar las complejas tareas informáticas requeridas para el EIT. Aunque el Arduino es estupendo para tareas más sencillas, como la integración directa de sensores y el procesamiento básico de datos, no tiene la potencia de cálculo necesaria para manejar la gestión de datos a gran escala y el procesamiento en tiempo real que requieren las aplicaciones SHM eficaces. Además, la Raspberry Pi es compatible con lenguajes de programación de alto nivel como Python, lo que permite una integración más sencilla con herramientas de software avanzadas como PyEIT. Esto es crucial para fines educativos y puede mejorar la experiencia de aprendizaje.

### **Software: PyEIT y EIDORS**

La EIT es una tecnología de SHM que se investiga desde hace más de cuatro décadas, sobre todo en ingeniería biomédica. Se trata de una técnica de imagen no invasiva para medir la distribución de la conductividad eléctrica en una zona objetivo. A lo largo de los años, la

comunidad EIT ha utilizado principalmente EIDORS, una herramienta robusta implementada en MATLAB, que se utiliza sobre todo para aplicaciones en el campo biomédico. De la misma comunidad EIT surgió PyEIT [9], una biblioteca basada en Python diseñada para retos similares, pero con más flexibilidad y eficiencia. Mientras que EIDORS era crucial para aplicaciones biomédicas avanzadas, PyEIT ofrece un enfoque moderno con varias ventajas para el sector educativo.

La parte de software del EIT Raspberry Shield fue un factor decisivo. Se eligió PyEIT en lugar de EIDORS por su compatibilidad con la plataforma Raspberry Pi que funciona con Linux. PyEIT es de código abierto, ligero y eficiente, por lo que resulta ideal para el procesamiento y la visualización de datos en tiempo real directamente en la Raspberry Pi. Además, la facilidad de uso de Python encaja bien con los objetivos educativos del proyecto, ya que los estudiantes pueden modificar y ampliar la base de código según sus necesidades.

Nuestro proyecto «EIT» Raspberry Pi Shield es «pionero» en vincular la adquisición de datos en tiempo real del hardware EIT a la Raspberry Pi, una integración que no se había explorado antes. Al utilizar PyEIT, estamos proporcionando el eslabón perdido que combina un procesamiento de datos robusto con una recopilación de datos práctica y real adaptada específicamente al sector educativo. Esta integración allana el camino para una experiencia de aprendizaje más interactiva en las aplicaciones SHM y facilita que los estudiantes se involucren con esta tecnología de nicho desde el principio.

## Diseño de hardware

El escudo se integra perfectamente con el conector Raspberry Pi y utiliza su fuente de alimentación de 5V. Los principales componentes de hardware incluyen

- 16 electrodos: Son esenciales para capturar las señales eléctricas necesarias para el EIT.
- ADC de alta velocidad: El ADC admite un rango de entrada de  $\pm 5V$  o  $\pm 10V$  y ofrece una resolución de 16 bits a 20 KSPS.
- Detector de fase y ganancia: Puede procesar señales de hasta 2,7 GHz, con una escala de ganancia de 30 mV/dB y una escala de fase de 10 mV/grado.
- Generador de ondas: Genera señales de salida de hasta 12 MHz, con un reloj serie de hasta 40 MHz.
- Multiplexor (Mux): Garantiza una conmutación eficiente con una baja resistencia de conexión de  $4\Omega$  y un funcionamiento de carril a carril.

El diseño de esta shield no sólo soporta las funciones primarias del EIT para SHM, sino que también incluye pinouts adicionales que permiten a los estudiantes experimentar con sensores y componentes adicionales y ampliar y mejorar la aplicación de forma modular en el futuro.

