



**TECNOLOGÍA**  
*en marcha*

Revista trimestral  
Octubre 2021  
Volumen 34  
ISSN-E 2215-3241



**Número especial**  
**Movilidad estudiantil 9**

Publicación y directorio en catálogos

latindex

REDIB  
Red Iberoamericana  
de Investigación y Docencia Científica

DOAJ

Dialnet

melICA

SciELO

ET  
Editorial Tecnológica  
de Costa Rica

TEC | Tecnológico  
de Costa Rica

**Comisión Editorial**

Felipe Abarca Fedullo. Director.  
Instituto Tecnológico de Costa Rica

Juan Antonio Aguilar Garib  
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica  
Universidad Autónoma de Nuevo León.  
México

Carlos Andrés Arredondo Orozco  
Facultad de Ingenierías  
Universidad de Medellín. Colombia

Lars Köhler  
Experimenteller Botanischer Garten  
Georg-August-Universität Göttingen.  
Alemania

Jorge Solano Jiménez  
Instituto Costarricense del Cemento  
y del Concreto

**Edición técnica**

Alexa Ramírez Vega

**Revisión filológica**

Esperanza Buitrago Poveda

**Diseño gráfico**

Felipe Abarca Fedullo

**Diagramación**

Alexa Ramírez Vega

**Diseño de cubierta**

Felipe Abarca Fedullo

**Imagen de cubierta**

<https://freepik.es>

**Datos de catalogación en publicación**

Tecnología en Marcha / Editorial Tecnológica  
de Costa Rica. - Vol. 34 especial, Octubre  
2021- Trimestral  
ISSN-E 2215-3241

1. Ciencia y Tecnología –  
Publicaciones periódicas CDD:600

**TEC** | Tecnológico  
de Costa Rica

Apdo 159-7050 Cartago, Costa Rica  
Tel.:(506) 2550-2297, 2550-2618

Correo electrónico: [editorial@itcr.ac.cr](mailto:editorial@itcr.ac.cr)

Web: [editorial.tec.ac.cr](http://editorial.tec.ac.cr)

[http://revistas.tec.ac.cr/tec\\_marcha](http://revistas.tec.ac.cr/tec_marcha)



Editorial Tecnológica  
de Costa Rica

**TEC** | Tecnológico  
de Costa Rica

La Editorial Tecnológica de Costa Rica es una dependencia especializada del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Desde su creación, en 1978, se ha dedicado a la edición y publicación de obras en ciencia y tecnología. Las obras que se han editado abarcan distintos ámbitos respondiendo a la orientación general de la Institución.

Hasta el momento se han editado obras que abarcan distintos campos del conocimiento científico-tecnológico y han constituido aportes para los diferentes sectores de la comunidad nacional e internacional.

La principal motivación de la Editorial es recoger y difundir los conocimientos relevantes en ciencia y tecnología, llevándolos a los sectores de la comunidad que los requieren.

La revista *Tecnología en Marcha* es publicada por la Editorial Tecnológica de Costa Rica, con periodicidad trimestral. Su principal temática es la difusión de resultados de investigación en áreas de Ingeniería. El contenido de la revista está dirigido a investigadores, especialistas, docentes y estudiantes universitarios de todo el mundo.

**Publicación y directorio en catálogos**

# **TECNOLOGÍA** *en marcha*

## Contenidos

Metodología para la implementación de misiones fotogramétricas autónomas con plataformas UAS de ala fija

Methodology for implementation of autonomous photogrammetric missions with fixed-wing UAS platforms

*Amit Ferencz-Appel, Héctor García de Marina,*

*Sergio Arriola-Valverde, Renato Rimolo-Donadio..... 3*

Vidrio molido como tecnología sostenible en el concreto hidráulico

Grounded glass as a sustainable technology in hydraulic concrete

*Andrés Rojas-Ramos..... 13*

A novel diagnosis system concept for Safe Distributed Systems

Un novedoso concepto de sistema de diagnóstico para Sistemas Distribuidos Seguros

*Javier Dario Leon-García, Sebastian Imle..... 19*

Diseño de una herramienta para la detección de fallos en sistemas multirrotores

Design of a tool for failures detection in multicopter systems

*Dilan Andrey Loría-Quesada..... 28*

Comportamiento físico y mecánico de elementos no estructurales a base de concreto elaborado con fibra de cáscara de arroz

Physical and mechanical behavior of non-structural elements elaborated of concrete made with rice husk fiber

*Paola A. Martínez-Gatica, Stéphane Hans,*

*Mauricio Araya-Rodríguez..... 40*

**Aplicación de las TIC y realidad aumentada como iniciativa para la puesta en valor del patrimonio arquitectónico. Estudios de casos españoles para su posible implementación en contextos patrimoniales costarricenses**

Application of ICT and augmented reality as an initiative to promote the architectural heritage. Case studies from Spain in order to implementation in Costa Rican heritage contexts

*Fernando Agüero-Bravo* ..... 62

**Relación entre la fuerza de agarre y pinza con dinamometría isométrica y los desórdenes músculoesqueléticos en la población adulta de Bogotá, Colombia**

Relationship between grip and pinch force with isometric dynamometry and musculoskeletal disorders in the Bogota, Colombia adult population

*Kevin Pacheco-Arias* ..... 78

**Estación de recarga para dotar de mayor autonomía al Robobo**

Charging station to provide greater autonomy to the Robobo

*Mónica Vizcaíno-Delgado* ..... 90

**Diseño y desarrollo de un simulador de código abierto para un robot submarino de propósito general**

Design and development of an open source simulator for a general purpose submarine.

*Eva Corella-Solís*..... 101

# Metodología para la implementación de misiones fotogramétricas autónomas con plataformas UAS de ala fija

## Methodology for implementation of autonomous photogrammetric missions with fixed-wing UAS platforms

Amit Ferencz-Appel<sup>1</sup>, Héctor García de Marina<sup>2</sup>,  
Sergio Arriola-Valverde<sup>3</sup>, Renato Rimolo-Donadio<sup>4</sup>

---

Ferencz-Appel, A; García de Marina, H; Arriola-Valverde, S; Rimolo-Donadio, R. Metodología para la implementación de misiones fotogramétricas autónomas con plataformas uas de ala fija . *Tecnología en Marcha*. Vol. 34, especial. Movilidad Estudiantil. Octubre 2021. Pág 3-12.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v34i5.5906>



- 1 Escuela de Ingeniería Electrónica, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Correo electrónico: [ferami3@gmail.com](mailto:ferami3@gmail.com)
- 2 Unmanned Aerial Systems Center, University of Southern Denmark (SDU). Correo electrónico: [hgm@mami.sdu.dk](mailto:hgm@mami.sdu.dk)
- 3 Escuela de Ingeniería Electrónica, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Correo electrónico: [sarriola@tec.ac.cr](mailto:sarriola@tec.ac.cr)
- 4 Escuela de Ingeniería Electrónica, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Correo electrónico: [rrimolo@tec.ac.cr](mailto:rrimolo@tec.ac.cr)

## Palabras clave

Ala Fija; drones; fotogrametría; paparazzi UAV; sensores remotos; sistemas aéreos no tripulados.

## Resumen

Este trabajo presenta una metodología desarrollada para ejecutar misiones fotogramétricas autónomas con sistemas aéreos no tripulados de ala fija, bajo el proyecto de software y hardware abierto Paparazzi UAV [1]. La metodología consta de cuatro etapas principales: planificación de la misión, acondicionamiento del sistema, ejecución de la misión y procesamiento de datos. La metodología fue validada a través del planeamiento de misiones fotogramétricas y su ejecución con la plataforma Opterra 2M [2] y el controlador Apogee [3].

## Keywords

Fixed wing; drones; photogrammetry; UAV paparazzi; remote sensing; unmanned aerial systems.

## Abstract

In this work, a methodology developed to execute autonomous photogrammetric missions with fixed-wing unmanned aerial systems is proposed, based on the open-source software and hardware project Paparazzi UAV [1]. The methodology consists of four main stages: mission planning, system conditioning, mission execution, and data processing. The methodology was validated through the planning of photogrammetric missions and their execution with the Opterra 2M [2] platform and the Apogee controller [3].

## Introducción

La fotogrametría es una técnica aplicable en diversas áreas del conocimiento como agricultura, silvicultura, topografía e inspección de estructuras, entre muchas otras. Esta técnica permite hacer mapas tridimensionales georreferenciados a partir de una serie de fotografías del área de estudio [4]. Para realizar un levantamiento fotogramétrico, es necesario tomar fotografías con suficiente traslape, que cubran por completo el terreno a analizar. Además, es esencial recopilar datos de tiempo, posición y orientación de cada imagen para su posterior procesamiento, que dará lugar a los productos fotogramétricos como ortofotos, modelos de elevación digital y modelos 3D [5].

La implementación de esta técnica con sistemas aéreos no tripulado (UAS por sus siglas en inglés) representa una solución de relativo bajo costo, simple y con la que se pueden alcanzar altas resoluciones temporales y espaciales en comparación con otras alternativas como es el uso de aviones tripulados o imágenes satélites.

Actualmente, en el Laboratorio de Fotogrametría y Sensores Remotos de la Escuela de Electrónica del TEC (UASTEC), se investiga el uso técnicas fotogramétricas con sistemas UAS para diversas aplicaciones. El Laboratorio cuenta con varias plataformas de tipo multirrotor que se caracterizan por su alta maniobrabilidad. Sin embargo, debido al alto consumo de energía asociado a los múltiples motores, la autonomía es usualmente baja.

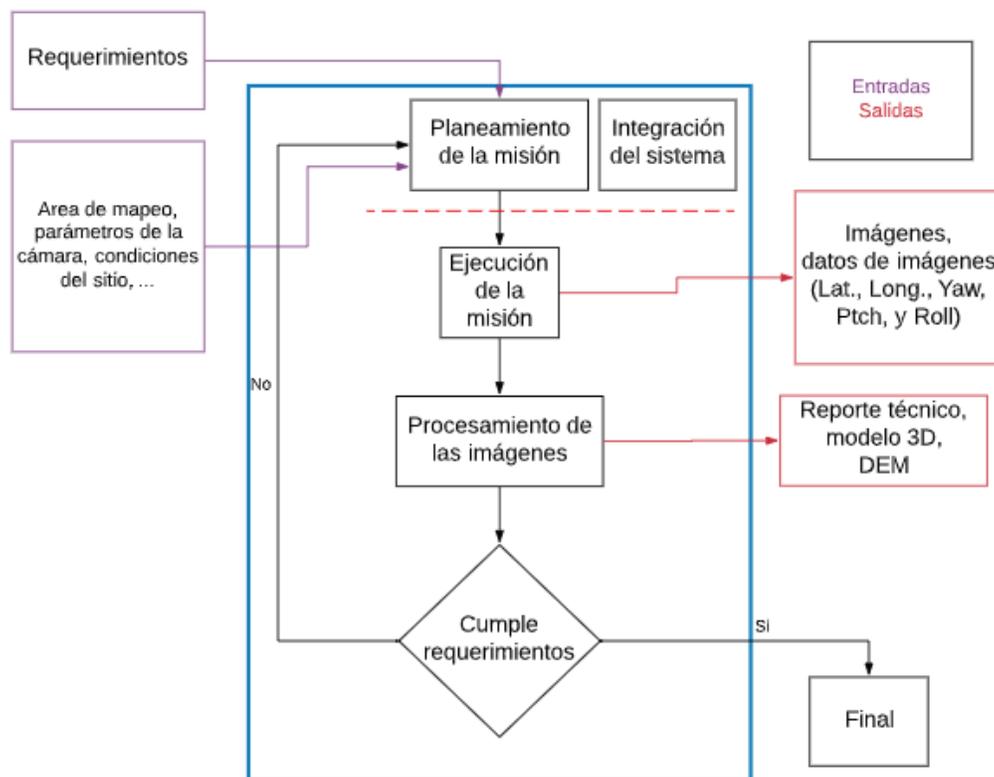
Recientemente, se ha explorado el uso de plataformas de ala fija para fines fotogramétricos, las cuales son más eficientes debido a su estructura física aerodinámica, con velocidades de vuelo mayores y una consecuente autonomía y capacidad de cubrir áreas de estudio mayores. Estas

dos propiedades juntas perfilan las plataformas UAS de tipo ala fija como una gran alternativa para el análisis fotogramétrico a gran escala [4], a pesar de que su operación suele ser más compleja con respecto a plataformas multirrotor.

Trabajos anteriores se han ocupado del desarrollo de una plataforma de ala fija para fines fotogramétricos [6]- [7] el presente trabajo le da seguimiento a esta iniciativa con una propuesta metodológica que permita el diseño y seguimiento de rutas de vuelo con UAS de tipo ala fija, basadas en la plataforma Paparazzi UAV y el controlador Apogee, para recopilar la información necesaria de forma autónoma para la generación de productos fotogramétricos.

## Metodología

La metodología propuesta para el diseño y seguimiento de rutas con UAS de tipo ala fija consta de las siguientes fases: planificación de la misión, integración de sistema, ejecución y procesamiento de datos. La figura 1 muestra una visión general de la metodología y a continuación se describen las fases y tareas necesarias para realizar una misión fotogramétrica con plataformas de ala fija.



**Figura 1.** Diagrama general de flujo para la metodología propuesta.

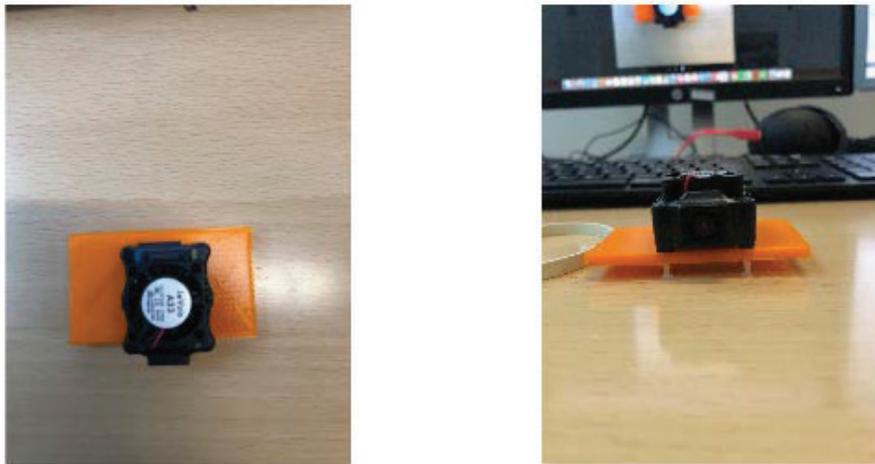
### Planificación de la Misión

El objetivo de este paso es el cálculo y definición de parámetros para el diseño de rutas. Inicialmente se combinan los requerimientos de usuario, características de la cámara y la plataforma aérea, área de estudio y las condiciones atmosféricas. Posteriormente el módulo de planificación calcula y define los parámetros utilizados para el diseño de la ruta de vuelo. Como entradas, en esta fase se recibe el requerimiento de traslape frontal y lateral, resolución

espacial deseada (*Ground Sampling Distance, GSD*) en cm/pixel, el área de estudio a mapear, características de la cámara y el ángulo de barrido. Como salidas se debe establecer las limitaciones y precauciones para la ejecución del vuelo, los archivos de simulación y ciertos parámetros teóricos tales como: distancia entre imágenes consecutivas, distancia entre líneas de vuelo consecutivas y altura de vuelo.

### Integración del Sistema UAV

Luego de la fase de planeamiento se debe consolidar la plataforma a utilizar, integrando la cámara, el cuerpo de la aeronave y el controlador con autopiloto, tanto en aspectos de *hardware* como *software*. En esta etapa se lleva a cabo mediante la ejecución de las siguientes tareas, configuración y montaje del autopiloto, selección de los protocolos de comunicación entre la aeronave y los controles en tierra, configuración y montaje de la cámara, enlazándose para ser controlada desde el controlador central. En la figura 2, se puede observar la cámara [8] con su respectiva base impresa en 3D para ser fijada al cuerpo del UAV. Para no limitar la autonomía de la aeronave, se favorece la utilización de cámaras ligeras sin interfaces humanas que son innecesarias en misiones fotogramétricas.



**Figura 2.** Cámara utilizada con montante.

### Ejecución de la Misión

En esta fase se utilizan los parámetros de diseño definidos en el módulo de planificación para ejecutar el vuelo y recolectar las imágenes georreferenciadas. Una vez que la misión fue diseñada y programada en el controlador del UAV, es tiempo de ejecutar el vuelo. Cabe destacar que las misiones fotogramétricas se realizan de forma automatizada, ya que no es posible realizar trayectorias precisas a través del control manual.

La ruta se diseña bajo el entorno Paparazzi, que incluyen los archivos de programación del autopiloto, considerando maniobras de despegue, aterrizaje y viraje, así como la cobertura del área bajo estudio. La planeación de la ruta debe incluir la definición de los puntos e intervalo a la cual se toman las imágenes, para las cuales se debe registrar orientación de la nave (en términos de los ángulos de navegación), y posición (en términos de coordenadas y altitud) al momento de tomar la imagen.

### Procesamiento de la Información

Una vez recolectadas las imágenes, estas se deben procesar con algún flujo de procesamiento fotogramétrico basado en técnicas de visión por computadora. Con este proceso se genera un modelo 3D de nube de puntos, a partir del cual se puede generar otros productos derivados, tales como ortomosaicos y modelos de elevación digital. La calidad en la toma de datos se puede determinar con el éxito durante el proceso de alineado de las imágenes al iniciar el procesamiento, donde se debe buscar el 100% de imágenes alineadas con buena calidad y errores de proyección bajos. En este trabajo, para el procesamiento fotogramétrico, obtención y construcción de modelos de elevación digital, y generación de reportes técnicos, se utilizó el software Agisoft Metashape Pro.

### Validación de la Metodología

Esta sección presenta la validación de la metodología propuesta para el diseño y seguimiento de rutas de vuelo fotogramétricas. La misión se ejecutó en el club de aerodelismo de la ciudad de Odense en Dinamarca, con un área total de 7440 metros cuadrados con una altura de 0 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.). Se establecieron dos áreas de estudios diferentes dentro del club de aerodelismo. En el cuadro 1, se presentan los detalles de cada una de las áreas.

La plataforma UAV utilizada y sus componentes principales para la ejecución de la misión se muestran en la figura 3 y se detallan en el cuadro 2. Los parámetros fotogramétricos definidos se incluyen en el cuadro 3. Se destaca la utilización de un traslape frontal y lateral de 80% y una altura de vuelo de 50 metros. [9]

**Cuadro 1.** Características de las zonas de estudio.

Campo	Largo [m]	Ancho [m]	Área [m <sup>2</sup> ]	Elevación [m.s.n.m]
A	74	113	8362	0
B	75	105	7875	0



**Figura 3.** Sistema UAS de izquierda a derecha: Computadora, radio control y Opterra 2m.

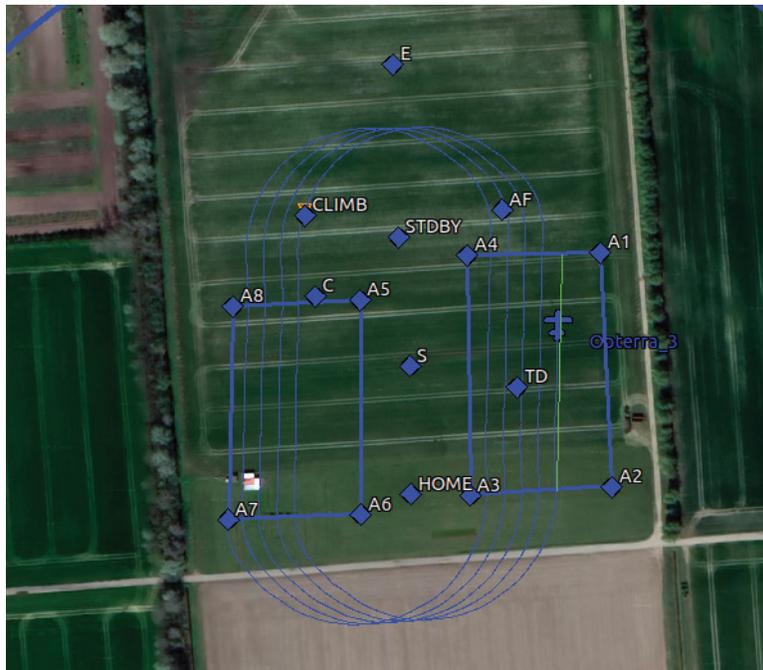
**Cuadro 2.** Descripción del hardware utilizado.

Hardware	Descripción
UAV	Opterra 2m
Piloto automático	Apogee con paparazzi UAV.
IMU	
Sensor de altitud	
Receptor de GPS	NEO-M8T GPS + magnetómetro.
Modem de enlace de comunicación	XBee Pro S1
Receptor de radio control	Futaba FASST.
Servomotores	2X 90 grados
Tipo de propulsión	1300 KV sin escobillas.
Batería	3 celdas 3300 mAh LiPo
Cámara	JeVois Smart camera: Distancia focal: 4.85 mm. Resolución: 1280 x 1024 pixeles- Área de sensor: 4.13 x 3.28 mm
Computadora	HP Envy.

**Cuadro 3.** Valores teóricos para diseño de ruta.

Parámetro	Valor
Resolución espacial (GSD)	3,33 cm/pixel
Altura de vuelo	50
Traslape Frontal	80%
Traslape Vertical	80%
Espacio entre líneas [m]	9
Distancia entre imágenes [m]	7.2
Numero de imágenes por línea	16
Número de líneas	8

La misión se diseñó y simuló utilizando el software Paparazzi, con él cual se elaboraron planes de vuelo por medio de la definición de polígonos convexos, que indican el área de estudio. Haciendo uso de los algoritmos de navegación de guiado por campo de vectores el software crea una ruta de vuelo tomando como parámetros de entrada los valores calculados [10]. En la figura 4 se puede observar la simulación de la ruta de vuelo que realiza el UAV mientras recolecta información del área de estudio, delimitadas por los polígonos mostrados.



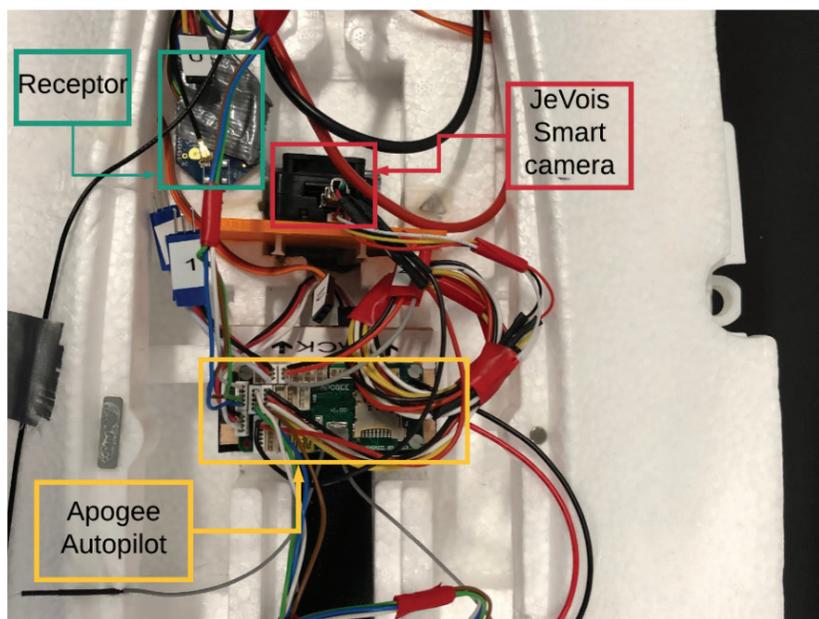
**Figura 4.** Simulación de vuelo.

Para la integración del sistema UAS fue necesario desarrollar software tanto para el control de la cámara como para la interfaz de ésta con el autopiloto. Se diseñó e imprimió una base utilizando impresoras 3D para poder fijar la cámara de tal forma que el lente apunte hacia abajo. La figura 5 muestra la integración que fue necesaria hacer en UAV para esta misión, junto con el módulo de comunicación y el controlador con autopiloto.

Para constatar el correcto seguimiento de la ruta de vuelo se hicieron dos pruebas diferentes sobre una misión automatizada: una para verificar el traslape frontal y otra para el traslape lateral. Teniendo en cuenta que el GPS utilizado en esta aplicación tiene un error asociado a su medición de aproximadamente  $\pm 4$  m en los ejes X, Y.

Para probar el traslape frontal se tomó la ubicación registrada de cada imagen y se calculó la norma euclidiana para determinar la distancia recorrida por el UAV entre cada foto. El cuadro 4 presenta un resumen de los datos obtenidos, donde la separación teórica definida es de 7.2 m.

Para la prueba de traslape lateral se utilizó la bitácora de vuelo para cuantificar la señal de error proveniente del algoritmo de navegación que indica la diferencia que existe entre la trayectoria que siguió el UAV y la trayectoria programada deseada. El cuadro 5 presenta los resultados obtenidos con estas pruebas. Tomando en cuenta que el error asociado al GPS es de  $\pm 4$  m, el promedio de las diferencias registradas está dentro de los valores esperados.



**Figura 5.** Integración de sistema en UAV Opterra 2m.

**Cuadro 4.** Resultados de prueba de traslape frontal en términos de la separación entre toma de imágenes.

Número de imágenes dentro de un rango X (en metros)						
X < 3.2		3.2 < X < 11.2		X > 11.2		Total de imágenes
6	2 %	109	79 %	26	19 %	147
Rango inferior		Rango esperado: 7.2 m ±4m		Rango superior		

**Cuadro 5.** Resultados de prueba de traslape lateral en términos de desviación con respecto el recorrido programado.

Línea de vuelo número								
Desviación	1	2	3	4	5	6	7	8
Max [m]	6.70	5.80	5.53	5.63	4.80	5.71	9.00	7.52
Promedio [m]	3.78	3.15	3.18	2.22	2.58	3.02	3.84	3.50
Media [m]	4.13	3.05	3.15	1.38	1.98	2.65	3.70	3.25

Una sección de ortomosaico de una de las zonas bajo estudio se muestra se muestra en la figura 6. Si bien el seguimiento de las rutas se logró de manera adecuada, la calidad de las fotografías resultó baja, lo cual se atribuye a las características de la cámara. No todas las imágenes se lograron alinear y las proyecciones reportaron errores grandes en el orden de varios metros. Detalles adicionales sobre la metodología y los resultados puede ser consultados en [11].

## Conclusiones y Recomendaciones

El flujo de trabajo propuesto permitió la creación de misiones automatizadas y productos fotogramétricos utilizando un UAS del tipo ala fija Opterra 2M basado en el controlador libre Apogee. Bajo el marco de trabajo Paparazzi UAV, se diseñaron trayectorias de vuelo, teniendo en cuenta parámetros y requisitos predefinidos, y se lograron ejecutar las misiones de forma controlada y correcta. Aunque este trabajo se enfocó primariamente en la programación y seguimiento de trayectorias, con una cámara JeVois Smart se intentó construir nubes de puntos y ortomosaicos con una resolución de 3.3 cm/pixel, que permitieron parcialmente evaluar la metodología desde el punto fotogramétrico.

Se espera que la metodología propuesta sea útil en el establecimiento de protocolos para la toma de datos con aeronaves de ala fija, las cuales, por sus características de vuelo, requieren de una programación cuidadosa y detallada. Trabajo a futuro contempla la extensión de este trabajo utilizando dispositivos de imagen con mejores características para fotogrametría, incluyendo cámaras multispectrales. Debido a las dificultades de realizar maniobras de aterrizaje en áreas abiertas pequeñas, se explorará la utilización de plataformas del tipo VTOL (*vertical take-off and landing*), las cuales tienen la capacidad de realizar despegues y aterrizajes verticales, para una mayor flexibilidad durante el aterrizaje y despegue.



**Figura 6.** Muestra de ortomosaico para una parte de una de las zonas de prueba utilizadas, reconstruida luego del procesamiento de las imágenes.

## Agradecimientos

Los autores agradecen al personal del UAS Center, SDU por toda su ayuda y asesoramiento para la ejecución del presente trabajo, así como a la Vicerrectoría de Investigación y Extensión por el apoyo de esta iniciativa a través de un proyecto de investigación estudiantil. La pasantía asociada a este proyecto se realizó con el apoyo de las becas CONARE para movilidad estudiantil, administradas por la rectoría del ITCR, y la fundación CRUSA.

## Referencias

- [1] Paparazzi UAV, «Paparazzi UAV,» 18 diciembre 2018. [En línea]. Available: [https://wiki.paparazziuav.org/wiki/Main\\_Page](https://wiki.paparazziuav.org/wiki/Main_Page). [Último acceso: 29 enero 2019].
- [2] H. Hooby, «Opterra 2m wing pnp,» 25 mayo 2018. [En línea]. Available: <https://www.horizonhobby.com/opterra-2m-wing-pnp-p-efl11175>. [Último acceso: 20 enero 2019].
- [3] Paparazzi The free autopilot, «Apogee,» 2 agosto 2018. [En línea]. Available: <https://wiki.paparazziuav.org/wiki/Apogee/v1.00>. [Último acceso: 15 enero 2019].
- [4] A. Ferencz-Appel, S. Arriola-Valverde y R. Rimolo-Donadio, «Fotogrametría terrestre con sistemas aéreos no tripulados», Revista *Investiga TEC, Instituto Tecnológico de Costa Rica. vol 1, 2018*, p.p. 31-33.
- [5] S. Arriola-Valverde, R. Rimolo-Donadio, D. M. Solórazano-Quintana, «Generación de modelos de elevación digital con fotogrametría UAS,» en Memorias Congreso Latinoamericano de Ingeniería Agrícola (CLIA), San José, Costa Rica, 4-7 Junio, 2018.
- [6] E. Gutiérrez-Leiva, «Desarrollo de plataforma uas para aplicaciones de fotogrametría,» Proyecto Final para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Electrónica, Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR), Cartago, 2017.
- [7] E. Gutiérrez.-Leiva. Sergio, S. Arriola-Valverde, L. A. Chavarria-Zamora y R. Rimolo-Donadio, «Desarrollo de una Plataforma de Ala Fija para aplicaciones en Fotogrametría,» *Tecnología en marcha*, vol. 31, n° 4, pp. 133-141, 2018.
- [8] Jevois Inc, «JEVOIS SMART MACHINE VISION,» 15 diciembre 2018. [En línea]. Available: <https://www.jevois-inc.com/pages/what-is-jevois>. [Último acceso: 15 enero 2019].
- [9] S. A. Arriola-Valverde, «Methodology to determine dynamic displaced soil volume through Photogrammetry UAS,» Tesis para optar por el grado de Maestría en Electrónica, Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR), 2018.
- [10] Y. A. Kapitanyuk, Hector Garcia de Marina, A. Proskunikov y M. Cao, «Guiding vector field,» *IFAC-PapersOnLine*, 2017.
- [11] A. Ferencz-Appel, «Methodology For The Generation of Autonomous Photogrammetric Missions with fixed-wing UAS Platforms,» Proyecto Final para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Electrónica, Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR), 2019.

# Vidrio molido como tecnología sostenible en el concreto hidráulico

## Grounded glass as a sustainable technology in hydraulic concrete

Andrés Rojas-Ramos<sup>1</sup>

---

Rojas-Ramos, A. Vidrio molido como tecnología sostenible en el concreto hidráulico. *Tecnología en Marcha*. Vol. 34, especial. Movilidad Estudiantil. Octubre 2021. Pág 13-18.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v34i5.5907>



<sup>1</sup> Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.  
Correo electrónico: [andres15rojas96@gmail.com](mailto:andres15rojas96@gmail.com)  
 <https://orcid.org/0000-0001-9129-9295>

## Palabras clave

Residuos vítreos; vidrio molido; sustitución de cemento Portland; sostenibilidad; tecnología en concreto.

## Resumen

El concreto hidráulico es considerado como el recurso hecho por el ser humano más consumido, no obstante, la elaboración de este implica una contaminación en el medio ambiente de manera directa e indirecta. Dentro de los componentes del concreto hidráulico se presenta cemento hidráulico, el cual, además de corresponder al elemento más caro del concreto hidráulico, también es el que provoca mayor contaminación en su fabricación, emitiendo una alta cantidad de CO<sub>2</sub>. El presente artículo expone una serie de características y beneficios que posee el uso de vidrio molido como sustituyente parcial del cemento en el concreto hidráulico, siendo esta una propuesta prometedora para acercar el mundo de la construcción a la sostenibilidad. Investigadores alrededor del mundo, se han encargado de buscar la optimización de la mezcla de concreto tomando en cuentas las variables que están ligadas a esta. Dichas investigaciones han obtenido resultados positivos, mostrando que esta propuesta implica ventajas no solo ambientales, si no también mecánicas y económicas.

## Keywords

Glass waste; grounded glass; substitution for Portland cement; sustainability; concrete technology.

## Abstract

Hydraulic concrete is considered as the most consumed human-made resource; however, its elaboration implies a direct and indirect environment pollution. The hydraulic cement is one of the principal components of hydraulic concrete, which, besides to be the most expensive element of hydraulic concrete, is also the one that causes the greatest contamination in its manufacture, emitting a high amount of CO<sub>2</sub>. This article discloses some of the characteristics and benefits of using ground glass as a partial substitute for cement in hydraulic concrete, being this a promising proposal to bring the world of construction closer to sustainability. Researchers around the world have been in charge of seeking the optimization of the concrete mix considering the variables that are linked to it. Those investigations have obtained positive results, showing that this proposal implies not only environmental, but also mechanical and economic advantages.

## Introducción

El ámbito de la construcción presenta una alta demanda alrededor del mundo, provocando así una demanda sumamente alta de materiales constructivos, tal como es el caso del concreto hidráulico. La elaboración de este y sus componentes conlleva una contaminación al medio ambiente directa e/o indirectamente.

Dentro de las soluciones que se han propuesto para disminuir el impacto ambiental que provoca el cemento hidráulico es realizar una sustitución de este por un material más amigable con el medio ambiente.

Investigadores se han encargado de encontrar una variedad de materiales aptos para sustituir el cemento, materiales con características aglutinantes. El vidrio molido, además de presentar propiedades aglutinantes, es un material de fácil acceso con cualidades ecológicas, según Cabezas & Zamora [1] es un material 100% reciclable, por lo tanto, es una solución con alto potencial de uso y desarrollo. Para lograr la utilización correcta de este material como componente del concreto hidráulico, el producto final debe de cumplir con los mínimos de las normas correspondientes en Costa Rica.

El presente documento presenta una investigación cualitativa enfocada en las ventajas que presenta el uso del vidrio molido como una tecnología sostenible en el concreto hidráulico, siendo esta una oportunidad de mejora ambiental y económica.

## Concreto Hidráulico

El concreto hidráulico es definido, según la Portland Cement Association [2], como una mezcla de dos componentes, los agregados y la pasta (ver figura 1). Los agregados son subdivididos en dos tipos, los agregados gruesos y finos. Según las normas ASTM, los agregados finos poseen un tamaño de máximo nominal menor a 4.75 mm, estos suelen ser arenas, las cuales poseen diferentes características relacionadas a su proveniencia. De igual manera, se denominan los agregados gruesos a los cuales poseen un tamaño entre 4.75 mm y 150 mm, estos suelen ser piedras, que, al igual que la arena, poseen características diferentes relacionadas a su punto de extracción. Por otro lado, la mencionada pasta del concreto hidráulico corresponde a producto de la mezcla de material cementante con agua. El material cementante utilizado en el concreto hidráulico se denomina cemento hidráulico, el cual, según INTECO [3], corresponde a un material inorgánico finamente molido, el cual es producto de la mezcla de material calcáreo y material arcilloso. El cemento hidráulico posee características aglutinantes cuando es hidratado. Al crearse esta pasta se producen enlaces químicos, provocando así una mezcla endurecida con una resistencia y estabilidad.



**Figura 1.** Diagrama de componentes del concreto hidráulico.

El cemento hidráulico es el componente más caro del concreto y, por lo general, el que implica mayor contaminación en su obtención. La Universidad Nacional de Colombia [4] indica que, en el 2014 la industria del cemento aportó entre 2800 y 3500 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, lo que constituye entre el 5% y el 8% del total de las emisiones resultantes de actividades humanas.

El tipo de cemento hidráulico más utilizado es el Portland, este se constituye de Clinker y yeso. Al ser este el material cementante más utilizado, se han creado diferentes tipos de este a lo largo del tiempo, cada tipo se presenta para un uso específico. Cuevas Kauffmann, [5] describe los 5 principales tipos de cemento Portland de la siguiente manera:

- Tipo I: Cemento para uso general.
- Tipo II: Cemento para uso general con calor de hidratación menor y moderada resistencia al ataque de sulfatos.
- Tipo III: Cemento con alta resistencia a temprana edad.
- Tipo IV: Cemento con bajo calor de hidratación
- Tipo V: Cemento con alta resistencia al ataque de sulfatos.

Se debe de recalcar que, el concreto hidráulico es el material hecho por el ser humano más usado en el mundo, según lo confirma la Global Cement and Concrete Association [6], es el recurso más consumido, siendo únicamente superado por el agua. Debido a esto, es de suma importancia procurar que, tanto el material, como el proceso directo e indirecto de su obtención, sean amigables con el medio ambiente.

### **Tecnologías sostenibles modernas en el concreto hidráulico**

Como fue mencionado anteriormente, el concreto hidráulico es un material con una alta demanda mundial, además, al no ser un material natural, este produce contaminación al medio ambiente. Debido a esto, se han realizado investigaciones para mejorar el aspecto sostenible del concreto a lo largo del tiempo.

Uno de los retos más grandes del ámbito de la construcción que se han desarrollado en los últimos años, ya que, a pesar de que se poseen tecnologías modernas y mejoras en los procesos, sigue existiendo un tradicionalismo en los materiales utilizados. Es necesario el avance de las investigaciones con respecto a la obtención de soluciones sostenibles óptimas, de esta manera mantener un compromiso con el medio ambiente y, a su vez, mejorar el desempeño de los productos.

Dentro de las mayores ventajas que conlleva trabajar concretos sostenibles Payá [7] indica que, obtener opciones sostenibles en el concreto hidráulico no solo puede significar una mejor en el aspecto ambiental, si no también económica.

Actualmente se tienen estudios que buscan realizar una sustitución parcial o total de los componentes del concreto hidráulico. Esta sustitución procura utilizar materiales más ecológicos sin comprometer el desempeño y la durabilidad del producto.

Parte de los materiales utilizados en las sustituciones investigadas de los últimos años se encuentran los proyectos de GAEDICKE [8] y Bosi [9], los cuales estudian el uso de residuos de obras civiles como material reciclable, también se tiene el proyecto de IBRAHIM [10], donde se utiliza corteza de palma en diferentes porcentajes de incorporación. Además, Bernardo [11] aporta información con su estudio en el ámbito de la utilización de cascara de arroz, en el cual, a nivel nacional se encuentra el estudio de Martínez [12].

### **Vidrio reciclable en el concreto**

Tal como fue mencionado, existe un amplio mundo de investigación en la sustitución de los componentes del concreto hidráulico, dentro del cual se encuentra la utilización de vidrio reciclado.

El vidrio posee características que lo catalogan como un ecológico, Cabezas & Zamora [1] indican que es un material 100% reciclable, o sea, puede ser reutilizado y reciclado innumerables veces sin perder su calidad. Además, tomando en cuenta que, según Flores [13], el vidrio representa el 7% de los residuos en la basura, corresponde a un material con un alto potencial de uso y aprovechamiento.

Garza [14] indica que en Costa Rica se cuenta con el 14% del total de vidrio que se recupera en Centroamérica para ser reciclado. Además, se cuenta con aproximadamente 200 centros de acopio públicos y privados que gestionan la separación y comercialización de residuos para así proveer a diferentes empresas de reciclaje. Dado esto, se identifica a Costa Rica como un país con una oportunidad de aprovechamiento del vidrio alta.

El uso del vidrio como componente del concreto hidráulico posee variables en su incorporación, estas se basan en el color y composición del vidrio, tamaño del vidrio y cantidad incorporada.

BIGNOZZI [15] compara el comportamiento de diferentes tipos de vidrios en el concreto hidráulico, indicando que el vidrio tipo transparente soda-cal presenta las menores reacciones químicas que perjudican el concreto. De igual manera, los estudios de CORINALDESI [16], SHAO [17], FEDERICO [18] y JANI [19] indican que no se identifican reacciones químicas que perjudiquen al concreto con sustitución parcial del cemento por vidrio al poseer un tamaño de partícula de  $75\mu\text{m}$  o menor, y por esta misma razón no se recomienda utilizar este material como agregado fino, si no, como sustitución o adición al cemento.

## Beneficios en el concreto

Los estudios que realizan sustitución en el cemento por vidrio molido llevan un camino correcto para lograr obtener mezclas óptimas. Si bien es cierto que aún faltan avances en este ámbito, se han obtenido resultados positivos investigando las diferentes variables correspondientes en el caso.

KHMIRI [20], concluyen que, al evaluar tamaños de vidrio de 100, 80, 40 y  $20\mu\text{m}$  con un porcentaje de sustitución de 20% en un cemento CP I, se obtiene una mejora en el desempeño mecánico de un 2% al utilizar un tamaño de vidrio de  $20\mu\text{m}$ .

Utilizar vidrio molido como componente del concreto representa una ventaja en el ámbito ambiental, provocando un acercamiento al concreto sostenible. Además, al utilizar el vidrio molido como sustitución del cemento, se reduce el consumo de cemento, provocando una reducción de emisión de gases contaminantes. Al utilizar menos cantidad de este material, se verá reducida la producción de este, por lo tanto, menor contaminación de parte de esta industria. Por otro lado, al reducir el consumo de cemento en las mezclas de concreto, y recordando que este es el componente más caro de la mezcla, significaría un ahorro económico para los usuarios. Siendo así sustituido por un material más barato en el mercado.

## Conclusiones

El uso de vidrio molido en el concreto ha presentado resultados favorables en el desempeño del concreto hidráulico, a su vez, contribuye con el desarrollo de un sistema sostenible en el ámbito de la construcción. Además de presentar mejoras mecánicas, el uso de vidrio molido en el concreto hidráulico provoca una reducción de uso de material cementante, reduciendo así las emisiones de  $\text{CO}_2$ . A pesar de que es un ámbito en el que hacen falta investigaciones, los estudios han llevado un camino correcto al buscar la optimización.

Además, el vidrio es un material que posee un alto potencial de aprovechamiento en Costa Rica, además de ser de fácil acceso, tiene características ecológicas.

Por lo tanto, el uso de este material en la mezcla de concreto hidráulico, abre las puertas a investigaciones futuras buscando obtener soluciones ecológicas, de esta manera obtener beneficios ambientales y económicos.

## Referencias

- [1] J. Cabezas, L. Zamora. (2019). RECICLAJE DE ENVASES DE VIDRIO. [Online] Recuperado de: [http://www.csj.gob.sv/ambiente/images/RECICLAJE\\_ENVASES\\_VIDRIO.pdf](http://www.csj.gob.sv/ambiente/images/RECICLAJE_ENVASES_VIDRIO.pdf)
- [2] Portland Cement Association. (2004). Diseño y control de mezclas de concreto. México: PCA, 456p.
- [3] INTECO. (2015). Construcción. Cemento hidráulico. Especificaciones y Requisitos.
- [4] Universidad Nacional de Colombia. (17 de septiembre de 2015). Reducir el impacto ambiental en la producción de cemento. [Online] Recuperado de: <https://minas.medellin.unal.edu.co/noticias/facultad/396-reducir-el-impacto-ambiental-en-la-produccion-de-cemento>
- [5] R. L. Cuevas Kauffmann. (2017). Concreto [Diapositivas de Power Point]
- [6] Global Cement and Concrete Association. (2020). Página principal. Obtenido de: <https://gccassociation.org>
- [7] J. Payá. (2012). La "transmutación" sostenible de los residuos para nuevas materias primas en el ámbito del concreto. [Online] Recuperado de: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/50095/Paya%20-%20La%20%22trasmutacion%22%20sostenible%20de%20los%20residuos%20para%20nuevas%20materias%20primas%20en%20el%20ámbito%20del....pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [8] C. GAEDICKE et al. (2015). Effect of recycled materials and compaction methods on the mechanical properties and solar reflectance index of pervious concrete. *Revista Ingeniería de Construcción*, v. 30, n. 3, p. 159-167. Obtenido de: [https://scielo.conicyt.cl/pdf/ric/v30n3/en\\_art01.pdf](https://scielo.conicyt.cl/pdf/ric/v30n3/en_art01.pdf)
- [9] J. M. Bosi (2020). PROPOSIÇÃO DE MÉTODO DE DOSAGEM DE CONCRETO PERMEÁVEL COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS FINAMENTE COMINÚIDOS. FURB, Blumenau, Brasil.
- [10] H. A. IBRAHIM et al. (2016). Effect of palm oil clinker incorporation on properties of pervious concrete. *Construction and Building Materials*, v. 115, p. 70-77. Obtenido de: [https://www.researchgate.net/publication/301246618\\_Effect\\_of\\_palm\\_oil\\_clinker\\_incorporation\\_on\\_properties\\_of\\_pervious\\_concrete](https://www.researchgate.net/publication/301246618_Effect_of_palm_oil_clinker_incorporation_on_properties_of_pervious_concrete)
- [11] A. Bernardo et al. (2018). Concreto permeável com cinza de casca de arroz residual Permeable concrete with residual rice hull ash. Obtenido de: [https://www.researchgate.net/publication/330088875\\_Concreto\\_permeavel\\_com\\_cinza\\_de\\_casca\\_de\\_arroz\\_residual\\_Permeable\\_concrete\\_with\\_residual\\_rice\\_hull\\_ash](https://www.researchgate.net/publication/330088875_Concreto_permeavel_com_cinza_de_casca_de_arroz_residual_Permeable_concrete_with_residual_rice_hull_ash)
- [12] P. Martínez (marzo de 2020). Comportamiento físico y mecánico de elementos no estructurales a base de concreto elaborado con fibra de cáscara de arroz. Tecnológico de Costa Rica.
- [13] V. Flores (n.d.). RECICLAJE DE VIDRIO. [Online] Recuperado de: [https://www.academia.edu/7165632/RECICLAJE\\_DE\\_VIDRIO](https://www.academia.edu/7165632/RECICLAJE_DE_VIDRIO)
- [14] J. Garza. (14 de agosto de 2019). Costa Rica es el segundo país de Centroamérica que más vidrio recupera y recicla. *La Republica*.
- [15] M. C. BIGNOZZI. (2015). Glass waste as supplementary cementing materials: The effects of glass chemical composition. *Cement and Concrete Composites*, v. 55, p. 45-52.
- [16] L. N. P. CORINALDESI. (2005). Reuse of ground waste glass as aggregate for mortars. *Waste Management*, v. 25, n. 2, p. 197-201.
- [17] Y. SHAO. (2000). Studies on concrete containing ground waste glass. *Cement and Concrete Research*, v. 30, n. 1, p. 91-100.
- [18] L. M. FEDERICO et al. (2009) Waste of glass as a supplementary cementitious material in concrete-critical review of treatment methods, *Cement and Concrete Composites*, v. 31, n. 8, p. 606-610.
- [19] Y. JANI et al. (2014). Waste glass in the production of cement and concrete—A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 2, n. 3, p. 1767-1775.
- [20] A. KHMIRI et al. (2013). Chemical behavior of ground waste glass when used as partial cement replacement in mortars. *Construction and Building Materials*, v. 44, p. 74-80.