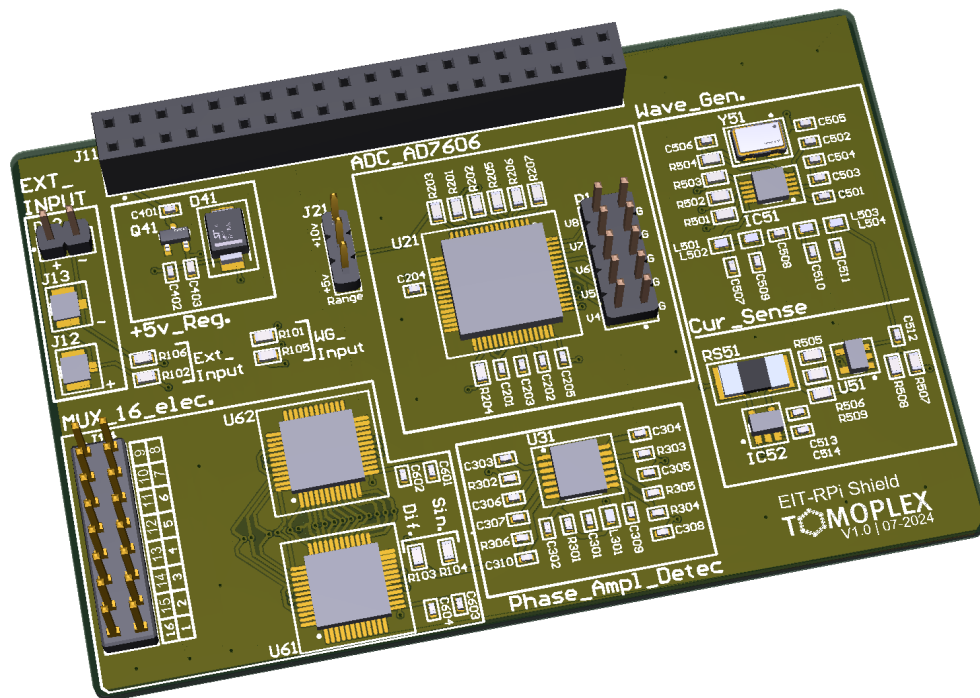


Figura N° 1. Diseño de hardware del escudo EIT-Raspberry Pi

## RESULTADOS

En la actualidad, el sistema se está instalando en el marco de un proyecto estudiantil, se utiliza en una configuración de prueba específica y se evalúa posteriormente. Los resultados provisionales son prometedores, ya que el principio de una tarjeta de expansión de funciones específicas para ordenadores monoplaca resulta familiar y los conocimientos existentes de plataformas comparables pueden transferirse directamente. Dado que nuestra configuración se basa en una Raspberry Pi, la automatización de las mediciones puede realizarse completamente sin sistemas adicionales en este ordenador monoplaca. Además, las interfaces USB y Ethernet permiten añadir otros componentes necesarios para la automatización de la medición, como cámaras para el rango visible e infrarrojo, así como múltiples sensores de temperatura.

## CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

La puesta en marcha mediante el ejemplo de un experimento real para el curado de resina de moldeo en el proceso de infusión al vacío ya proporciona una plantilla para un futuro elemento didáctico. Nos gustaría desarrollar otros elementos didácticos basados en este experimento o en otros montajes experimentales, también en otras áreas de investigación, como la bioeconomía. El objetivo es desarrollar un breve curso introductorio que permita a los ayudantes de investigación y a los estudiantes ayudantes trabajar de forma independiente en este campo de investigación.

## AGRADECIMIENTOS

Queremos dar las gracias a nuestros colegas Atheel Redah y Muhammad Faisal. Bajo su decisivo liderazgo, en la cátedra se ha desarrollado durante más de 10 años un montaje didáctico y experimental en el campo de la tecnología de satélites («FloatSat»). Este montaje ha demostrado que los montajes experimentales creados para un curso específico con unidades de ejercicios y trabajo de proyecto libre son bien recibidos por los estudiantes y tienen un efecto motivador en sus estudios.

## REFERENCIAS

- [1] Hilgarth, A., Gormaz-Lobos, D., Galarce-Miranda, C., Montenegro, S. (2021). Experiences Involving Student Assistants in Interdisciplinary R&D Projects Using the Example of Aerospace Computing and Bioeconomics: The "HONEYCLOUD" Project. In: Sharma, H., Gupta, M.K., Tomar, G.S., Lipo, W. (eds) Communication and Intelligent Systems. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 204. Springer, Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-16-1089-9\\_46](https://doi.org/10.1007/978-981-16-1089-9_46)
- [2] Hilgarth, A., Dorin, M., & Montenegro, S. (2020). HONEYCLOUD - Combinando investigación y docencia en un proyecto para la digitalización de la apicultura. *Actas Del Congreso Internacional De Ingeniería De Sistemas*, 268-269. <https://doi.org/10.26439/ciis2019.5526>
- [3] M. Faisal, A. Redah, S. Montenegro (2016) DESIGN OF A COMPACT ACADEMIC COURSE FOR SATELLITE NAVIGATION AND CONTROL WITH A REAL-TIME OPERATING SYSTEM, INTED2016 Proceedings, pp. 4886-4895.
- [4] A. Redah, M. Faisal and S. Montenegro, "The Floating Satellite System as an Educational Platform for Space Applications," *2020 IEEE 32nd Conference on Software Engineering Education and Training (CSEET)*, Munich, Germany, 2020, pp. 1-3, doi: 10.1109/CSEET49119.2020.9206171.
- [5] K. Ahmad *et al.*, "An Educational Platform for Testing and Evaluating Satellite Control Algorithms in a Real-Time and Frictionless Environment," *2022 19th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology (IBCAST)*, Islamabad, Pakistan, 2022, pp. 508-513, doi: 10.1109/IBCAST54850.2022.9990104.
- [6] A. Hilgarth, P. Sousa, M. Dorin and S. Montenegro, "Noninvasive in Situ Monitoring for Compound Material Production Using Low Cost Foil Sensors," *2023 IEEE CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON)*, Valdivia, Chile, 2023, pp. 1-5, doi: 10.1109/CHILECON60335.2023.10418670.
- [7] Sciospec EIT-Devices (2024), Sciospec Scientific Instruments GmbH, recuperado de: <https://www.sciospec.com/de/eit/>
- [8] Adler, Andy, et al. "EIDORS Version 3.9." *Proc. 18th Int. Conf. on Biomed. Applications of EIT*. Thayer School of Engineering at Dartmouth, 2017.
- [9] Liu, Benyuan, et al. "pyEIT: A python based framework for Electrical Impedance Tomography." *SoftwareX* 7 (2018): 304-308.