# A novel diagnosis system concept for Safe Distributed Systems

## Un novedoso concepto de sistema de diagnóstico para Sistemas Distribuidos Seguros

Javier Dario Leon-García<sup>1</sup>, Sebastian Imle<sup>2</sup>

---

Leon-García, J.D; Imle, S. A novel diagnosis system concept for safe distributed systems. *Tecnología en Marcha*. Vol. 34, especial. Movilidad Estudiantil. Octubre 2021. Pág 19-27.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v34i5.5910>



- 1 Mechatronics Engineering Academic Area, Costa Rica Institute of Technology. Cartago, Costa Rica. Email: [darox72leon@hotmail.com](mailto:darox72leon@hotmail.com)  
 <https://orcid.org/0000-0002-0520-9386>
- 2 Institute of Machine Components, University of Stuttgart. Stuttgart, Germany. Email: [sebastian.imle@gmx.de](mailto:sebastian.imle@gmx.de)

## Keywords

Diagnosis system; distributed system; safety; system architecture; state machine.

## Abstract

This article is based on the design of a diagnosis system for the Energize to Trip Actuation System (ETTAS). The ETTAS project proposes a sustainable and safe alternative to operate valves in subsea production systems without contaminating the subsea with hydraulic fluids. As this is a *Safe Distributed System*, its design requirements seek a Safety Integrity Level of 2 (SIL 2), which involves an implementation of a diagnosis system. The diagnosis system presented here is a concept which can be applied to *Safe Distributed Systems* in general. The method used to design the *Diagnosis System Concept* involves the formulation of requirements, the generation of a knowledge base, the approach and selection of proposals, and the design of the final concept. The resulting concept is shown by means of state machines and a *Diagnosis System Architecture*. It is concluded that the concept increases the diagnostic capabilities in the *Safe Distributed System* since it is time independent to change states, it minimizes the amount of functionalities and takes advantage of shared memory to make it feasible to diagnose different components in the system.

## Palabras clave

Sistema de diagnóstico; sistema distribuido; seguridad; arquitectura de sistema; máquina de estado.

## Resumen

El presente artículo está basado en el diseño de un sistema de diagnóstico para el Energize to Trip Actuation System (ETTAS). El proyecto ETTAS propone una alternativa sostenible y segura para accionar válvulas en sistemas de producción submarina sin derramar fluidos hidráulicos contaminantes en el fondo marino. Al ser este un *Sistema Distribuido Seguro*, sus requerimientos de diseño buscan un Safe Integrity Level 2 (SIL 2), lo cual hizo necesaria la implementación de un sistema de diagnóstico. Éste último es presentado aquí como un concepto para ser aplicado en Sistemas Distribuidos Seguros en general. El método utilizado para el diseño del *Concepto del Sistema de Diagnóstico* involucra el planteo de requerimientos, la generación de una base de conocimiento, el planteamiento y selección de propuestas y el diseño del concepto final. El concepto resultante es mostrado a través de máquinas de estado y una *Arquitectura del Sistema de Diagnóstico*. Se concluye que el concepto incrementa las capacidades de diagnóstico en el *Sistema Distribuido Seguro* ya que es independiente del tiempo para cambiar sus estados, minimiza la cantidad de funcionalidades y se aprovecha de la memoria paralelamente compartida para ser implementable para diagnosticar distintos componentes en el sistema.

## Introduction

Distributed systems encompass many of the most significant technologies of recent years. They comprise a wide range of systems, but for the purposes of this document, it is focused in localized distributed systems which can be found in Aircrafts, Vehicles, or in Subsea Production Systems

for example. All of them contain several independent hardware and/or software elements, usually known as nodes [1]. They communicate and coordinate actions by exchanging messages [2], as a collection of systems that intercommunicate themselves to achieve a complex function.

Adding the safety property to the previous definition, involves certain specifications in it. The most relevant, regarding this document, are a safe communication and a Diagnostic Coverage. These additions can be evidenced by Nagaura [3] for example, where the invention of a highly reliable distributed system made up of fifteen systems performs a safe communication by ensuring that message data is not corrupted during the process of sending and receiving of a message. Secondly, the Diagnosis Coverage (DC) is the ratio of the detected failure rate to the total failure rate of the system [4]. The DC has an indirect influence in a requirement of safe distributed system known as Safe Integrity Level (SIL).

The SIL is a discrete level for specifying the safety integrity requirements of the safety functions to be allocated to Electrical/Electronic/Programmable Electronic safety - related systems [5]. There are four different levels where the safety of a system can be categorized, where SIL 4 is the highest level of Safety integrity [6]. To get a high SIL, one of the strategies that the design of a system can include is to reach a high DC through a high detectability of dangerous failures by a diagnosis system, as it is shown by Leon [4]. To diagnose a failure is critical in the DC, but also the spurious effect is highly relevant for the safety in systems. That is why diagnosing a system is especially difficult, because they must be validated to guarantee their integrity in the DC to have effect in the SIL.

The design of the diagnosis system mentioned before is the main topic of the present document. A diagnosis system is defined as a type of supporting system that gives possible explanations about the failures in a target system through the collection and analysis of information about the system status [7] [8]. According to Leon [4], diagnosis systems are an integral part of machines and devices having complex technological functions, such as components in distributed systems. Moreover, it is known that diagnostic capability of a system has a high impact on the design of safe distributed systems [9], since the increase of components and functionalities comes with a higher potential for failures.

Nowadays, the implementation of diagnosis systems in distributed systems has taken more importance due to the continuously increasing demand in higher system standards from the society as well as the increasing complexity of overall system design in general. For example, Kulkarni [10] has proposed an innovative technique to detect faulty nodes in a distributed system by using an accurate estimation model to find out which node would be more likely to be faulty; Kandasamy [11] presents us with a method to diagnose actuators in distributed fashion using processors, in order to provide a global view of their faulty status and shut them down before the system reaches an unsafe or a critical condition.

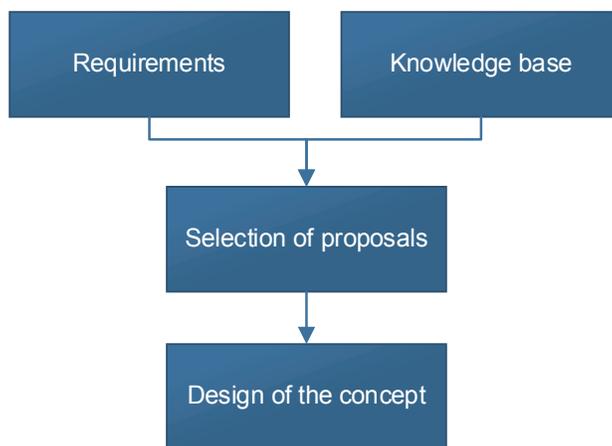
In accordance with the examples above, the diagnosis concept presented in this document was designed for the ETTAS project of Aalen University. This consists of a system architecture and operational strategies for high safety and reliable motion control systems [4]. The design is intended to perform an energize-to-trip safety function whenever it is required to by a subsea production system [4]. The energize-to-trip function is a novel subsea actuation concept proposed by ETTAS because, unlike current hydraulic subsea safety valves, it implements a mechatronic actuation system to close valves without contaminating the subsea with hydraulic fluids [12].

To guarantee that the ETTAS system would be able to safely perform such an important function, it has the goal to reach an SIL 2 [4]. As said before, this implies that diagnosis systems must be implemented to keep track of the operational capability of the system. As safety plays a big role in the above-mentioned subsea system, it is known throughout the document as *Safe Distributed System*.

For a better understanding, an explanation of terms used in this document are explained as following. The *Target Component* is the component that belongs to a node that is intended to be diagnosed. *Diagnosis Test* is one of multiple tests that the diagnosis system can perform in the *Target Component* to obtain specific desired information. The *Diagnosis System Architecture* is basically diagrams of software and hardware elements that shows the relation among them, while a *Diagnosis System Concept* is referred as the step design of concept in a normal design procedure, which in this case encompasses *the Diagnosis System Architecture* and other elements.

## Method

Figure 1 summarizes the method used to reach the design the *Diagnosis System Concept*.



**Figure 1.** Method used to design the Diagnosis System Concept.

It starts with the requirements and knowledge base. These two steps are done parallel to each other because the requirements are normally written while the knowledge base is being built. The knowledge base is an essential first step of diagnosis systems. In fact, Krysander [7] asserts that “diagnosing a system is a delicate task that requires a good knowledge of the system”. Moreover, as distributed systems have a high level of complexity, it is totally needed to have a high knowledge of the system as well to make proposals in the design that can improve the reliability. By last, techniques to analyze diagnosis systems like FMEDA (Failure Mode and Effects Analysis), recognized by standards like IEC 61508 (International Electrotechnical Commission), considers the generation of a knowledge base about the system [4].

Leon [4], developed the knowledge base with three different studies. First, the hierarchy structure of the *Safe Distributed System* is decomposed and represented in terms of failure modes. Secondly, all the measurements in the system are listed to be further related to the studied failure modes. Finally, the *Target Component* is decomposed into the simplest level of the hierarchy structure in order to relate failure modes to it and identify where and how could it potentially fail.

The selection of proposals considers two steps. First, the proposals are made regarding the nature of the diagnosis system in concern. This considers the detection of boundaries where the *Target Component* can move. Moreover, proposals of the behavior of the *Target Component* during a *Diagnosis Test* are made in this step. By last, proposals of the failures that can occur in the system come from knowledge base. These proposals are then evaluated through a desired evaluation method. The optimal proposals are hence selected based on the evaluation criteria and the requirements.

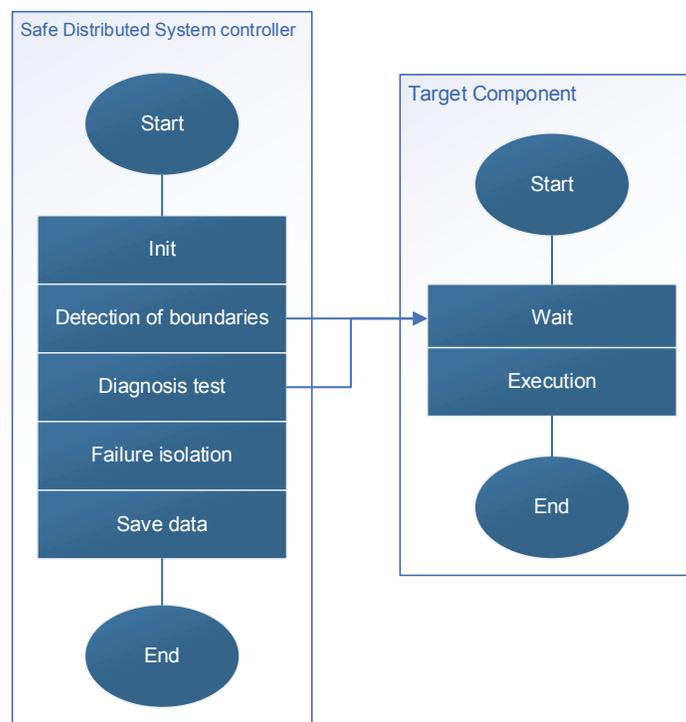
The selected proposals plus the fulfillment of the requirements formulates and gives shape to the method used for the design of the *Diagnosis System Concept*. The algorithm involved can be represented through state machines, flowcharts, UML charts, tables, or any other kind of representation that shows the functioning principles of the concept.

## Results

The resulting *Diagnosis System Concept* is presented by means of the diagrams shown in this section. This stage was achieved after the procedure explained in the method section.

Figure 2 shows an overview of the state machine to implement a *Diagnosis Test* as software. A single state machine is implemented in the *Safe Distributed System controller*, which means that it is in a different node than the *Target Component*. Additionally, two states are added to the *Target Component* to execute commands from the diagnosis system.

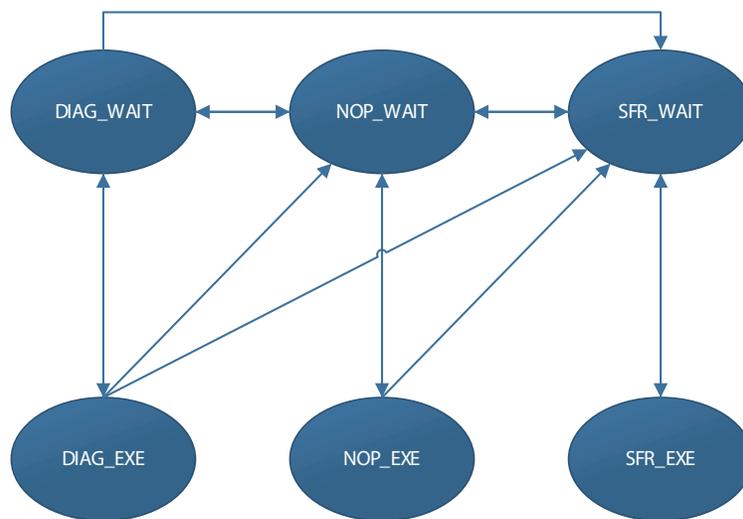
It is worth mentioning that each state in figure 2 can be composed of a substate machine. This makes the debugging of the diagnosis system easier to carry out since the sub state where the failure could occur can be saved as part of the diagnosis results. Consequently, the failure detection capability is greatly improved.



**Figure 2.** State machine of the software of a Diagnosis Test [4].

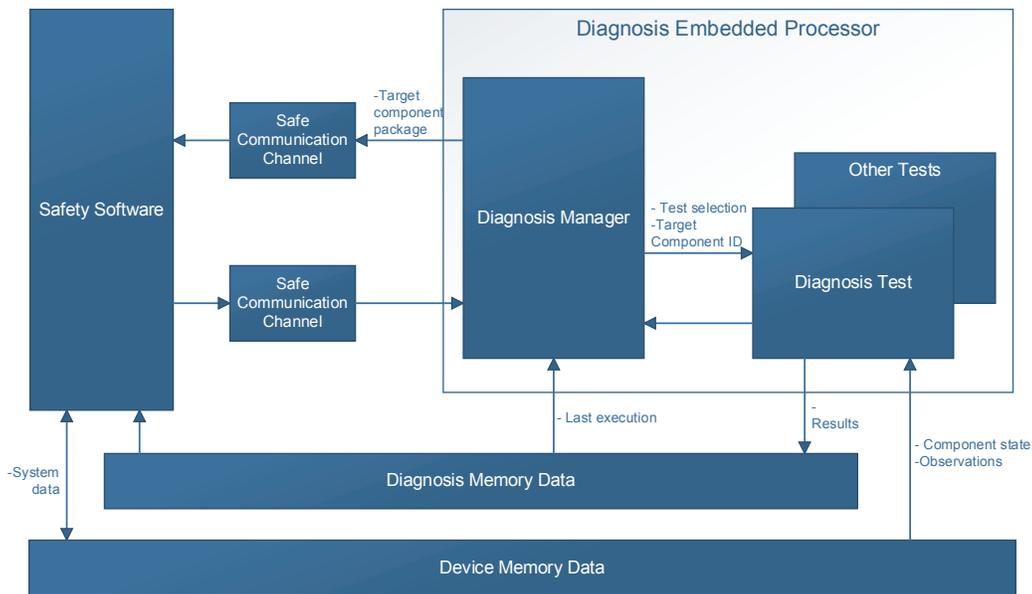
Figure 3 shows the state machine in the *Target Component* that needs to be diagnosed, in other words, it is a zoomed view of the state machine in the *Target Component* shown in figure 3. The state machine has three operating modes namely normal operation (NOP), diagnosis (DIAG) and safety failure request (SFR). Generally, components have a NOP mode when they consistently perform their intended function in the system. In *Safe Distributed Systems*, components could have an operation mode for SFR, which has priority over other states and its existence fulfills the safety requirements of the system. The DIAG state allows the component to perform needed functions and execute commands while running *Diagnosis Tests* in the system. Nevertheless, the DIAG state has lower priority in the state machine.

It is worth mentioning that these three operation modes are divided into two different states: WAIT and EXE. In the WAIT state, the component waits for the commands from a controller while the system is in the corresponding operation, while in the EXE state, it executes commands that come from the controller.



**Figure 3.** State machine in the Target Component [4].

Figure 4 shows a block diagram of the top view of the *Diagnosis System Architecture*. This diagram is a generalization of the architecture shown in [4]. There are two levels of blocks based on hardware hierarchy. The first level consists of implemented hardware and the second level involves functionalities programmed in the hardware. As a result, the first level consists of the *Safety Software*, *Safe Communication Channels*, the *Diagnosis Embedded Processor*, the *Diagnosis Memory Data*, and the *Device Memory Data*. The second level consists of the *Diagnosis Manager* and *Diagnosis Tests*. Moreover, the blocks are connected by arrows known as transitions.



**Figure 4.** Top view of the diagnosis system architecture.

### First level

The *Safety Software* is one node of the *Safe Distributed System*. Every command to the *Target Component* goes first to the *Safety Software* to perform a safe communication via Black Channel [4] [9]. The *Diagnosis Embedded Processor* is another node in charge of managing the diagnosis system. The *Safe Communication Channels* represent the communication interface between the *Safety Software* and other nodes. The *Diagnosis Memory Data* contains results of the *Diagnosis Tests* carried out by the *Diagnosis Embedded Processor*. The *Device Memory Data* stores the actual status data of the *Safe Distributed System*. The physically separated memories are owned by a single processor. The owner has the right to read and write this memory, the other nodes have read-only access rights if necessary. A separate safety concept based on interlocked dual-ported internal block RAM (BRAM) of the controller is developed for the access without interference.

### Second level

According to Leon [4], the *Diagnosis Manager* manage and execute all the *Diagnosis Tests*. The *Diagnosis Test* is performed to get information about the *Target Component*, however other *Diagnosis Tests* can be carried out in different nodes to generate more diagnosis information about the entire *Safe Distributed System*.

### Transitions

The transitions in figure 4 can be read as a point of view of the *Diagnosis Test* with the following logic in order to get an easy understanding of their functionality:

- The *Diagnosis Test* takes the ID of the *Target Component* and its execution command from the *Diagnosis Manager* as input.
- During the execution, the *Diagnosis Test* can read the *Target Component* information by accessing the *Device Memory Data*.

- To send commands to the *Target Component*, the *Diagnosis Test* builds a package and sends it through the *Safe Communication Channel*. The *Safety Software* receives the package and executes the command in the *Target Component*, after which it actualizes the *Target Component* information in the *Device Memory Data*.
- The results of the *Diagnosis Test* are written in the *Diagnosis Memory Data* so that the *Diagnosis Manager* can access them.
- The *Diagnosis Manager* uses the result named “last execution” from the *Diagnosis Memory Data* to schedule a new execution of the corresponding *Diagnosis Test*.

## Conclusions

The main advantage of the presented Diagnosis System Concept is that it is not time dependent but is instead dependent on the change of states. This means that the diagnosis system is not influenced by timeout failures, so the time when diagnosis commands are executed is not relevant for it. The only way to change states in Figure 2 is by the compliment of statements plus the correct state changing in Figure 3. The timeout detection is implemented in the safe communication software. Nevertheless, the time which the *Target Component* requires to update its information in the *Device Memory Data* shall not be critical to the bus timing. Therefore, requirements like a long baud rate of communication between nodes due to safe communication does not constraint the *Diagnosis System Concept*. In fact, Birman [13] asserts that many distributed systems detect failures using timeouts, which is a problem since it forces the application to overcome inaccurate failure detections in software.

The *Diagnosis System Concept* considers a synchronization of states between the *Safe Distributed System* controller and the *Target Component*. As *Safe Distributed Systems* are complex systems, the synchronization between nodes makes the designed diagnosis system generic enough to be applied to a wide variety of distributed systems.

The designed concept keeps the integrity of the *Target Component* since it does not implement additional functions on it. The only requirement of this concept is that the *Target Component* has two states to execute diagnosis commands. These diagnosis commands can come from different *Diagnosis Tests*, which are carried out by the *Diagnosis Embedded Processor*.

Finally yet importantly, the fact that the concept takes advantage of the parallelly shared memory characteristics of this *Safe Distributed System*. This is a family of systems where multiple processors share memory, in this case the *Device Memory Data*. This property, the time independency, and the reduction of new functions in the *Target Component* increases the diagnostic capabilities of the *Safe Distributed System*. This basically means that the concept is able to be implemented for different nodes in the *Safe Distributed System*.

## Recommendations

This diagnosis concept was developed for a specific *Diagnosis Test* of the ETTAS project. Therefore, it is recommended to use the concept to diagnose other components in the nodes of the mentioned *Safe Distributed System*. This could lead to a more generalized Diagnosis System Concept, which would be able to increase its diagnostic capabilities. After implementing said concept in a desired component, an analysis like the FMEDA can be performed to get the respective SIL of Target Components and evaluate the impact of the Diagnosis System Concept in the Safe Distributed System.

The state machine in the *Safe Distributed System* controller depends on the safe communication software to send commands and reads data from the components. To achieve a safe communication low baud rates of communication could be required in the safe communication software. Consequently, the concept designed can find limitations to diagnose variables of the *Target Component* that require a sampling rate greater than the baud rate of communication.

## References

- [1] M. van Steen and A. S. Tanenbaum, "A brief introduction to distributed systems", *Computing*, vol. 98, no. 10, pp. 967–1009, 2016. [Online]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00607-016-0508-7>.
- [2] G. F. Coulouris, J. Dollimore, and T. Kindberg, "Distributed systems: concepts and design". pearson education, 2005. [Online]. Available: <https://ce.guilan.ac.ir/images/other/soft/distribdystems.pdf>
- [3] W. Nagaura, T. Yokoyama, S. Suzuki, S. Kuragaki, and T. Imai, "Highly reliable distributed system", US Patent 6,779,138, Aug. 2004. [Online]. Available: <https://patents.google.com/patent/US6779138B2/en>.
- [4] D. Leon, "Design of the sweep test diagnosis system for an actuating mechatronics system in safe subsea applications", 2020.
- [5] Exida, "IEC 61508 Overview Report: A summary of IEC 62508 Standard for functional safety of Electrical/Electronic/Programmable Electronic Safety-reliable systems", 2006, [Online] Available: [https://www.win.tue.nl/~mvdbrand/courses/sse/1213/iec61508\\_overview.pdf](https://www.win.tue.nl/~mvdbrand/courses/sse/1213/iec61508_overview.pdf)
- [6] M. Catelani, L. Ciani, V. Luongo, and R. Singuaroli, "Evaluation of the safe failure fraction for an electromechanical complex system: Remarks about the standard iec61508", in 2010 *IEEE Instrumentation & Measurement Technology Conference Proceedings*, IEEE, 2010, pp. 949-953. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5488034>.
- [7] M. Krysander, "Design and Analysis of Diagnostic Systems Utilizing Structural Methods", 1038. 2003, isbn: 917373733X. [Online]. Available: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.140.9150&rep=rep1&type=pdf>.
- [8] M. Amarowicz, "Designing of the Diagnostic Systems Based on the Sets of Requirements", *Machine Dynamics Research*, vol. 39, no. 1, pp. 125-134, 2015, issn: 2080-9948. [Online]. Available: <https://yadda.icm.edu.pl/yadda/element/bwmeta1.element.baztech-07b2e969-92a7-47ed-8d03-3d03c9b9dec2>
- [9] S. Imle, T. Winter, J. Popp, M. Glaser, B. Bertsche 2019. Safety and reliability analysis of an actuation system, European Safety and Reliability Conference 2019, Hannover. DOI: 10.3850/978-981-11-2724-3-0885-cd
- [10] P. Kulkarni, V. Deshpande, L. Sarna, S. Shenolikar, and S. Kelkar, "Fault diagnosis for distributed systems using accuracy technique", arXiv preprint arXiv:1812.07771, 2018. [Online]. Available: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1812/1812.07771.pdf>.
- [11] N. Kandasamy, J. P. Hayes, and B. T. Murray, "Time-constrained failure diagnosis in distributed embedded systems: Application to actuator diagnosis", *IEEE Transactions on parallel and distributed systems*, vol. 16, no. 3, pp. 258–270, 2005.[Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1388215>.
- [12] S. Imle, "Architectural Design of an Embedded Safety Controller", 2018.
- [13] K. Birman, "Reliable distributed systems: technologies, web services, and applications". Springer Science & Business Media, 2005. [Online]. Available: <https://cryptorating.eu/whitepapers/TON/References/2005-Book-Reliable%20Distributed%20Systems.pdf>

# Diseño de una herramienta para la detección de fallos en sistemas multirrotores

## Design of a tool for failures detection in multicopter systems

Dilan Andrey Loría-Quesada<sup>1</sup>

---

Loría-Quesada, D.A. Diseño de una herramienta para la detección de fallos en sistemas multirrotores. *Tecnología en Marcha*. Vol. 34, especial. Movilidad Estudiantil. Octubre 2021. Pág 28-39.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v34i5.5913>

1 Ingeniería Mecatrónica, Instituto Tecnológico de Costa Rica-Grupo Integrado de Ingeniería de la Universidad de la Coruña, España. Correo electrónico: [dilan.loria@gmail.com](mailto:dilan.loria@gmail.com)  
 <https://orcid.org/0000-0002-0832-6553>



## Palabras clave

UAV; Fallos; Red Neuronal; LSTM; GRU; MAVLink.

## Resumen

Los vehículos no tripulados (UAV) con multirrotores, cuentan con un sistema de control que se enfoca principalmente en buscar la estabilidad del vehículo durante el vuelo, sin embargo, no le permite detectar o prever cuando se presenta un fallo, y muchas veces no responde de la mejor manera. En este artículo se presenta inicialmente 9 categorías de fallos que se podrían encontrar durante el vuelo de un UAV, además se presenta el diseño de una red neuronal recurrente capaz de detectar patrones en las series de datos tomadas de un conjunto de sensores, montados sobre el dron. Se presenta la comparación de dos redes diferentes, la LSTM y la GRU, donde se demuestra que la red GRU es la más apropiada para este tipo de problema, obteniéndose hasta un 97% de éxito con los datos de entrenamiento utilizados. Además, se propone una respuesta a los fallos por medio de un protocolo de comunicación llamado MAVLink, que informaría al usuario de la presencia del fallo, además de desconectar el motor de ser necesario.

## Keywords

UAV; Failures; Neural Network; LSTM; GRU; MAVLink.

## Abstract

Unmanned vehicles (UAVs) with multirotors, have a control system that focuses mainly on seeking vehicle stability during flight, however, it does not allow it to detect or predict when a failure occurs, and often does not respond in the best way. This article initially presents 9 categories of failures that could be found during the flight of a UAV, as well as the design of a recurrent neural network capable of detecting patterns in the data series taken from a set of sensors, mounted on the drone. The comparison of two different networks is presented, the LSTM and the GRU, where it is shown that the GRU network is the most appropriate for this type of problem, obtaining up to 97% success with the training data used. In addition, a response to failures is proposed through a communication protocol called MAVLink, which would inform the user of the presence of the failure, in addition to disconnecting the motor if necessary.

## Introducción

### Fallos en vehículos multirrotores

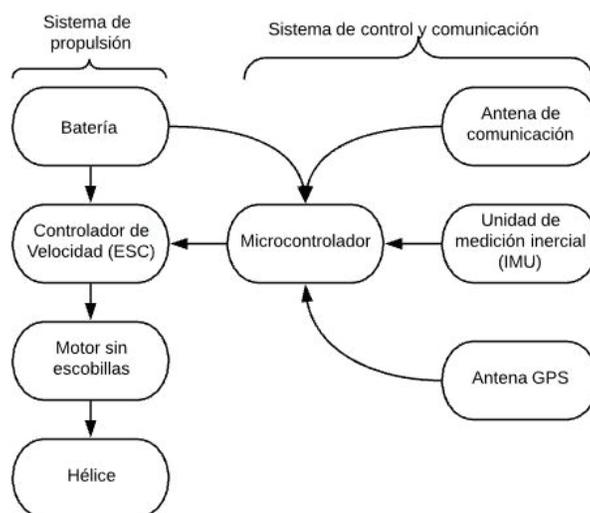
Como se menciona en [1] se puede definir un multirrotor o multicóptero como un dispositivo que tiene múltiples hélices o propulsores de ascenso, lo que lo diferencia del helicóptero, el cual solo cuenta con un motor para esta función. Otra diferencia radica en la ausencia de un rotor de cola, que en los helicópteros se utiliza para dar un control de guiñada y contrarrestar el par inducido por el rotor principal.

Los fallos más comunes en este tipo de vehículos se dan principalmente en sus componentes móviles, que son los motores y las hélices. El mayor problema que afrontan estos vehículos es que la principal función de sus sistemas de control es la de mantener la estabilidad y esto lo realizan demandando más o menos velocidad a cada uno de los motores, no explorando directamente la causa de la inestabilidad, la cual en ocasiones no puede ser resuelta por el sistema de control actual, como se describe en [2].

Los fallos que se presentan en los vehículos multirrotores, se dan principalmente en el sistema de propulsión, que abarca el motor sin escobillas, las hélices, controlador de velocidad y batería. De manera general un vehículo de estos se compone de los elementos presentes en la figura 1.

A continuación, se describen los principales fallos que se podrían presentar durante el vuelo y que afectan directamente el sistema de propulsión:

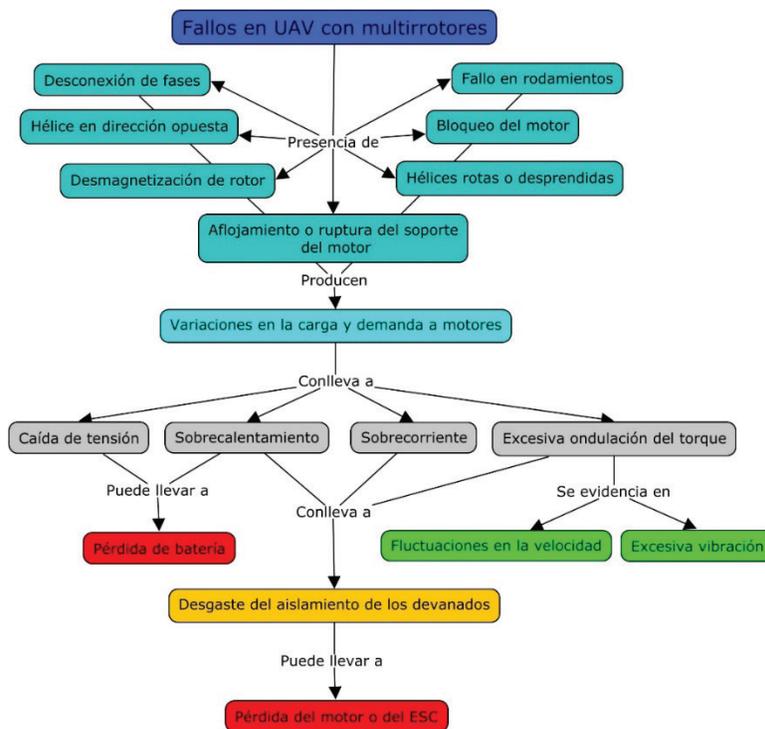
- *Motor dañado*: esta es la primera categoría de fallo expuesta y hace referencia a la pérdida de un motor, lo que implica su completa detención. Por lo general los motores se dañan producto de cortos circuitos, por lo que pueden elevar su temperatura y valores de corriente y luego de un instante a otro cae la velocidad y la corriente. En [3] se menciona que este corto circuito se da producto del desgaste de los devanados del motor.
- *ESC dañado*: el controlador de velocidad o ESC se puede dañar por la misma razón que el motor, producto de un corto circuito que supere su corriente nominal. En el trabajo de [3], este elemento se puede degradar con el tiempo, produciendo la regulación de corriente se vea alterada y pueda conducir al daño de componentes.



**Figura 1.** Elementos de un sistema multirrotores.

- *Batería dañada*: los vehículos multirrotores utilizan en su mayoría, baterías de polímero de litio (LiPo), las cuales también se pueden dañar durante el vuelo, en [4] se menciona que los fallos en las baterías se dan principalmente cuando se supera la tasa de descarga de esta, es decir que se les demanda más corriente de la que pueden entregar. La pérdida de la batería se refleja en una caída en la tensión y un aumento en la temperatura de la batería.
- *Daño de rodamientos*: como se menciona en [5], estos elementos por lo general fallan debido a fatiga, debido a la tensión continua a la que son sometidos. Se produce un desprendimiento de pequeñas piezas, en un proceso conocido como descamación, esto puede conducir a la interrupción del movimiento hasta el punto de bloquear el motor.

- Rotura o aflojamiento del soporte: los motores son elementos independientes del marco del vehículo, por lo que estos se conectan mediante uniones mecánicas como tornillos, sin embargo, como se menciona [3] en ocasiones estas uniones se pueden aflojar, causando inestabilidad en el vehículo, además en ocasiones la fuerza ejercida por el motor puede incluso romper el soporte al que esta se sujetado.
- *Desmagnetización*: este es un fenómeno que ocurre cuando el imán permanente del motor sin escobillas se expone a un campo magnético que lo hace perder sus propiedades magnéticas, también pasa cuando se expone a altas temperaturas y como se menciona en [6] esto conduce a un aumento de torque y la demanda de corriente, para compensar la pérdida de atracción del imán con la bobina.
- *Desconexión de fases*: este es un fenómeno que ocurre cuando se desconectan una o dos de las tres fases que alimentan el motor, en el trabajo de [7], se describe que al existir una fase ausente, el motor trata de compensar utilizando las restantes, por lo que se eleva la demanda de corriente, su comportamiento es muy similar a la desmagnetización, debido a que este se puede ver como una desmagnetización de uno de los bobinados del motor.
- *Motor bloqueado*: como se mencionó el caso de la descañonación de los rodamientos, muchos factores externos pueden producir un bloqueo del motor, lo que lo puede llevar a percibir esto como una carga infinita y puede desencadenar en un corto circuito por la alta demanda de corriente en buscar de lidiar con la carga.
- *Hélice desprendida*: en [2] se describe los problemas referentes a las hélices, el primero es el desprendimiento de esta, debido a una mala instalación o cualquier otro factor externo. La ausencia de la hélice produce un aumento en la velocidad, en búsqueda del sistema por recuperar estabilidad, sin embargo, se da con un bajo nivel de corriente, ya que la carga es mínima.
- *Rotura de hélice*: el segundo problema es cuando se da una rotura parcial de la hélice, fenómeno que produce una inestabilidad en el vuelo además de reducir la corriente levemente y aumentar la velocidad, en búsqueda de compensar el área de empuje perdida.
- *Hélice en dirección opuesta*: finalmente se consideró un fallo más, el cual hace referencia a cuando se da una incorrecta instalación de la hélice, y se pone en sentido opuesto, si bien esto solo ocurriría por un descuido, existe la posibilidad, por lo que se considera este fallo, el cual se vería reflejado en una inestabilidad del vehículo.



**Figura 2.** Relación entre los fallos y las variables de medición.

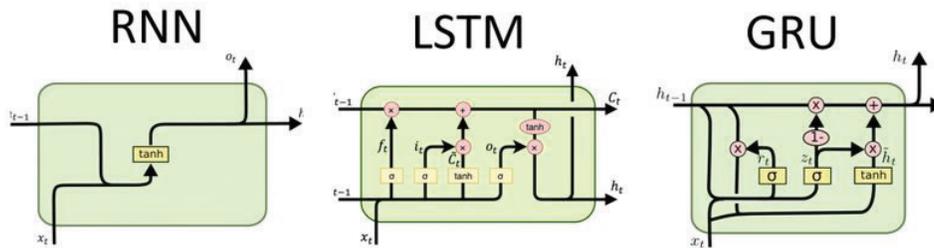
En la figura 2 se resumen en un esquema los fallos descritos además de las variables de medición que pueden revelar información de la presencia de estos. Se establece como variables importantes la tensión, la corriente, la temperatura, la vibración y la velocidad.

### Inteligencia artificial en la detección de fallos

En el trabajo de [8] se menciona que los métodos tradicionales para la detección de anomalías se basan en las características específicas del dominio, lo que requiere un conocimiento en el área de estudio, para establecer valores de umbrales o otras variables que permitan la detección de las anomalías. Esto no resulta muy eficiente, ya que no siempre se cuenta con un experto en el tema en el desarrollo de estas herramientas, la inteligencia artificial trata de solventar esto con la utilización de estructuras como lo son las redes neuronales, las cuales se pueden entrenar con datos recolectados, hasta el punto en el que esta es capaz de encontrar patrones para la detección de los fallos.

Cuando los datos que se van a analizar poseen una naturaleza temporal, como lo son los recolectados por los sensores de un sistema multirrotores, la mejor opción es utilizar una red neuronal recurrente. Como se describen en el trabajo de [8], una red neuronal recurrente se compone de múltiples copias del mismo módulo, donde cada uno de estos es una red neuronal que pasa su salida una a un módulo anterior. Son redes con dos entradas, el presente y el pasado inmediato, dado que cada uno de los módulos sirve como una celda de memoria que almacena el estado anterior. Esta estructura la convierten en una red ideal para el análisis de datos secuenciales, con una dinámica temporal, como lo son los datos de series temporales de un sensor. Las redes recurrentes simples tienen el problema de contar con una memoria de corto plazo, por lo que solo detectan la dependencia del tiempo en secuencias bastante cortas, debido a esto se han realizado modificaciones para crear arquitecturas con una mayor capacidad de memoria. Las dos arquitecturas que más sobresalen son la Long-Short Term

Memory (LSTM) y la Gated Recurrent Unit (GRU). Son arquitecturas similares, sin embargo, la LSTM es mucho más compleja, lo cual la hace más potente, por otra parte, se considera que la GRU es más eficiente computacionalmente.



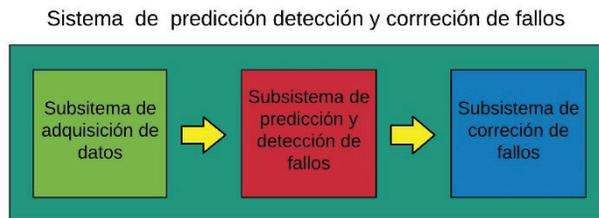
**Figura 3.** Arquitecturas de una red recurrente sencilla, una LSTM y una GRU [9].

En la figura 3 se pueden apreciar la estructura de una neurona en red neuronal recurrente sencilla, una LSTM y una GRU. En el trabajo de [9] se comparan estas redes y se menciona que la principal deficiencia de la red recurrente sencilla es que no permite trabajar con muchos datos, al procesar una salida se toma en consideración únicamente las salidas más recientes, si bien se crea una relación entre los datos, entre más alejados estén entre ellos, menos impacto tienen en el cálculo del estado actual. Es por eso por lo que nacen la red LSTM y la GRU, que en esencia tienen el mismo funcionamiento, ya que incorporan el concepto de compuertas.

Ambas redes poseen una celda de memoria, donde se almacenan todas las salidas de los instantes anteriores, sin embargo, con el objetivo de que esta celda no crezca demasiado, estas redes incorporan las compuertas de olvido y entradas para la LSTM y las de reinicio y actualización en la GRU. Aunque tienen diferente nombre su función es prácticamente la misma, la primera le permite a la red olvidar valores de la memoria, en cada instante de tiempo de analiza cuales datos ya no tiene importancia en la toma de datos y esta compuerta se encarga de borrarlos. Luego esta la compuerta de actualización que es la que decide que valores agregar a la memoria. La principal diferencia entre estas redes es que la LSTM posee una compuerta de salida independiente de la celda de memoria, mientras que la GRU solo cuenta con la celda de memoria o de estado oculto. Esto hace a la LSTM una red mucho más robusta y con una estructura más completa. Aunque la GRU es más sencilla, dependiendo de la aplicación puede trabajar incluso mejor, ya que básicamente posee las mismas compuertas y forma de operar, haciéndolo incluso de manera más eficiente, ya que demanda menos recurso computacional.

## Materiales y métodos

El sistema de predicción, detección y corrección de fallos se compone de tres subsistemas como se observa en la figura 4. Primero de un sistema de adquisición de datos, el cual se compone de los sensores que harán lecturas de las variables de vuelo. Luego un sistema o algoritmo de predicción y detección, el cual consiste en la red neuronal que se encargará de la interpretación de los datos recolectados, para la clasificación de fallos. Finalmente habrá un sistema de corrección, encargado de tomar acciones en presencia de los fallos y de comunicarlos al usuario.



**Figura 4.** Relación de los sistemas implementados para el sistema de predicción, detección y corrección de fallos.

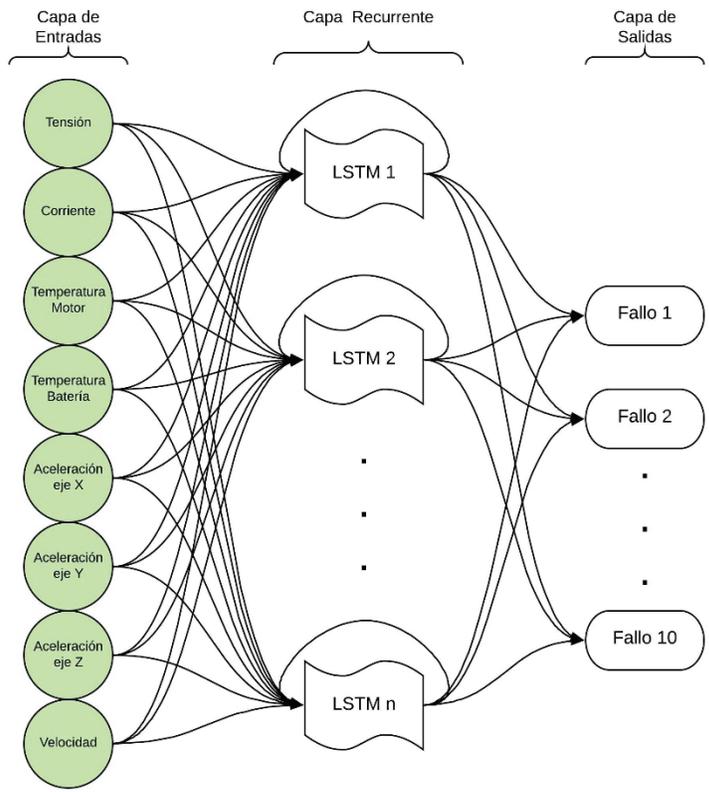
Para el sistema de adquisición de datos se utilizan los siguientes materiales:

- Microcontrolador
- Sensor de corriente
- Sensor de velocidad
- Sensor de temperatura para el motor y para la batería
- Sensor de vibraciones
- Sensor de voltaje

Para la corrección se plantea utilizar un relé, encargado de cortar la alimentación en caso de ser necesario. Además, el sistema de comunicación se hará por medio del protocolo de comunicación MAVLink, el cual permite comunicar el PixHawk, utilizado como controlador de vuelo, con una computadora en tierra. Este protocolo permite enviar mensajes preestablecidos, los cuales son leídos en con ayuda del programa de vuelo Mission Planner de Ardupilot.

Finalmente, en el desarrollo de la red neuronal se propone utilizar una arquitectura como la que se ve en la figura 5. Aunque esta imagen describe la red LSTM, se utiliza la misma para la GRU.

En el cuadro 1 se pueden observar los parámetros utilizados en la configuración de ambas redes neuronales, tanto la GRU como la LSTM. Para el entrenamiento de ambas redes se utilizará un conjunto de 15000 datos, el cual se dividió en un 20% para prueba y 80% para entrenamiento, además de un conjunto más pequeño de 5000 datos, el cual se utilizará para la validación final, una vez que ambas redes han sido entrenadas. Estos datos fueron obtenidos de vuelos realizados en el pasado, con los sensores que lleva a bordo el PixHawk, además para generar los datos de fallos se modificaron, en base en la teoría, los datos de vuelo en funcionamiento normal.



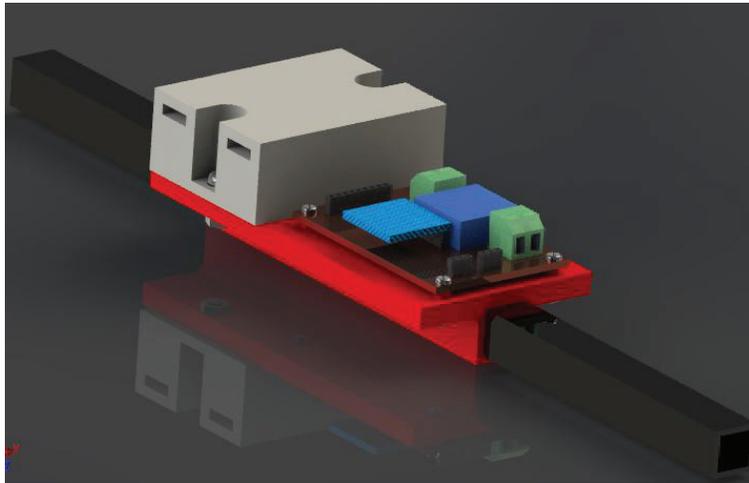
**Figura 5.** Estructura de la red neuronal implementada.

**Cuadro 1.** Configuración de red neuronal propuesta.

Parámetro	Valor o configuración
Optimizador	Adam
Función de error	Entropía cruzada binaria
Función de activación de la capa de salida	Sigmoide
Número de capas ocultas	2
Número de neuronas de las capas ocultas	30
Número de épocas	100
Tamaño del lote	12

## Resultados

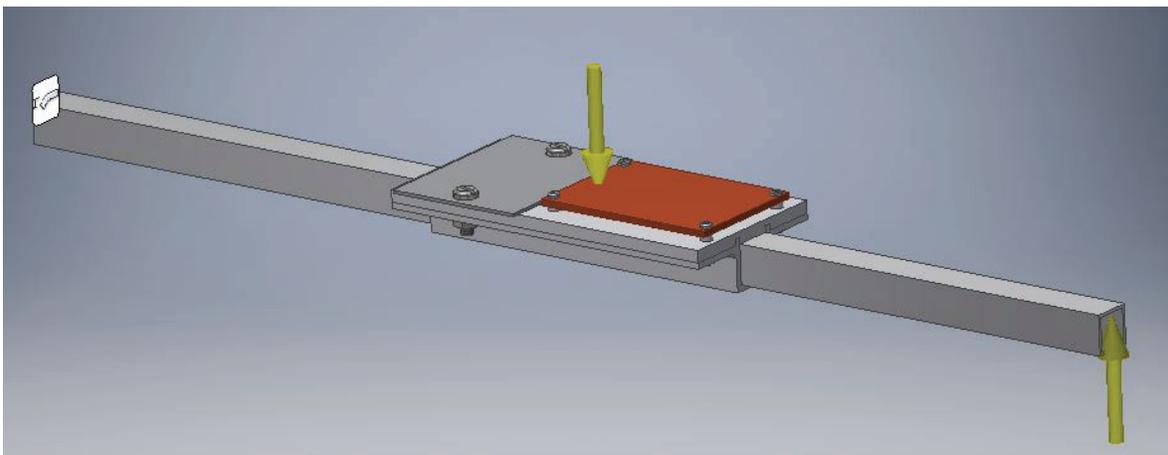
En la figura 6 se puede observar cómo es el montaje de sistema de recolección de datos, además se ve el relé encargado de la interrupción de la corriente cuando se detecta un fallo. Este sistema se comunica por medio de una faja de cables a un segundo PCB, ubicado en el centro del vehículo, el cual contiene el microcontrolador que analiza los datos y que corre la red neuronal. En esta figura se puede observar 2 grupos de pines en el extremo del PCB los cuales corresponden a los sensores de velocidad y de temperatura que se colocarían sobre el motor en el extremo del brazo del dron.



**Figura 6.** Montaje de los sensores sobre el brazo del multirrotor.

Esta estructura se realiza con impresión 3D y posee uniones mecánicas de tornillos con tuercas, las cuales fueron sometidas a un estudio de esfuerzos, con el objetivo de confirmar que soportarían las fuerzas a las que se ve sometidas la estructura. En la figura 7 se observa cómo se realizó esta simulación, se simuló el brazo del dron como un a barra empotrada en voladizo, la cual se ve afectada por la fuerza de gravedad y por la fuerza de empuje del motor, en este caso se utilizó la fuerza de empuje máxima listada en la hoja de datos del motor que correspondía a 6N.

Los resultados de esta simulación arrojaron que las piezas de impresión 3D trabajan con un factor de seguridad de 13.58, el brazo de aluminio opera con un margen de 26.56 y el PCB tiene un factor de 7.33. Por otra parte, los elementos de unión, como lo son los tornillos y las tuercas resultaron ser los que se someten a un mayor esfuerzo, dando resultados para el factor de seguridad de 1.97 y 2.13 respectivamente. Siendo 1.97 el factor de seguridad mas bajo a nivel global en la estructura, sin embargo, aunque parece un valor bajo este representa un margen de 167.4MPa entre el esfuerzo para el que se diseñó y el que se necesitaría para que falle, lo cual es un valor sumamente alto y representa que la estructura podría soportar casi el doble de esfuerzo el que sufre.

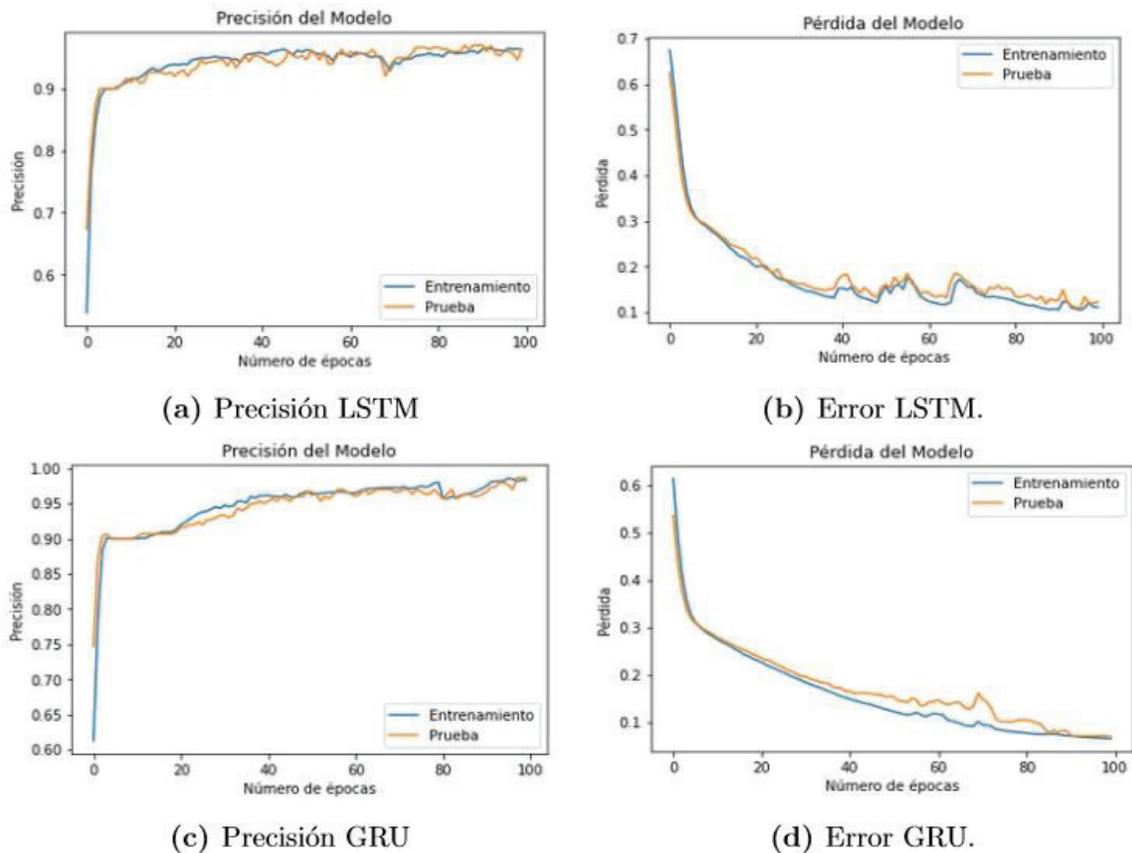


**Figura 7.** Simulación realizada para comprobar esfuerzos en la estructura.

En la figura 8 se pueden observar los resultados de las redes implementadas, como se observa ambas obtienen valores de precisión por encima de 90%, lo cual indica que la red es capaz de detectar más de un 90% de los errores que se presentan el vehículo, al menos en los datos utilizados para el entrenamiento de la red. Además, se ven las gráficas de error con valores menores a 0.1, que en términos de este trabajo donde la salida se espera que este entre 1 y 0, hablar de errores de menos de 0.1 es bastante favorable.

Dado que las redes, pueden variar sus resultados de un entrenamiento a otro, se optó por realizar 10 pruebas a ambas redes, de manera que se comprobara si la selección de parámetros había sido la correcta y no solo si se había tenido suerte en la primera prueba. Para estas pruebas también se utilizaron los 5000 datos de validación y los promedios obtenidos se observan en el Cuadro 2.

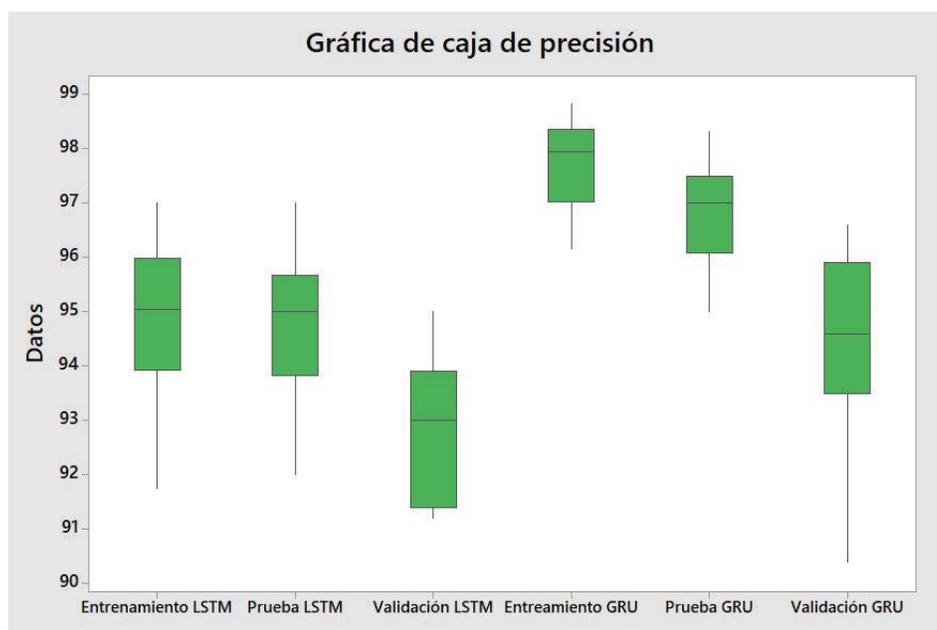
Algo a destacar de los promedios calculados, es que la red GRU es la que alcanza el valor de precisión más alto de todos, en su etapa de entrenamiento con un 97.74%, además es la red que obtiene en los valores más altos en cada una de las etapas, demostrando que es la red que mejor se desempeña para este tipo de problema de detección de ellos. Esto queda aún más claro al observar la figura 9, donde de una manera mucho más visual se puede notar como en general, los datos de precisión obtenidos con la red GRU son más alto que los obtenidos con la red LSTM, en cada uno de los distintos tipos de datos.



**Figura 8.** Resultados de precisión y error para los modelos de LSTM y GRU implementados.

**Cuadro 2.** Configuración de red neuronal propuesta.

Tipo de Dato	Precisión [%]	Desviación estándar precisión [%]	Error	Desviación estándar error
Entrenamiento LSTM	94.85	1.48	0.13	0.05
Entrenamiento GRU	97.74	0.87	0.07	0.01
Prueba LSTM	94.73	1.40	0.14	0.05
Prueba GRU	96.76	1.05	0.09	0.02
Validación LSTM	92.82	0.19	0.01	0.05
Validación GRU	94.34	1.83	0.15	0.05



**Figura 9.** Comparación de la precisión obtenida con las dos redes en cada uno sus tipos de datos.

## Conclusiones y recomendaciones

### Conclusiones

Este trabajo permitió el desarrollo de un sistema capaz de la detección y clasificación de fallos, en UAVs con multirrotores, por medio de la implementación de una red neuronal recurrente, la cual opera sobre datos que se recolectan en tiempo real durante el vuelo.

Para poder diseñar el sistema de detección, primero se realizó una categorización y conceptualización de los todos los posibles fallos en el vehículo, al menos en el subsistema de propulsión, que es sobre el que trabaja el proyecto. Al final se establecieron 9 categorías de fallo y una de funcionamiento normal, la conceptualización permitió también escoger las variables en las cuales se reflejan estos fallos, de manera que se pudo escoger sensores adecuados para la toma de datos.

Se llevó a cabo un estudio por medio de simulaciones que avalan el concepto de los elementos de sujeción y aseguran su funcionamiento con al menos un factor de seguridad de 1.97.

Posteriormente se diseñó la red neuronal, encargada de la detección y clasificación de los fallos. Para esto se diseñaron dos modelos, uno con capas ocultas LSTM y otro con capas GRU, ambas redes recurrentes, donde se obtuvieron para los dos resultados de precisión muy altos, sin embargo, la red GRU destaca con un promedio de precisión de 97.7% en los datos de entrenamiento y un 94.3% en los datos de validación.

## Recomendaciones

- Primeramente, se recomienda probar el sistema propuesto en un vuelo real, de manera que se puede comprobar su nivel de precisión al enfrentarse a datos reales.
- En busca de mejorar la precisión de la herramienta de predicción, se propone recolectar un gran número de datos reales y recolectados por el sistema de adquisición de fallos, provocando cada uno de los fallos propuestos, de manera que se pueda reentrenar la herramienta con estos nuevos datos.
- Probar la red con conjuntos de datos de distintos tamaños, actualmente se entrenó para operar con conjuntos de 100 datos, sin embargo, se puede probar el efecto de aumentar o disminuir este valor una vez que se tenga datos reales, considerando que se podrían obtener buenos resultados con una menor cantidad de datos, lo que aceleraría la toma de decisiones.

## Referencias

- [1] T. Audronis, Building Multicopter Video Drones. Packt Publishing Ltd, 2014.
- [2] P. Misra, G. Kandaswamy, P. Mohapatra, K. Kumar, and P. Balamuralidhar, "Structural health monitoring of multi-rotor micro aerial vehicles", *DroNet 2018 - Proceedings of the 2018 ACM International Conference on Mobile Systems, Applications and Services*, pp. 21-26, 2018. doi: [10.1145/3213526.3213531](https://doi.org/10.1145/3213526.3213531).
- [3] G. E. G. Jr, C. S. Kulkarni, E. Hogge, A. Hsu, and N. Ownby, "A Study of the Degradation of Electronic Speed Controllers for Brushless DC Motors", 2017.
- [4] Roger, "A Guide to Understanding LiPo Batteries", *Roger's Hobby Center*, pp. 1-9, 2018. [Online]. Available: <https://rogershobbycenter.com/lipoguide>.
- [5] S. Rajagopalan, J. M. Aller, J. A. Restrepo, T. G. Habetler, and R. G. Harley, "Detection of rotor faults in brushless DC motors operating under nonstationary conditions", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 42, no. 6, pp. 1464-1477, 2006, issn: 00939994. doi: [10.1109/TIA.2006.882613](https://doi.org/10.1109/TIA.2006.882613).
- [6] D. K. Athanasopoulos, P. D. Karagkounis, J. C. Kappatou, M. Ieee, and S. Tsotoulidis, "Demagnetization Faults Analysis in a BLDC Motor for Diagnostic Purposes", *2014 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, pp. 1862-1868, 2014. doi: [10.1109/ICELMACH.2014.6960437](https://doi.org/10.1109/ICELMACH.2014.6960437).
- [7] W. H. Kersting, "Causes and effects of single-phasing induction motors", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 41, no. 6, pp. 1499-1505, 2005, issn: 00939994. doi: [10.1109/TIA.2005.857467](https://doi.org/10.1109/TIA.2005.857467).
- [8] A. Verner, "LSTM Networks for Detection and Classification of Anomalies in Raw Sensor Data" by in *Computer Science College of Engineering and Computing*, no. May 2019. doi: [10.13140/RG.2.2.19049.54888](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.19049.54888).
- [9] C. Olah, Understanding LSTM Networks, 2015. [Online]. Available: <http://colah.github.io/posts/2015-08-Understanding-LSTMs/>.

# Comportamiento físico y mecánico de elementos no estructurales a base de concreto elaborado con fibra de cáscara de arroz

Physical and mechanical behavior of non-structural elements elaborated of concrete made with rice husk fiber

Paola A. Martínez-Gatica<sup>1</sup>, Stéphane Hans<sup>2</sup>,  
Mauricio Araya-Rodríguez<sup>3</sup>

---

Martínez-Gatica, P.A; Hans, S; Araya-Rodríguez, M. Comportamiento físico y mecánico de elementos no estructurales a base de concreto elaborado con fibra de cáscara de arroz. *Tecnología en Marcha*. Vol. 34, especial. Movilidad Estudiantil. Octubre 2021. Pág 40-61.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v34i5.5915>

1 Ingeniería en Construcción. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.  
Correo electrónico: [leimar.pao@gmail.com](mailto:leimar.pao@gmail.com)  
 <https://orcid.org/0000-0003-2362-3975>

2 Universidad de Lyon, Francia. Correo electrónico: [stephane.hans@entpe.fr](mailto:stephane.hans@entpe.fr)

3 Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica.  
Correo electrónico: [maaraya@tec.ac.cr](mailto:maaraya@tec.ac.cr)



## Palabras clave

Bio-concreto; bloques no estructurales; cáscara de arroz; materiales para la construcción.

## Resumen

En el presente trabajo de investigación se estudió el comportamiento físico y mecánico de dosificaciones de concreto con fibras naturales utilizadas para la elaboración de elementos tipo bloques no estructurales. Las dosificaciones fueron elaboradas con un ligante tipo cemento Portland y como único agregado la cáscara de arroz sin ningún tipo de tratamiento previo, en este proyecto, a esta mezcla se le denomina bio-concreto. Este proyecto se realizó en la Escuela Nacional de Trabajos Públicos (ENTPE) de la Universidad de Lyon en alianza de investigación con la Escuela de Ingeniería en Construcción del Tecnológico de Costa Rica. Se estudiaron diferentes dosificaciones de bio-concreto en donde se analizó el comportamiento mecánico ante la compresión en especímenes cilíndricos con el fin de elegir dos dosificaciones, una para Costa Rica y una para Francia.

Una vez elegidas las dosificaciones, se procedió a estudiar el comportamiento mecánico a compresión en cilindros, la flexión en prismas, el comportamiento térmico en especímenes de ambas formulaciones, culminando con el comportamiento mecánico a compresión de bloques de 15x20x40 cm (ancho, alto y largo). Los resultados muestran el cumplimiento con la resistencia mínima ante la compresión de las normas vigentes para Costa Rica y Francia, ambas formulaciones permiten además tener un material con alta capacidad de aislamiento térmico y densidades menores a 1 500 kg/m<sup>3</sup>. Por lo que el uso de este material no se limita a muros no estructurales sino también podría ser utilizado en techos, pisos y acabados.

## Keywords

Bio-concrete; non-structural blocks; rice husk; building materials.

## Abstract

In this research work, the physical and mechanical behavior of concrete dosages with natural fibers used for the preparation of non-structural block elements were studied. The dosages were made with a Portland cement binder and as the only aggregate the rice husk without any previous treatment, in this project, this mixture is called bio-concrete. This project was carried out at the National School of Public Works (ENTPE) of the University of Lyon in research alliance with the School of Engineering in Construction of The Tecnológico of Costa Rica. Different formulations of bio-concrete were studied where mechanical behavior like compression in cylindrical specimens was analyzed in order to choose two formulations, one for Costa Rica and one for France. Once the formulations were chosen, it proceeded to study the mechanical compression behavior in cylinders, the flexion in prisms, the thermal behavior in specimens of both formulations, culminating with the mechanical behavior of compression and flexion of blocks of 15x20x40 cm (width, height and large). The results show compliance with the minimum resistance to compression of the regulations in force for Costa Rica and France, both formulations also allow to have a material with high thermal insulation capacity and densities less than 1 500 kg/m<sup>3</sup>. Therefore, the material is not limited to be used in walls, but could be also used in ceilings, floors and finishes.

## Introducción

La construcción es una de las actividades del ser humano más importantes para el desarrollo de la vida cotidiana, el impacto que genera el sector construcción no solo es positivo, sino que, también genera un impacto negativo en el ambiente como lo expone [1], ésta industria es la responsable de contribuir alrededor de un 8% de las emisiones de CO<sub>2</sub> a nivel mundial.

El concreto es el material más utilizado en la construcción y debido a su demanda mundial, es el segundo recurso más consumido solo siendo superado por el agua según [2]. El cemento, el cual es el aglutinante más común en los concretos, [1] exponen que aproximadamente 4 000 millones de toneladas de este se producen anualmente en el mundo.

Para la Unión Europea se calcula que la producción de cemento, fue de un 8,49% de la producción mundial y para la región de Latinoamérica y el Caribe un 4,20% de acuerdo con los datos presentados en el informe estadístico del 2018 de FICEM [3].

Ciertamente, todo el concreto producido anualmente no se usa en el mismo tipo de infraestructura, pero gran parte se usa en bienes raíces donde se utiliza tanto en elementos estructurales (particularmente en carga) como en elementos no estructurales (relleno). Este último punto es importante y hace posible considerar reemplazar este concreto no estructural con un material más ecológico que quizás sea menos eficiente mecánicamente, pero que cumpla con los requisitos de construcción y que pueda tener funciones adicionales como aislamiento térmico, acústico y regulador ambiental.

En el pasado, diferentes autores han investigado sobre concretos que incluyen fibras naturales ya sea para mejorar el comportamiento mecánico de este material o bien sustituir parcial o totalmente los agregados pétreos convencionales de las mezclas de concreto. Autores como [4] que incluyeron fibras de bagazo de caña de azúcar en diferentes porcentajes como fibra de refuerzo en la mezcla de concreto para mejorar las propiedades mecánicas, como ejemplo donde los agregados tradicionales (piedra y arena) se remplazan en totalidad por una fibra natural como el cáñamo se puede mencionar el trabajo de [5].

Más allegado a este proyecto, se destaca el trabajo realizado por [6] quien en su investigación incluyó en diferentes porcentajes la cáscara de arroz en la mezcla de cemento, arena y agua para la producción de elementos tipo bloques estructurales y determinar su comportamiento mecánico, además [7] quien trabajo la cáscara del arroz como único agregado sustituyendo la arena y la piedra en la mezcla de concreto convencional para determinar las propiedades físicas y mecánicas en diferentes dosificaciones de este tipo de mezcla.

Se le llama bio-concreto a la mezcla en la que su matriz cuenta con un agregado de fibra natural, ya sea como agregado único o parcial en esta. Debido a la naturaleza de la fibra esta puede estar siendo reciclada o bien cultivada con el fin de ser utilizada en este tipo de mezclas, lo que saca ventaja de los agregados convencionales es el hecho que, en el proceso de cultivación las plantas de donde se extraen las fibras son capaces de absorber CO<sub>2</sub> lo que ayuda a reducir el impacto negativo que pueda generar la extracción de estas o bien la producción de concretos de este tipo.

Esta investigación, se plantea la realización de bloques no estructurales elaborados con bio-concreto de cáscara de arroz, los cuales cumplan con la normativa vigente y de interés para este tipo de elementos no estructurales. Para esto se vuelve necesario plantearse los siguientes objetivos:

- Describir las principales características físicas de la cáscara de arroz utilizada.
- Proponer dos dosificaciones de bio-concreto para la realización de los bloques no estructurales.

- Medir el comportamiento mecánico en diferentes especímenes elaborados con las dos dosificaciones escogidas.
- Valorar el comportamiento térmico en especímenes elaborados con las dosificaciones escogidas.

Con esto se lograría proponer bloques no estructurales elaborados con un bio-material relativamente nuevo, que sus principales características mecánicas y físicas estén expuestas y un análisis de costos de los materiales involucrados que den una idea inicial de la viabilidad de producción de estos elementos de interés.

El proyecto de investigación se da bajo la alianza entre la Escuela de Ingeniería en Construcción del Tecnológico de Costa Rica y la Escuela Nacional de Trabajos Públicos (ENTPE) de la Universidad de Lyon, en donde se da paso a la realización de proyectos de investigación que son de interés mutuo entre estas escuelas. Por lo que, se plantea proponer una formulación de bio-concreto de cáscara de arroz para Francia y una para Costa Rica para la elaboración de bloques no estructurales, todo el trabajo experimental de laboratorio fue realizado en las instalaciones del ENTPE.

## Materiales

En el análisis de la resistencia a la compresión de diferentes formulaciones del bio-concreto se utilizaron dos tipos de ligantes:

- *OPTIMAT Vicat CEM II/B-LL 32,5 RCE NF*: cemento tipo II multipropósito, certificado según norma NF EN 197-1, el cual según ficha técnica del fabricante se puede utilizar durante todo el año, adecuado para trabajos de hormigón en climas cálidos y permite un desencofrado rápido. Su composición química es del al menos 65% de Clinker, 35% de otras sustancias calizas con un límite de 10% de puzolanas naturales o cenizas volantes.
- *Cemento Natural Rápido Vicat (Cal Natural)*: certificado según norma NF P 15- 314, es un cemento natural de fraguado rápido, es creado a partir de la cocción a temperatura moderada de piedra caliza arcillosa de composición regular, que se le da molienda muy fina. Tiene presencia de silicato dicálcico activo, aluminato de calcio rico en alúmina y sulfoaluminato de calcio.

Material granular utilizado como único agregado en las mezclas del bio-concreto:

- *Cáscara de arroz*: proveniente de la región francesa de Camarga, la caracterización física de este material se realizó durante el presente trabajo de investigación.

## Metodología

*Obtención de las principales características físicas de la cáscara de arroz a utilizar en el proyecto*

Se obtuvo la granulometría mediante el tamizaje del material según la norma ASTM C136, la capacidad de absorción de agua al sumergir el material al agua en diferentes tiempos de estudio y el dato de densidad aparente no compacta del material granular al verterlo en una probeta de ensayo con volumen conocido y siempre desde una altura constante.

*Elaboración de cilindros con diferentes formulaciones de bio-concreto de cáscara de arroz para ser ensayados a compresión*

Para un total de 24 formulaciones estudiadas, se elaboraron 6 cilindros del bio-concreto para cada formulación, con el fin de poder someter 3 cilindros al ensayo de resistencia a la compresión a una edad de 7 días y los otros 3 cilindros a una edad de 28 días. La variación entre estas 24 formulaciones fue la relación agregado/ligante y luego la relación agua/ligante.

Una vez que se obtuvieron los resultados del ensayo de resistencia a la compresión, se decidió cuál de las formulaciones estudiadas era la que cumplía con los requisitos mínimos de resistencia establecidos, una resistencia promedio para tres elementos ensayados de 4,14 MPA indicado en la norma de INTECO “INTE C89-2017 (Bloques de concreto para uso no estructural-Requisitos)” para el caso de Costa Rica y un promedio de resistencia a la compresión de 0,30 MPa indicado en el Protocolo de Prueba para la Medición del Rendimiento Umbral de Hormigones de Cáñamo (este como referencia) para el caso de Francia.

*Elaboración de elementos no estructurales a base de las formulaciones de bio-concreto de cáscara de arroz escogidas y ensayos mecánicos sobre estos*

Una vez escogidas las dos formulaciones que cumplían con los requisitos mínimos de las normas, se procedió a elaborar elementos tipo prismas de 14x14x56 cm (alto, ancho, largo), cilindros de 16/32 cm (diámetro/altura), con el fin de realizar ensayos mecánicos de resistencia a compresión a los 7 y 28 días y flexión a los 60 días. Finalmente se realizaron los elementos tipo bloque de 15x20x40 cm (ancho, alto, largo) y sin agujeros, para ensayarlos ante el ensayo de resistencia a la compresión en bloques según ASTM C1314.

*Caracterización física de las formulaciones de bio-concreto escogidas para la elaboración de los bloques no estructurales*

Además, se realizaron ensayos físicos sobre muestras extraídas de cilindros elaborados en esta etapa, con el fin de obtener las características higrotérmicas del material. Los ensayos realizados fueron: obtención de la conductividad y efusividad térmica mediante el ensayo del alambre caliente, determinación de propiedades de amortiguación de humedad del material (MBV) según el procedimiento NORDTEST, estudio de las propiedades de transmisión de vapor de agua (WetCup) según norma ISO 12571: 2013.

**Resultados**

Con forme a los objetivos propuestos en la investigación y la metodología implementada, se obtuvieron los siguientes resultados.

*Caracterización de la cáscara de arroz*

La cáscara de arroz se vertió dentro de una probeta de 2000 ml desde una altura constante de 10 cm, el procedimiento se repitió 6 veces y se promedió el valor de la densidad aparente no compactada obtenida, en el cuadro 1 se presenta el resultado.

**Cuadro 1.** Densidad no compactada promedio

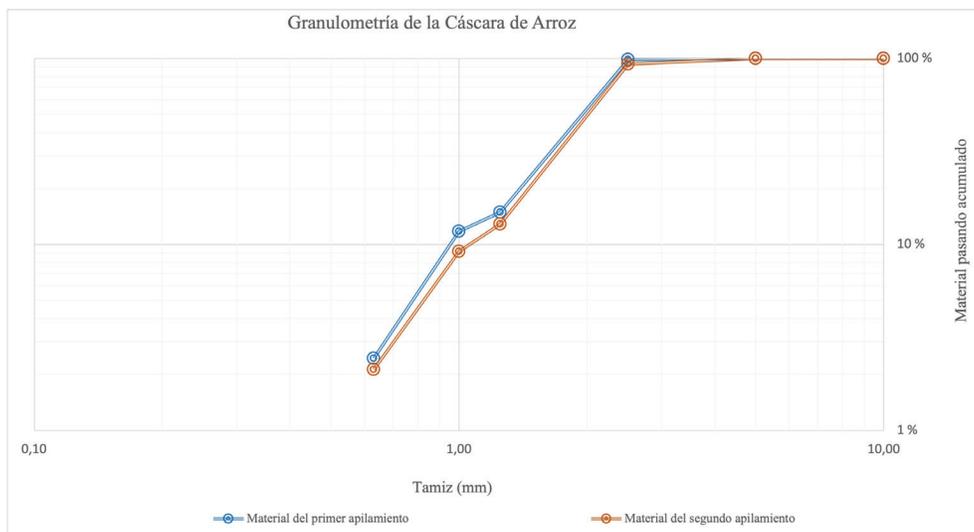
Caída del material 10 cm	
Densidad suelta promedio (kg/m <sup>3</sup> )	113,18

Densidad no compactada promedio a reportar:  $\rho$ : 113 kg/m<sup>3</sup>

Se contaba con dos apilamientos del material granular dentro del laboratorio, por lo que se decidió tamizar 200 gramos de cada uno de los apilamientos en 10 grupos de 20 g para finalmente promediar los resultados para cada apilamiento, el cuadro 2 muestra los promedios obtenidos.

**Cuadro 2.** Granulometría de la cáscara de arroz.

Tamiz No. (mm)	Apilamiento A		Apilamiento B	
	Material Retenido en el tamiz (g)	% del material pasando el tamiz	Material Retenido en el tamiz (g)	% del material pasando el tamiz
10,00	0,00	100,00	0,00	100,00
5,00	0,00	100,00	0,00	100,00
2,50	0,26	98,67	1,34	98,21
1,25	16,68	14,92	15,91	12,89
1,00	0,63	11,75	0,73	9,18
0,63	1,85	2,44	1,40	2,13
Charola	0,49		0,42	
Σ	19,91		19,81	



**Figura 1.** Curva granulométrica de la cáscara de arroz en estudio.

La capacidad de absorción de agua que presentó la cáscara de arroz, se calculó para diferentes tiempos, la ecuación 1 permite obtener el porcentaje de absorción:

$$\% \text{ Absorción}_{BdR} = \left( \frac{M_H - M_S - X}{M_{BdR}} \right) * 100 \quad (\text{ecuación 1})$$

Donde:

$M_H$ : masa húmeda de la bolsa permeable más la cáscara de arroz.

$M_S$ : masa seca de la bolsa permeable más la cáscara de arroz.

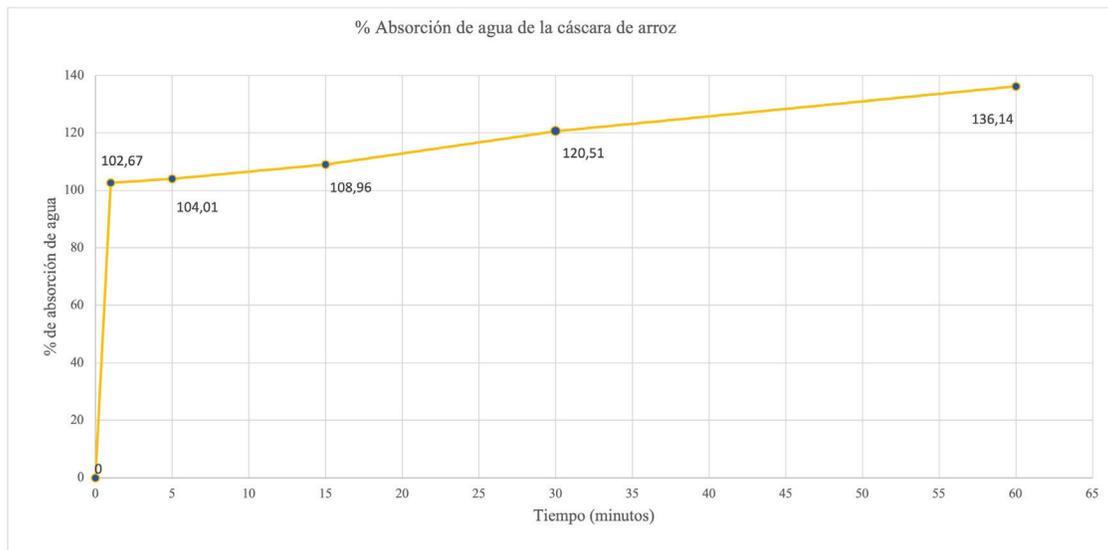
X: cantidad de agua absorbida por la bolsa permeable.

$M_{BdR}$  : masa seca de la cáscara del arroz ingresa en la bolsa permeable.

En el cuadro 3, se presentan los resultados obtenidos.

**Cuadro 3.** Información de absorción de la cáscara de arroz en estudio.

Tiempo de estudio	Masa seca promedio ingresada (g)	Masa húmeda promedio medida (g)	% de absorción
0	-	-	0
1 min	25,40	51,08	102,67
5 min	25,13	52,29	104,01
15 min	25,21	52,46	108,96
30 min	24,42	54,56	120,51
1 h	24,33	56,45	127,61
6 h	24,33	58,40	135,74
24 h	24,17	59,41	140,93
48 h	24,23	60,72	145,90



**Figura 2.** Curva del porcentaje de absorción de agua respecto al tiempo de la cáscara de arroz en estudio.

*Ensayo de resistencia a la compresión en cilindros de diferentes formulaciones de bio-concreto de cáscara de arroz*

Un total de 24 formulaciones de bio-concreto de cáscara de arroz fueron elaboradas, en donde cada una contó con 6 cilindros elaborados para ser ensayados a compresión y medir su resistencia mecánica ante este tipo de solicitación. Las formulaciones fueron estudiadas en dos fases, en la primera se realizó 6 formulaciones y el ensayo se llevó a cabo a los 28 y en la segunda fase se realizaron 18 formulaciones en donde se ensayaron los cilindros a 7 y 28 días de edad.

**Cuadro 4.** Resumen de la información principal de las primeras 6 formulaciones estudiadas en la primera fase del proyecto.

Formulación	Ligante	A/L	$\rho_o$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_{ae}$ (kg/m <sup>3</sup> )	RC. (MPa) 28 días	E (MPa) 28 días
F1 F250	CEM II 32,5	0,50	668	570	0,162	2,5
F2 F250	Optimat Vicat	0,70	766	630	0,228	4,4
F3 F250		0,90	826	669	0,306	19,2
F4 F250	Cal Natural	0,70	715	707	0,149	1,6
F5 F250		0,90	805	(*)	-	-
F6 F250		1,10	832	828	0,194	3,6

Notas sobre cuadro 4.

- Densidad aparente promedio de los cilindros elaborados ( $\rho_o$ ), densidad aparente promedio antes del ensayo de resistencia a la compresión ( $\rho_{ae}$ ).
- Resistencia a la compresión máxima promedio de los cilindros ensayados (R.C).
- Módulo de elasticidad aparente promedio.
- El curado de los cilindros consistió en retirarles el molde a los 24 días de edad, en el día 24 ingresarlos al horno por 96 horas a una temperatura constante de 50 °C.
- La formulación F5 no cuenta con información del ensayo de resistencia a la compresión debido a que los cilindros a ensayar se fracturaron durante el traslado del laboratorio hacia los hornos.



**Figura 3.** Cilindros de bio-concreto formulaciones F1 a F3 (ligante CEM II 32,5) ensayados a la resistencia a la compresión a los 28 días.



**Figura 4.** Cilindros de bio-concreto formulaciones F4 y F6 (ligante Cal Natural) ensayados a la resistencia a la compresión a los 28 días y cilindros de formulación F5 (lado izquierdo) fracturados.

A raíz de estos ensayos, se decidió que la segunda fase de elaboración de cilindros se incluiría el ensayo de resistencia a la compresión de los cilindros a una edad más temprana por lo que se ensayó a los 7 días de edad.

Además, se decide para los cilindros a ensayar a los 28 días, tener un cilindro desmoldado con 1 día de edad y los otros 2 desmoldarlos a los 21 días para ingresarlos al horno por 7 días a una temperatura constante de 50 °C para tratar de extraer la mayor cantidad de agua libre en los cilindros, esto para las formulaciones de la F8 hasta F20. Para las formulaciones de la F21 hasta F24 los cilindros a ensayar ante compresión a los 28 días de edad igualmente se desmoldaría 1 por formulación con 1 día de edad y los otros 2 en este caso desmoldarlos a los 28 días (mismo día del ensayo), esto con el fin de ver y analizar si los resultados de la resistencia a la compresión cambiaban según tiempo de desmolde e ingreso o no al horno y decidir cuál metodología es la mejor para este tipo de bio-concreto.



**Figura 5.** Cilindros de las formulaciones de la segunda fase después de quitar el molde con 24 horas de elaboración.

**Cuadro 5.** Resumen de la información principal de las formulaciones estudiadas en la segunda fase del proyecto con cilindros ensayados a los 28 días ingresados al horno por 7 días.

Formulación	A/L	$\rho_o$ (kg/m <sup>3</sup> )	RC. (MPa) 7 días	$\rho_{ae}$ (kg/m <sup>3</sup> )		RC. (MPa) 28 días		E (MPa) 28 días	
				Desmolde a 1 día	Desmolde a 21 días	Desmolde a 1 día	Desmolde a 21 días	Desmolde a 1 día	Desmolde a 21 días
F8 F500	0,50	1 470	1,3	1 149	1 164	1,4	1,3	140,0	136,7
F9 F500	0,60	1 507	1,9	1 112	1 145	2,0	2,3	175,0	195,5
F92 F500	0,45	1 497	1,5	1 167	1 201	1,3	1,6	112,5	130,0
F10 F600	0,60	1 568	3,1	1 149	1 202	3,2	3,6	242,9	297,0
F11 F600	0,50	1 730	2,9	1 373	1 404	3,3	3,8	229,9	370,2
F12 F600	0,45	1 718	4,1	1 408	1 481	3,3	4,1	236,0	402,2
F13 F700	0,50	1 705	6,1	1 388	1 393	6,5	6,7	555,6	615,8
F14 F700	0,45	1 853	5,9	1 477	1 544	6,5	6,0	512,8	641,1
F15 F700	0,40	1 852	6,7	1 527	1 578	7,4	6,3	563,6	604,0
F16 F750	0,50	1 671	5,4	1 324	1 395	5,0	6,3	512,8	673,5
F17 F750	0,45	1 819	5,3	1 479	1 530	6,1	5,0	520,0	615,2
F18 F650	0,50	1 744	4,7	1 362	1 456	4,2	4,7	483,9	531,7
F19 F650	0,45	1 825	4,5	1 440	1 524	4,1	4,7	433,3	515,5
F20 F550	0,45	1 637	2,3	1 256	1 326	2,3	2,5	133,3	197,7

**Cuadro 6.** Resumen de la información principal de las formulaciones estudiadas en la segunda fase del proyecto con cilindros ensayados a los 28 días sin ingresados al horno.

Formulación	A/L	$\rho_o$ (kg/m <sup>3</sup> )	RC. (MPa) 7 días	$\rho_{ae}$ (kg/m <sup>3</sup> )		RC. (MPa) 28 días		E (MPa) 28 días	
				Desmolde a 1 día	Desmolde a 28 días	Desmolde a 1 día	Desmolde a 28 días	Desmolde a 1 día	Desmolde a 28 días
F21 F280	0,50	1 012	0,2	(*)	892	-	0,5	-	7,5
F22 F300	0,50	1 075	0,3	807	958	0,8	0,7	19,0	6,0
F23 F320	0,50	1 137	0,3	896	1 018	0,7	0,7	25,0	9,5
F24 F350	0,50	1 233	0,4	979	1 115	1,0	1,0	68,0	40,5

Nota sobre cuadros 5 y 6: el ligante utilizado en todas las formulaciones fue CEM II 32,5 Optimat Vicat.



**Figura 6.** Ejemplo de falla típica presente en los cilindros del grupo de formulaciones F500 y F600.



**Figura 7.** Ejemplo de falla típica presente en los cilindros del grupo de formulaciones F700, F750 y F650.



**Figura 8.** Ejemplo de falla típica presente en los cilindros del grupo de formulaciones F280, F300, F320 y F350.

*Ensayos mecánicos sobre los elementos no estructurales elaborados con las dos formulaciones de bio-concreto de cáscara de arroz escogidas*

A partir del estudio de las formulaciones anteriormente presentadas, se pudo escoger basados en la resistencia a la compresión a los 7 días y el módulo de elasticidad aparente la formulación F12 F600 CEM II 32,5 A/L: 0,45 renombrándola FCR para la normativa costarricense y la formulación F22 F300 CEM 32,5 A/L: 0,45 renombrándola FFR para la normativa francesa. La formulación FFR sufrió un cambio en la relación Agua/Ligante pasando de 0,45 a 0,66 por temas de trabajabilidad de la mezcla.

A continuación, se presentan los resultados de resistencia a la compresión sobre cilindros, resistencia a la flexión sobre vigas y resistencia a la compresión sobre bloques no estructurales y sin huecos elaborados con las formulaciones FCR y FFR.

**Cuadro 7.** Promedio de la información obtenida en el ensayo de compresión a diferentes edades sobre cilindros de las formulaciones FCR y FFR de bio-concreto.

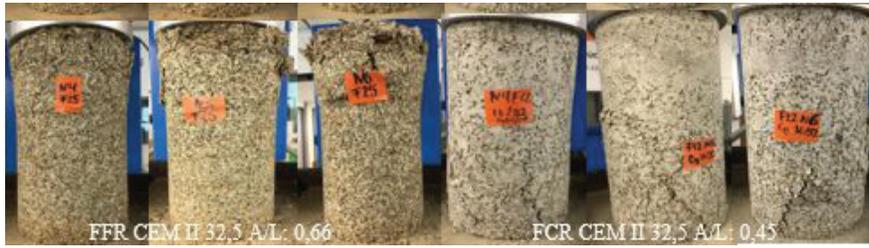
Edad (días)	$\rho_o$ (kg/m <sup>3</sup> )	Fuerza máx. (kN)	Resistencia a la compresión máx. (MPa)	Deformación para la RC máx. (mm/mm)	Módulo de elasticidad aparente (MPa)
Formulación FCR					
7	-	68,6	3,4	0,0136	480,4
28	1 436	96,5	4,8	0,0166	529,9
77	1 435	110,2	5,5	0,0154	544,5
Formulación FFR					
7	-	7,1	0,4	0,0838	32,5
28	861	12,0	0,6	0,0592	61,5
77	869	18,0	0,9	0,0296	76,4

Nota sobre el cuadro 7:

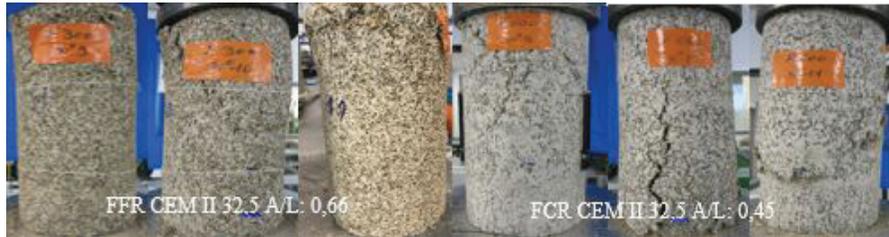
- Todos los cilindros fueron desmoldados a los 7 días de edad.
- Ningún cilindro fue ingresado al horno y se dejaron reposar en el laboratorio a temperatura ambiente hasta la fecha de ensayo.
- Se ensayaron tres cilindros por cada edad de ensayo.



**Figura 9.** Cilindros de las formulaciones FFR y FCR en la parte superior antes del ensayo de resistencia a la compresión a 7 días y en la parte inferior ya ensayados.



**Figura 10.** Cilindros de las formulaciones FFR y FCR en la parte superior antes del ensayo de resistencia a la compresión a 28 días y en la parte inferior ya ensayados.



**Figura 11.** Cilindros de las formulaciones FFR y FCR en la parte superior antes del ensayo de resistencia a la compresión a 77 días y en la parte inferior ya ensayados.

**Cuadro 8.** Resumen de la información obtenida del ensayo de flexión en 4 puntos sobre prismas de concreto la fibra de cáscara de arroz.

Formulación	A/L	Edad del prisma (días)	$\rho_{ae}$ (kg/m <sup>3</sup> )	Fuerza máx. (kN)	Resistencia a la flexión $F_{ct}$ máx. (MPa)	Desplazamiento para $F_{ct}$ máx. (mm)
FCR	0,45	70	1 509	17,97	2,75	2,56
FFR	0,66	54	855	6,00	0,75	3,47



**Figura 12.** Prisma de bio-concreto formulación FCR (F600 CEM II 32,5 A/L: 0,45) lado izquierdo antes del ensayo de flexión lado derecho después del ensayo de flexión.



**Figura 13.** Prisma de bio-concreto formulación FFR (F300 CEM II 32,5 A/L: 0,66) lado izquierdo antes del ensayo de flexión lado derecho después del ensayo de flexión.

**Cuadro 9.** Resumen de la información obtenida del ensayo de compresión sobre bloques de bio-concreto (FCR F600 CEM II 32,5 A/L: 0,45).

78 días (jours)					
Bloque	$\rho_{ae}$ (kg/m <sup>3</sup> )	Fuerza máx.	Resistencia a la compresión máx. (MPa)	$\epsilon$ para el $\sigma_{Rmax}$	Resistencia a la compresión corregida (MPa)
B1	1546	594,6	9,9	0,0463	7,4
B2	1535	648,3	10,8	0,0397	8,1
B3	1542	623,8	10,4	0,0456	7,8
Promedio	1541	622,2	10,4	0,0438	7,8



**Figura 14.** Bloques 1, 2 y 3 de la formulación FCR F600 CEM II 32,5 A/L: 0,45 antes del ensayo de compresión.



**Figura 15.** Bloque 1 de la formulación FCR F600 CEM II 32,5 A/L: 0,45 después del ensayo de compresión y las grietas visibles por la falla del espécimen.



**Figura 16.** Bloque 2 y 3 de la formulación FCR F600 CEM II 32,5 A/L: 0,45 después del ensayo de compresión y las grietas visibles por la falla del espécimen.

**Cuadro 10.** Resumen de la información obtenida del ensayo de compresión sobre bloques de bio-concreto (FFR F300 CEM II 32,5 A/L: 0,66)

55 días (jours)					
Bloque	pae (kg/m <sup>3</sup> )	Fuerza máx.	Resistencia a la compresión máx. (MPa)	$\epsilon$ para el $\sigma_{Rmax}$	Resistencia a la compresión corregida (MPa)
B1	976	109,5	1,8	0,1054	1,4
B2	994	128,7	2,0	0,1029	1,5
B3	1026	92,3	2,0	0,1033	1,5
Promedio	999	110,2	2,0	0,1039	1,5



**Figura 17.** Bloques 1, 2 y 3 de la formulación FFR F300 CEM II 32,5 A/L: 0,66 antes del ensayo de compresión.



**Figura 18.** Bloque 1 y 2 de la formulación FFR F300 CEM II 32,5 A/L: 0,66 después del ensayo de compresión y las grietas visibles por la falla del espécimen.



**Figura 19.** Bloque 3 de la formulación FFR F300 CEM II 32,5 A/L: 0,66 después del ensayo de compresión y las grietas visibles por la falla del espécimen.

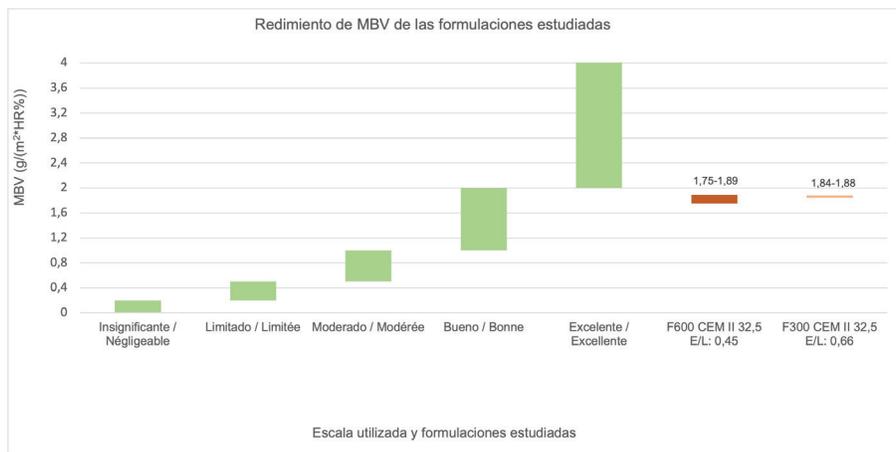
*Caracterización física de las formulaciones de bio-concreto escogidas para la elaboración de los bloques no estructurales*

A continuación, se muestran los resultados del ensayo de Efusividad ( $\beta$ ) y Conductividad ( $\lambda$ ) Térmica de los especímenes de las formulaciones en estudio. Por otro lado, es importante mencionar que los valores de capacidad calorífica ( $C_p$ ), difusividad térmica ( $\alpha$ ) y tiempo de desfase térmico fueron obtenidos de manera indirecta mediante las ecuaciones.

**Cuadro 11.** Características térmicas de las formulaciones FFR F300 CEM II 32,5 A/L: 0,66 y FCR F600 CEM II 32,5 A/L: 0,45.

Característica	FFR F300 CEM II 32,5 A/L:0,66	FCR F600 CEM II 32,5 A/L:0,45
$\rho_{seca}$ (kg/m <sup>3</sup> )	690	1 240
$\beta$ (J/(K*m <sup>2</sup> *s <sup>1/2</sup> ))	322	626
$l$ (W/(m*K))	0,125	0,259
$C_p$ (J/(kg*K))	1 213,05	1 221,23
$\alpha$ (mm <sup>2</sup> /s)	1,49x10 <sup>-07</sup>	1,71x10 <sup>-07</sup>
(h)	8,94	8,35

Los resultados del ensayo de MBV, se presentan en la figura 20 y cuadro 12.



**Figura 20.** Rendimiento en MBV de los bio-concretos en estudio según escala de NORDTEST.

**Cuadro 12.** Valor de MBV para las formulaciones FFR y FCR.

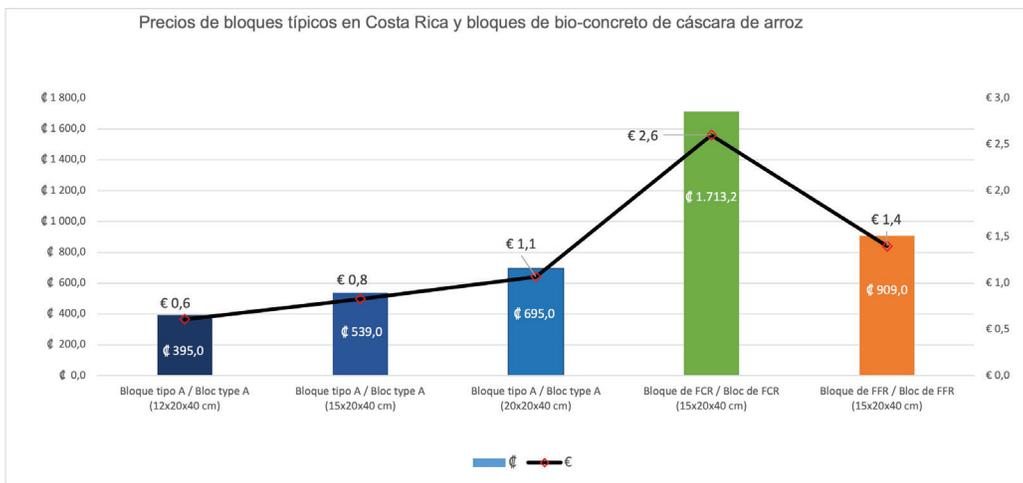
Ciclo	Fase	$\Delta$ masa (g)	Área expuesta (m <sup>2</sup> )	Humedad relativa		MBV (g/(m <sup>2</sup> *%HR))	
				Alta	Baja		
FFR							
47	Absorción	1,67	0,02	75	33	1,98	1,88
	Desorción	-1,51				1,79	
48	Absorción	1,66				1,97	1,84
	Desorción	-1,44				1,71	
48	Absorción	1,60				1,89	1,84
	Desorción	-1,51				1,79	
FCR							
27	Absorción	1,38	0,02	75	33	1,63	1,75
	Desorción	-1,58				1,87	
28	Absorción	1,53				1,81	1,89
	Desorción	-1,67				1,98	
29	Absorción	1,36				1,61	1,76
	Desorción	-1,62				1,92	

Del ensayo de transmisión de vapor de agua (Wetcup), se obtuvieron los siguientes resultados.

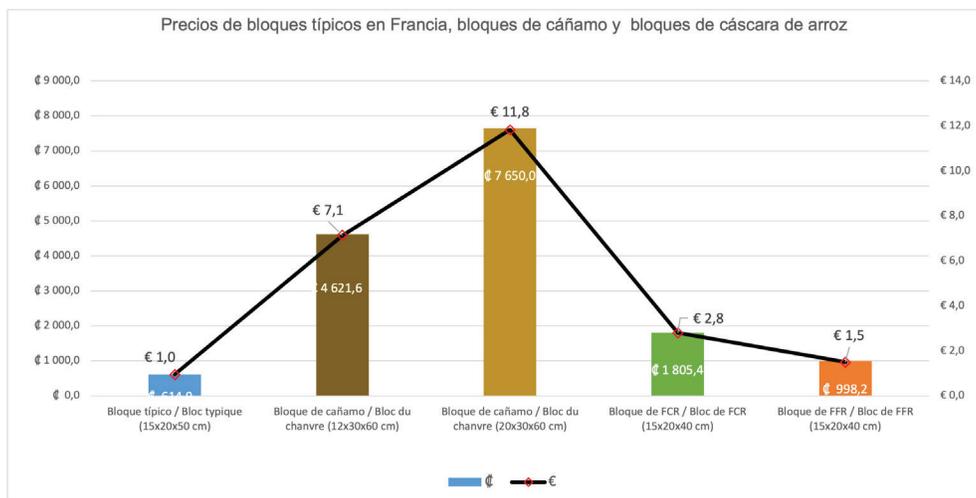
**Cuadro 13.** Valores promedio obtenidos del ensayo de Wetcup para especímenes estudiados de las formulaciones FFR y FCR.

Formulación	G kg/s	g kg/(s*m <sup>2</sup> )	W kg/(s*m <sup>2</sup> *Pa)	Z (s*m <sup>2</sup> *Pa)/kg	δ kg/(s*m*Pa)
FFR	-7,00E-08	3,48E-06	2,48E-10	4,09E+09	7,44E-11
FCR	-9,00E-09	4,48E-07	3,19E-10	3,23E+09	9,56E-12

*Análisis económico*



**Figura 21.** Costos de bloques típicos en Costa Rica tipo A según CSCR-10 y bloques de bio-concreto con cáscara de arroz (costos de elaboración en Costa Rica).



**Figura 22.** Costos de bloques típicos en Francia, bloques de cañamo y bloques de bio-concreto con cáscara de arroz (costos de elaboración en Francia).

## Análisis de Resultados

### *Caracterización de la cáscara de arroz*

La cáscara de arroz utilizada en este proyecto como único agregado de los bio-concretos elaborados, fue recibida en el laboratorio del ENTPE compactado, empaçado en sacos y seco a temperatura ambiente.

Por lo que, al trabajar con este material y sin haberle dado un tratamiento físico ni químico previo a su caracterización física, se obtuvo que la densidad aparente no compactada es de  $113 \text{ kg/m}^3$ , dato que no se aleja de los resultados obtenidos en estudios como el de [8] quien obtuvo una densidad no compactada de  $143 \text{ kg/m}^3$ , a comparación de un estudio más allegado a esta investigación en donde el material proviene de la misma fuente de distribución, el autor [7] reporta un valor de  $110 \text{ kg/m}^3$ .

La granulometría del material es poco dispersa entre los tamices utilizados, como se muestra en el cuadro 2 y figura 1, a partir del tamiz de 2,5 mm de apertura se tiene de manera acumulativa: de 1 a 6 % del material el retenido en el tamiz 2,5 mm, de 80 a 84% del material retenido en el tamiz 1,25 mm, un 3,17% retenido en el tamiz 1,00 mm, de 1,40 a 1,85% retenido en el tamiz 0,63 mm y finalmente captado en la charola de 0,42 a 0,48%. Por lo que, el tamaño más relevante para esta cáscara de arroz es de 1,25 mm dándole así el tamaño característico a este material.

El cuadro 3 muestra que en los primeros 30 minutos de contacto directo del material granular con el agua, se tiene una acelerada absorción, llegando a 120,51% del peso de la cáscara de arroz. Como, de antemano se sabía que el tiempo de contacto de la cáscara de arroz con el agua y ligante, sería de 5 minutos en el proceso de mezclado, se calculó el porcentaje a este tiempo obteniendo una capacidad de absorción de agua de 104,01% del peso de cáscara del arroz.

Importante obtener el dato de la capacidad de absorción de agua del material, debido a que en las mezclas de bio-concreto, se necesita proporcionar la cantidad correcta de agua para permitir la hidratación del ligante y además hidratar las fibras naturales. Con el fin, de que el agregado no quite agua necesaria para que se dé la reacción química entre agua/ligante que permite la generación de resistencia mecánica del material.

### *Formulación de mezclas de bio-concreto*

Se obtuvo un bajo rendimiento de la resistencia a la compresión de las primeras 6 formulaciones estudiadas, estas no cumplían con la resistencia a la compresión mínima establecida en la norma INTE C89-2017, la única de estas formulaciones que presentó un rendimiento aceptable según los mínimos establecidos en el Protocolo de Prueba para la Medición del Rendimiento Umbral de Hormigones de Cáñamo, (0,3 MPa) para el caso de Francia, fue la F3 F250 CEM II 32,5 A/L: 0,90.

La decisión de utilizar solo cemento Portland tipo II como ligante en la segunda fase, se basó en el mejor rendimiento presentado en las formulaciones de la primera fase elaboradas con cemento y además que las dosificaciones de bio-concreto tenían el fin de utilizarse en la elaboración de bloques no estructurales. Por lo que, la obtención de altas resistencias a edades tempranas juega un papel importante en la posibilidad de desmoldar los especímenes con menores edades.

Al experimentar desmoldar los especímenes a temprana edad (1 día de elaboración) se podría comparar el desempeño mecánico ante compresión simple contra el desempeño presentado por especímenes desmoldados a mayor edad 21 días. Se obtuvo entonces, desde la formulación

F8 hasta la F20 presentadas en el cuadro 5 que siempre había una variación significativa entre ambos desempeños, no siempre los especímenes desmoldados a mayor edad presentaban mayor resistencia ante la compresión, pero se tenía el factor de ingreso de los especímenes al horno en el proceso de curado por lo que se decidió analizar que pasaba si los especímenes no se ingresaban al horno y se desmoldaban con diferentes edades uno a 1 día de haberse elaborado y los otros dos a 28 días y someterlos al ensayo de compresión.

Con esto último, se verificaría si el desmolde a una edad temprana era el factor que afectaba en tener resistencias a la compresión tan variadas a comparación de las resistencias presentadas por los especímenes desmoldados a mayor edad, o bien si era el factor de haberlos ingresados al horno antes del ensayo. Esto último, se había realizado como sugerencia del Protocolo de Prueba para la Medición del Rendimiento Umbral de Hormigones de Cáñamo ya que no se tiene una normativa ni protocolo específico para el material en estudio se debía probar y descartar o aprobar los procedimientos de elaboración y ensayos de materiales similares como lo es el concreto hidráulico convencional y el concreto de cáñamo.

En el cuadro 6, se muestra entonces, con el ensayo de resistencia a los 28 días resultados menos dispersos, o bien se obtuvo el mismo desempeño mecánico entre los especímenes desmoldados con 1 día edad y los desmoldados a los 28 días para una misma formulación en estudio, por lo que el desmolde de los especímenes a edades tempranas no afecta directamente la resistencia de estos en tener menor desempeño con respecto a otro espécimen que se desmolda a edades mayores como 28 días. El desmolde de los especímenes a una edad temprana afecta directamente en la densidad final del espécimen, ya que en todos los casos siempre la densidad a los 28 días de los especímenes desmoldados con 1 día de elaboración fue menor que la presentada por los desmoldados con 21 o bien 28 días, el ingreso al horno afectó en tener un mayor rango de variación entre la densidad aparente final de los especímenes desmoldados a diferentes edades, al no ingresarlos al horno el rango de variación era menor pero siempre la densidad aparente final de los cilindros desmoldados a mayor edad independientemente de que se ingresaran al horno o no, fue mayor.

Se destaca, que no es recomendable desmoldar especímenes a edades tempranas (1 día) para formulaciones que tienen en su mezcla de 300 kg de ligante o menos por cada 113 kg de cáscara de arroz no compactada, es decir para las formulaciones F300 a menos, como se muestra en la figura 5, el espécimen de la formulación F280 se fracturó al desmoldarse a esa edad, el de la formulación F300 se le desprendió en la parte inferior material de la mezcla dejando un pequeño hueco en esta zona.

Las fallas típicas, para cada formulación se muestran en las figuras 6, 7, 8, se puede notar que entre menor la cantidad de cemento en la mezcla por ejemplo F8 F500 presenta una falla localizada en el tercio que menor compactación tuvo en la elaboración de los cilindros y conforme se va aumentado en cantidad de cemento en la mezcla por ejemplo las mezclas F16 a F19 las grietas empezaron por el tercio que menor compactación tuvo en la elaboración pero estas avanzaron a lo largo del cilindro, mostrando así una falla más frágil.

Finalmente las formulaciones escogidas para la elaboración de bloques no estructurales y otros elementos para el estudio de ensayos de resistencia mecánica como flexión y compresión simple fueron F12 F600 CEM II 32,5 A/L: 0,45 ya que a los 7 días de edad el promedio de resistencia a la compresión era de 4,1 MPa cumpliendo a esta edad con el mínimo establecido por INTE C89-2017 para Costa Rica de 4,41 MPa (a 28 días) se renombró a esta formulación FCR, para el caso de la normativa francesa se escogió la formulación F22 F300 CEM II 32,5 A/L: 0,66 a los 7 días de edad el promedio de resistencia a la compresión era de 0,3 MPa cumpliendo con el mínimo de resistencia para muros establecido en el Protocolo de Prueba para la Medición del Rendimiento Umbral de Hormigones de Cáñamo, renombrándola FFR.

### *Elaboración de prismas, cilindros y bloques no estructurales a base de las formulaciones FCR y FFR para medición del rendimiento mecánico*

Se replicó el ensayo de resistencia a la compresión, con el fin de constatar que al volver a producir cilindros y con los cuidados de no ingresarlos al horno y no desmoldarlos a menos de 7 días se tendrían resultados similares o los mismos a los obtenidos en el estudio de las formulaciones.

Para la formulación FCR el promedio de la resistencia a la compresión aumentó con respecto a la edad del espécimen, estos resultados fueron constantes con los obtenidos a los 7 y 28 días para los cilindros ensayados en la fase de estudio de formulaciones. Además, de un promedio de densidad aparente inicial de  $1\,436\text{ kg/m}^3$ , permitiendo clasificar este bio-concreto como liviano según la clasificación dada en la norma ASTM C129 y así mismo INTE C89-2017. Por último, se reporta una resistencia a la compresión de  $4,8\text{ MPa}$  y un módulo de elasticidad aparente de  $529,9\text{ MPa}$  a los 28 días para esta formulación.

Para la formulación FFR, presentó un aumento de resistencia a la compresión respecto al aumento de edad, teniendo una congruencia con los datos obtenidos con la formulación F22 de la fase de estudio de formulaciones. Se cumple con el mínimo de  $0,3\text{ MPa}$  a los 28 días demandado por el Protocolo de referencia y se clasifica como un bio-concreto liviano ya que su densidad aparente inicial es de  $869\text{ kg/m}^3$ .

Por otro lado se obtuvo la resistencia a la flexión, en prismas elaborados con las formulaciones FCR y FFR, teniendo mayor desplazamiento y menor resistencia a la flexión en el prisma de FFR. No se utilizó ningún tipo de refuerzo para resistir la flexión (armadura de acero) así que el dato reportado es meramente de la resistencia aportada del bio-concreto teniendo una resistencia a la flexión de  $2,75\text{ MPa}$  a los 70 días para la formulación FCR y  $0,75\text{ MPa}$  a los 54 días para la formulación FFR.

Finalmente, el ensayo de resistencia a la compresión en bloques serían los resultados que dictarían si realmente el material cumplía con las solicitaciones mínimas demandadas en las normas tomadas como base. Se obtuvo un promedio de resistencia a la compresión de  $7,8\text{ MPa}$  a los 78 días de edad en los bloques elaborados con FCR y para los bloques elaborados con la formulación FFR una resistencia de  $1,5\text{ MPa}$  a los 55 días de edad, ambas formulaciones cumplen satisfactoriamente los requisitos demandados.

Las fallas presentes en los bloques, se pueden clasificar con las mostradas en la norma ASTM C19, teniendo una falla tipo "Desprendimiento de Cara" para ambas formulaciones en donde es más visible en los especímenes de FCR ya que su alto contenido de cemento vuelve a los elementos más rígidos que los elaborados con FFR, aumentando con esto una falla más frágil para los elementos de FCR. Se puede observar estas fallas desde la figura 14 hasta la 19.

### *Características Higrotérmicas de las formulaciones FCR y FFR*

Las características térmicas de ambas formulaciones se presentan en el cuadro 11, era importante conocer las capacidades de aislamiento térmico que presentarían estas formulaciones ya que, al construir con materiales que proporcionan mejor rendimiento en aislamiento térmico genera una menor demanda de la energía consumida en una edificación para tratar de controlar o mantener el confort térmico en los espacios de uso. Finalmente se calculó el tiempo de desfase térmico para ambas formulaciones con un ancho de  $15\text{ cm}$  (ancho del bloque propuesto), con el fin de saber cuánto tiempo le tomaría a la temperatura exterior llegar hasta el interior de la edificación construida con este bio-concreto, teniendo entonces  $8,94\text{ horas}$  para la formulación FFR y  $8,35\text{ horas}$  para la formulación FCR.

Se debe recordar que entre más cercano se el desfase térmico de un material a 12 horas mejor será como aislante térmico, suponiendo que a las 12 medio día se tiene la temperatura más alta en el día, esta temperatura teóricamente tardaría 8,94 horas en sentirse en el interior del inmueble, generando confort para el usuario puesto que la temperatura interior en el inmueble a las 21:34 horas del día será más cálida que la temperatura sentida en el exterior del inmueble, ya que en horas de la noche se tienen temperaturas más bajas.

Con la misma lógica entonces en horas del día cuando la temperatura es mayor, en el interior del inmueble se sentiría la temperatura registrada en el exterior hace 8,94 horas atrás. Esto sin necesidad de recurrir a sistemas de enfriamiento o calefacción.

Ahora bien, el material también muestra un buen rendimiento ante los cambio de humedad, ya que según la escala NORDTEST para el ensayo de MBV se puede clasificar el rendimiento de ambas formulaciones como “Bueno”, siendo esto el segundo mejor puesto en la escala de calidad de amortiguamiento de humedad . Este resultado es respaldo con los obtenidos en el ensayo de Wetcup que mide la resistencia del material ante la penetración del vapor de agua (Z), se muestra en el cuadro 13, que ambas formulaciones presentan una alta resistencia por m<sup>2</sup> a que el material sea penetrado por humedad.

#### *Análisis económico*

Se tiene para la formulación FCR que no es viable económicamente producir bloques de bio-concreto ya que es 59,42% más caro que producir un bloque tipo A de 20x20x40 cm en Costa Rica, la brecha se da no solo en la parte económica sino también en el rendimiento mecánico ya que el bloque tipo A sí es estructural y permitido en todo tipo de construcciones en Costa Rica mientras que los de la formulación FCR al ser no estructurales su uso en construcciones se limita y son más caros.

En Francia, construir un bloque de 15x20x40 cm (ancho, alto, largo) con la formulación FFR cuesta un 86,95% más barato que un bloque de cáñamo de 20x30x60 cm y 78,40% más barato que un bloque de cáñamo de 12x30x60. Igualmente los costos presentados de los bloques de cáscara de arroz solo incluyen el costo de la materia prima, mientras que los bloques de cáñamo ya es el precio final como se ofrecen en una ferretería.

## **Conclusiones**

1. La cáscara de arroz utilizada, proviene de la región francesa de Camarga, se le reporta un densidad aparente no compactada de 113 kg/m<sup>3</sup>, tamaño granulométrico predominante de 1,25 mm, un máximo de material fino retenido en la charola de 0,48% del peso tamizado y capacidad de absorción de agua a los 5 minutos de 104,01% de su propio peso.
2. El desmolde a edades tempranas de cilindros de bio-concreto de cáscara de arroz garantiza tener menor densidad final en dichos cilindros con respecto a unos que se desmolden a mayor edad, no obstante este proceso no garantiza que el cilindro desmoldado a menor edad tendrá menor resistencia a la compresión con respecto al desmoldado con mayor edad.
3. La formulación escogida para la elaboración de los bloques no estructurales propuestos para Costa Rica fue la F12, renombrándola FCR F600 CEM II 32,5 A/L:0,45. Elegida por obtener a los 7 días una resistencia a la compresión de 4,1 MPa (41,81 kg/cm<sup>2</sup>), lo cual cumple con el promedio de resistencia a la compresión demandada en la norma INTE C89- 2017 “Elementos de mampostería de concreto (bloques de concreto) para uso no estructural.”.

4. La formulación escogida para la elaboración de los bloques no estructurales propuestos para Francia fue la F22, renombrándola FFR F300 CEM II 32,5 A/L: 0,66. Elegida por obtener a los 7 días una resistencia a la compresión de 0,3 MPa (3,06 kg/cm<sup>2</sup>), lo cual cumple con la resistencia a la compresión demandada en el “Protocolo de Prueba para la Medición del Rendimiento Umbral de Hormigones de Cáñamo”.
5. Para la formulación FCR se reporta resistencia a la compresión en cilindros a los 28 de 4,8 MPa y módulo de elasticidad aparente de 529,9 MPa, resistencia a la flexión en prismas de 2,75 MPa asociado a un desplazamiento de 2,56 mm. Promedio de resistencia a la compresión en bloques no estructurales de 7,8 MPa a los 78 días.
6. Para la formulación FFR se reporta resistencia a la compresión en cilindros a los 28 de 0,6 MPa y módulo de elasticidad aparente de 61,5 MPa, resistencia a la flexión en prismas de 0,75 MPa asociado a un desplazamiento de 3,47 mm. Promedio de resistencia a la compresión en bloques no estructurales de 1,5 MPa a los 55 días
7. Los bloques ensayados a compresión simple de ambas formulaciones presentaron falla tipo “desprendimiento de cara” según ASTM C1314.
8. Las formulaciones FCR y FFR presentaron buen rendimiento como material aislante presentando así un tiempo de desfase térmico de 8,35 horas y 8,94 horas respectivamente.
9. No es viable económicamente producir los bloques con la formulación FCR por su alto contenido de cemento en la mezcla, sí es viable producir los bloques no estructurales con la formulación FFR para el caso de Francia pero para Costa Rica no puesto que estos no cumplen con la resistencia mínima demandada por las normas.

## Recomendaciones

1. No se recomienda ingresar los cilindros de bio-concreto de cáscara de arroz al horno como parte del método de curado, debido a que esto puede generar pérdidas de la resistencia a la compresión de los especímenes.
2. No se recomienda desmoldar a menos de 7 días.
3. Realizar ensayo de resistencia a la compresión en especímenes tipo bloque a los 28 días y corroborar que a esta edad estos especímenes cumplen correctamente con los mínimos exigidos en las normativas.
4. Realizar un análisis de la respuesta sísmica que presentan los especímenes tipo bloques elaborados con la formulación FFR, ya que esta es económicamente viable de producir en ambos países, y sí el material presenta buen rendimiento ante fuerzas que simulen un sismo, generar una propuesta de estudio que regule a manera de norma la producción y aplicación de este producto dirigida a INTECO.

## Referencias

- [1] Lehne, J., & Preston, F. (Junio de 2018). Chatham House Report. Obtenido de Making Concrete Change Innovation in Low-carbon Cement and Concrete: <https://www.chathamhouse.org/sites/default/files/publications/2018-06-13-making-concrete-change-cement-lehne-preston-final.pdf>
- [2] Global Cement and Concrete Association. (2019). Global context and quick definitions about concrete. London, United Kingdom.
- [3] Federación Internacional del Cemento. (2018). Cifras de la industria cementera. Obtenido de Informe Estadístico 2018: <http://ficem.org/dev/wp-content/uploads/2018/09/CIFRAS-DE-LA-INDUSTRIA-CEMENTERA-MUNDIAL.pdf>

- [4] Herrera Mejía, J., Osorio Saraz, J., & Varón Aristizabal, F. (28 de Febrero de 2007). Comportamiento Mecánico del Concreto Reforzado con Fibras de Bagazo de Caña de Azúcar. Medellín, Colombia: Revista DYNA, Universidad Nacional de Colombia.
- [5] Nguyen, T. (2010). Contribution à l'étude de la formulation et du procédé de fabrication d'éléments de construction en béton de chanvre. Génie civil. France: Université de Bretagne Sud.
- [6] Molina Salas, E. (Enero de 2010). Evaluación del uso de la cascarilla de arroz en la fabricación de bloques de concreto. Cartago, Costa Rica: Tecnológico de Costa Rica.
- [7] Mena Rodríguez, L. I. (2019). Análisis de las propiedades físicas de concretos modificados con fibras vegetales: cáscara de arroz. Cartago, Costa Rica: Tecnológico de Costa Rica - ENTPE.
- [8] Serrano, T., Borrachero, V., Monzó, J., & Paya, J. (2012). Morteros aligerados con cascarilla de arroz: Diseño de mezclas y evaluación de propiedades. DIALNET, 79, 128-136.

# Aplicación de las TIC y realidad aumentada como iniciativa para la puesta en valor del patrimonio arquitectónico. Estudios de casos españoles para su posible implementación en contextos patrimoniales costarricenses

Application of ICT and augmented reality as an initiative to promote the architectural heritage. Case studies from Spain in order to implementation in Costa Rican heritage contexts

Fernando Agüero-Bravo<sup>1</sup>

---

Agüero-Bravo, F. Aplicación de las TIC y realidad aumentada como iniciativa para la puesta en valor del patrimonio arquitectónico. Estudios de casos españoles para su posible implementación en contextos patrimoniales costarricenses. *Tecnología en Marcha*. Vol. 34, especial. Movilidad Estudiantil. Octubre 2021. Pág 62-77.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v34i5.5916>

<sup>1</sup> Escuela de Arquitectura y Urbanismo. Campus Tecnológico Local San José. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Correo electrónico: [fa181097@gmail.com](mailto:fa181097@gmail.com)  
 <https://orcid.org/0000-0002-5820-161X>



## Palabras clave

Paisaje urbano histórico; patrimonio; Costa Rica; España; turismo; aplicaciones móviles.

## Resumen

La realidad aumentada es una tecnología que ha sido ampliamente desarrollada para fines académicos, educativos y de entretenimiento, algunos países se han valido de esta tecnología para promover la cultura y el turismo urbano en sitios patrimoniales; no obstante, al ser una herramienta con poca exploración en el país, la investigación teórica y aplicada en este campo facilitaría su consolidación en Costa Rica para la puesta en valor del patrimonio arquitectónico.

El presente artículo, a partir de la metodología de estudios de casos, tiene por objetivo evaluar el funcionamiento, propuesta y difusión de aplicaciones móviles que utilizan las TIC para el desarrollo turístico de entornos con interés patrimonial. La evaluación parte de una serie de entrevistas realizadas a expertos de la Universidad Autónoma de Madrid quienes permitieron definir los criterios y posteriormente, se analizaron en campo el funcionamiento de aplicaciones en las ciudades de Segovia, Toledo y Barcelona, ciudades que utilizan estas nuevas tecnologías, para ofrecer, desarrollar y promover su patrimonio cultural. Como principal conclusión, a partir de dicho análisis se elaboró una serie de conclusiones y recomendaciones para su posible implementación en entornos patrimoniales.

## Keywords

Historic urban landscape; heritage; Costa Rica; España; tourism; mobile apps.

## Abstract

Augmented reality is a technology that has been widely developed for academic, educational and entertainment purposes, several countries have used this technology to promote culture and urban tourism in heritage sites; it is a few explored technologies in Costa Rica, thus, theoretical and applied research would facilitate its consolidation in this country in order to promote and develop the architectural heritage.

This article, based on study cases, aims to investigate the operation, proposal and dissemination of mobile applications that use ICT for the tourism development environments with architectonic heritage interest. This study is based on a series of interviews with professionals from Autónoma de Madrid University who allowed defining the criteria and then, analyze the operation of the mobile apps at Segovia, Toledo and Barcelona cities, places that uses these new technologies to offer their cultural heritage. As a main conclusion, from this research was elaborated a series of conclusions and recommendations in order to implement these methods in heritage sites

## Introducción

La realidad aumentada es una tecnología que consiste en sobreponer imágenes sobre la realidad mostrada en una pantalla, a través de imágenes, modelos 3D u otro tipo de datos generados previamente por un ordenador [1]. Actualmente, el mercado del consumo de información se enfoca cada vez más hacia los dispositivos móviles, ya sean teléfonos móviles de aplicaciones múltiples (smartphones), tabletas y dispositivos multimedia [2].

Según la referencia [3], dichas herramientas han empezado a cobrar un gran protagonismo y aunado a la rápida implantación de dispositivos multimedia en la sociedad, han propiciado la aparición de nuevos métodos para el tratamiento, interpretación y promoción del patrimonio

arquitectónico, cultural y del paisaje urbano histórico por medio del uso de herramientas digitales como la realidad aumentada. Es por esto que según diversos autores [4] [1] las aplicaciones móviles orientadas al turismo y la implantación de la realidad aumentada para la puesta en valor del patrimonio arquitectónico pueden convertirse en un nuevo canal que posibilite información, desarrollo y comercialización turística de una forma más eficiente e innovadora.

Tal como se expone en la referencia [5], un sistema de realidad aumentada aplicado al turismo tiene que ser sensible a las preferencias del turista, debiendo establecer mecanismos que permitan recomendarles posibles ofertas relacionadas con sus preferencias e intereses. Las aplicaciones analizadas presentaban la posibilidad de escoger o definir diferentes tipos de itinerarios de acuerdo con las preferencias del usuario, lo que permitía un mayor atractivo y éxito en cuanto uso con la aplicación; además de que otorgan cierta versatilidad para que, en una segunda visita, el usuario tuviera la posibilidad de escoger una nueva ruta.

Dicha tecnología además permite el acceso de información a un amplio sector de la sociedad, ya que muchas de las herramientas que se crean para los usuarios están adaptadas en múltiples idiomas o formas en que personas con alguna discapacidad también pueda aprovechar su uso. Disciplinas como la arqueología, la historia del arte, la arquitectura, han visto en esta tecnología un nuevo recurso para llevar a cabo una labor de difusión y puesta en valor de los entornos patrimoniales, proyectos que han mostrado nuevas perspectivas en la forma de interpretar y conocer el patrimonio [1].

La realidad aumentada recurre al uso de la cámara fotográfica, brújula, receptor GPS y otros implementos presentes en los dispositivos móviles para cargar imágenes, información o animaciones previamente realizadas en computadora. Por ejemplo, España a través de la realidad aumentada, ha sabido aprovechar estas tecnologías, para poner a disposición su patrimonio cultural y arquitectónico, generando una visión indirecta del entorno real por medio de elementos virtuales visibles en una pantalla de un dispositivo móvil [1] [5]. .

En el caso de Costa Rica, dicha tecnología se ha utilizado en el ámbito educativo para presentar, por medio de dispositivos móviles, recursos educativos y mostrar de una manera más didáctica contenidos y temas impartidos en clases escolares en el ámbito de las ciencias, estudios sociales e idiomas dirigido tanto a estudiantes como a educadores [6] [7].

También se ha centrado su uso en el ámbito publicitario para mostrar de una manera diferente, creativa y original los productos comercializados y materiales promocionales[8] [9]. Asimismo, se han establecido iniciativas privadas que han aprovechado la realidad aumentada para generar videojuegos y su posible implementación en el mercado de la ingeniería y mercadeo, finalmente, se ha aprovechado de esta herramienta para promocionar el turismo en edificios emblemáticos como el Teatro Nacional de Costa Rica, el cual, por medio de una aplicación de realidad aumentada, dio a conocer el arte y las reliquias presentes en este lugar [10] [11].

No obstante, desarrollo de tecnologías para la puesta en valor de edificios patrimoniales o paisajes urbanos históricos, ha sido un ámbito muy poco explorado y demanda de un sustento teórico que permita seguir avanzando para su implementación en esta área; se encontró como única y primera aplicación de realidad aumentada para la puesta en valor y difusión del paisaje urbano histórico de barrio Amón, la aplicación Amón\_RA, proyecto financiado por la vicerrectoría de Investigación y Extensión del TEC, en el cual participan las Escuelas de Arquitectura y Urbanismo, Computación y Diseño Industrial del TEC que pone en valor el paisaje urbano histórico de barrio Amón en San José, como una forma de ver viable a futuro la expansión de estos proyectos en otros entornos patrimoniales [12].

Una de las grandes ventajas que posee la realidad aumentada sobre las otras maneras de promoción del patrimonio arquitectónico es que, a través de esta tecnología, se puede mostrar información al turista o público en general de edificaciones o monumentos que desaparecieron o se encuentran parcialmente destruidos; según Caro, J. et al [5], permite presentar una recreación virtual de elementos con acceso restringido o parcialmente destruidos y con ello poner en valor obras arquitectónicas que, debido a su estado físico, pierden su valor y trascendencia la sociedad.

A manera de ejemplo, una edificación patrimonial en Costa Rica el cual sería viable una iniciativa para la implementación de la realidad aumentada como herramienta para su rescate y conservación de la memoria cultural es el templo Santiago Apóstol, dicha herramienta permitiría observar su interior, revelar su historia y su trascendencia en la cultura de los habitantes de Puriscal.

Según Tato, B. y Vallejo, J. [13], en la esfera urbana, estas iniciativas contemporáneas que incorporan al ciudadano como agente activo, huyendo del paradigma convencional del ciudadano cliente-espectador-receptor permite pasar al ciudadano a ser actor-productor en un proceso abierto de la dinámica de una ciudad. La incorporación de las TIC y de tecnologías como la realidad aumentada empezarán a crear un espacio aumentado susceptible a ser modificado o ajustado a las necesidades que se requieran, dichos recursos lograrán un mayor entendimiento del espacio urbano y patrimonial existente y proveerá la información necesaria para que el usuario local o turista pueda hacer libre uso de este espacio, lo que definirá nuevas formas de interacción y de entender el entorno.



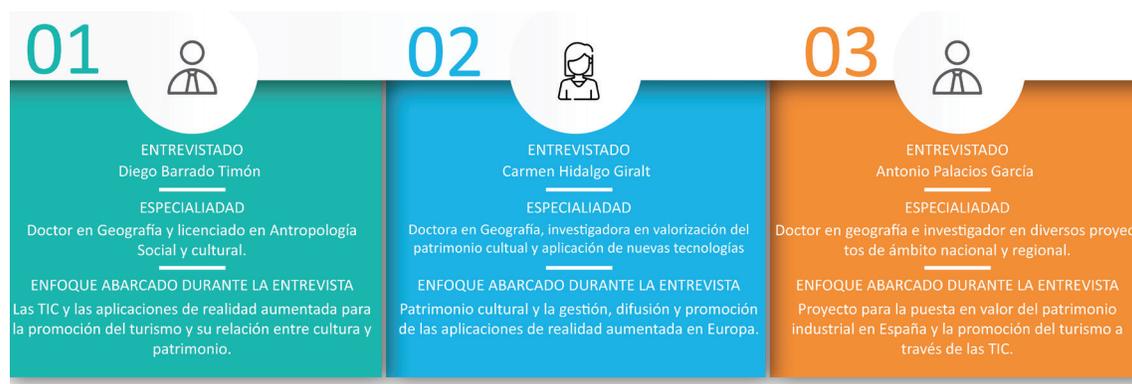
**Figura 1.** Visualización de una posible propuesta realizada por el autor de implementación de realidad aumentada en una edificación patrimonial costarricense. Datos, diagramas y comparación de distintas épocas de la Iglesia Santiago Apóstol. Fuente de la imagen: La Nación

## Materiales y métodos

El Programa de Movilidad Estudiantil, con fondos del sistema CONARE, permitió la visita para el desarrollo de estudios de casos a través de entrevistas y trabajo de campo en Segovia, Barcelona y Toledo, ciudades españolas que cuentan con una amplia experiencia en la

implementación de las TIC en el sector turístico-cultural y el uso de aplicaciones móviles con realidad aumentada. Asimismo, experimentar la interfaz de las aplicaciones móviles y la manera en cómo se difunden, permitió obtener un mejor entendimiento de la puesta en valor del patrimonio arquitectónico, además de elaborar nueva documentación y referencias necesarias para continuar ampliando este modelo en entornos patrimoniales costarricenses

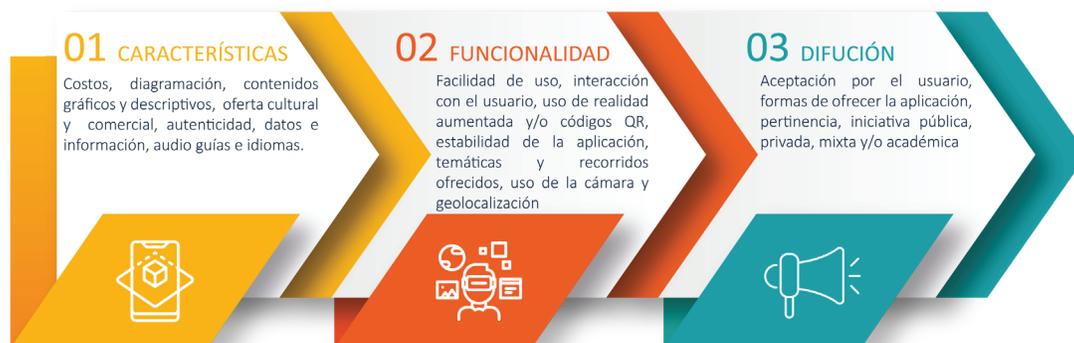
Como parte de la metodología de la investigación, se contó con el apoyo de expertos de la Universidad Autónoma de Madrid, especialistas en geografía humana y amplia experiencia en el sector turístico apoyado por las TIC; esto con el fin recolectar información precisa para conocer la realidad del uso de estas tecnologías en España y conocer la experiencia profesional en cuanto a la utilización de la realidad aumentada para la puesta en valor de entornos patrimoniales con alto interés cultural. Tal como se expone en la imagen 2, para cada una de las entrevistas realizadas, se confecciono una guía de preguntas enfocada al ámbito laboral y profesional del entrevistado, con el fin de obtener los datos pertinentes para lograr una metodología de análisis más integral al momento de realizar el estudio de casos de las ciudades previamente seleccionadas.



**Figura 2.** Tabla de datos de los entrevistados con los distintos enfoques abarcados durante las entrevistas.

De la misma manera, parte de la metodología implementada fue la realización estudios de caso de ciudades que implementaban las TIC y la realidad aumentada en las ciudades de Toledo, Segovia y Barcelona para conocer la incidencia, la implementación y la difusión de estas tecnologías en entornos altamente turísticos, con declaratoria de patrimonio de la humanidad según la UNESCO y con gran valor en su arquitectura y el paisaje urbano.

Se analizaron las propuestas para aplicaciones móviles que ponían en valor el patrimonio arquitectónico y cultural de la zona y que por medio de las TIC promocionaban el turismo. En la figura 3 se observan los distintos parámetros y criterios utilizados para evaluar las aplicaciones en cada una de las ciudades a través de observación participante, la cual es una herramienta que permite la recolección de datos cualitativos del fenómeno estudiado y permite un mejor entendimiento de los fenómenos estudiados [14].



**Figura 3.** Categorización de parámetros para el análisis de aplicaciones de realidad aumentada y promoción del turismo por medio de las TIC, para cada uno de los estudios de casos.

## Resultados

Las distintas entrevistas realizadas, permitieron conocer la realidad y la forma en cómo se implementan las TIC y la realidad aumentada en el sector turístico para la puesta en valor del patrimonio cultural en España. La relación entre los distintos enfoques planteados para las entrevistas y los distintos campos multidisciplinares de los expertos, permitió obtener los siguientes resultados, premisas base para el posterior análisis de cada uno de los estudios de caso:

Inicialmente, según Palacios [15], el acelerado avance tecnológico de los últimos años hace que se deba repensar y gestionar de una manera diferente la manera en que se promociona el turismo, además, este debe de vincular el uso de las tecnologías de la información. El turismo es considerado como una de las actividades económicas más importantes de una ciudad, sino expresamente como una de las “actividades de futuro” en el marco de la “nueva economía”. Su experiencia en la puesta en valor del patrimonio industrial, le permite afirmar la importancia de las nuevas tecnologías en sitios con potencial turístico y como ellas logran vincular de una manera mas eficiente e interactiva el usuario con la ciudad.

Asimismo, según Hidalgo y Barrado [16] [17], la realidad aumentada y la promoción de las TIC en el turismo son herramientas muy eficaces para potenciar y dar a conocer el patrimonio arquitectónico y cultural de una región; además, su vinculación permite revalorizar edificaciones o monumentos que han perdido su valor en la memoria colectiva de una sociedad

La promoción de las TIC y de tecnologías como la realidad aumentada permite una mayor participación de los usuarios en la ciudad o su contexto y el refuerzo del conocimiento del patrimonio perdido o parcialmente conservado. Asimismo, traen consigo dos efectos particularmente beneficiosos para la protección del patrimonio y la “conciencia cultural” y “conciencia del patrimonio” y es que promueven la sensibilidad de los usuarios al patrimonio y la cultura, y aumentan la participación tanto en las ciudades como en los museos [16] [17].

Estas tecnologías permiten enriquecer la experiencia turística, añadiendo información al entorno real fusionada con la pantalla de un dispositivo. La realidad virtual y la realidad aumentada permiten a la ciudad o aun pequeño territorio asumir el rol de un “museo abierto” y las nuevas tecnologías dentro del contexto del *smart city* pueden ser usadas cada vez más para el turismo, la cultura y la investigación. En este contexto de cambio social y cultural en el consumo turístico, la realidad aumentada da lugar a crear contenido más inmersivo que aumenta la satisfacción del usuario [16] [17] [18].

Según Hidalgo [16] entre las limitantes encontradas con el uso de esta tecnología se halla la incapacidad del visitante de balancear la información dada por la aplicación, y el contexto real, centrándose únicamente en la experiencia virtual y no en el contexto físico y según Barrado [17] la idea de la realidad aumentada está mejor dirigida a sitios no tan conocidos turísticamente, ya que al ser una herramienta innovadora presenta mayor ventajas en la atracción de turismo en zonas más desconocidas y con afluencia turística menor que en ciudades donde el hecho de ser patrimonio de la humanidad, ya presentaban una oferta y atracción turística bastante alta.

Dichas entrevistas permitieron generar una concepción previa al momento de evaluar el funcionamiento, propuesta y difusión de aplicaciones móviles que utilizan las TIC y la realidad aumentada para el desarrollo turístico en entornos con interés patrimonial, por lo que los insumos teóricos generados en esa metodología, permitieron el estudio crítico de tres ciudades, con obras y contextos declarados patrimonio de la humanidad que implementan estas tecnologías para revalorizar el patrimonio cultural, arquitectónico y el paisaje urbano histórico.



**Figura 4.** Realidad aumentada aplicada al Alcázar de Segovia. Fuente: eldiasegovia.es

La primera ciudad analizada fue Segovia, declarada Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO en 1985, es un foco de recepción de turistas de primer orden a nivel nacional e internacional, por su rico y variado patrimonio histórico-artístico [19].

Dicha ciudad ha desarrollado en los últimos años diversos proyectos en materia de turismo arquitectónico, cultural y según diversas investigaciones [19] [20], ha implementado el desarrollo de aplicaciones en realidad aumentada (imagen 4), proyectos abordados por iniciativas públicas por parte del ayuntamiento y del estado, así como el apoyo de diversos colectivos ciudadanos.

En el caso de Segovia, el impacto de las TIC y la realidad aumentada está enfocado a dar conocer su turismo y grandes atractivos arquitectónicos de la ciudad. Por medio de aplicaciones móviles y sitios web, el ayuntamiento de Segovia ha logrado poner en valor las obras y edificaciones de interés turístico y cultural por medio de códigos QR, esto con el fin de dar a conocer la historia e interés cultural de cada una de ellas. En la imagen 5, se observa una publicidad con información básica del elemento arquitectónico, pero a su vez el código que enlaza a la página web del ayuntamiento, así como de la aplicación para dispositivos móviles que le permitirá seguir una ruta turística.



**Figura 5.** Información y códigos QR en las afueras de cada obra arquitectónica con interés patrimonial.

De la misma manera, muchos museos y edificios poseen aplicaciones propias que permiten al usuario vivir una experiencia más enriquecedora de los sitios donde se encuentren, así como datos de los atractivos turísticos de la obra en su interior. En la imagen 6, se observa la publicidad a la entrada del museo de la Catedral de Segovia con un código para la descarga de una aplicación que permitirá entender las obras artísticas a mayor profundidad.

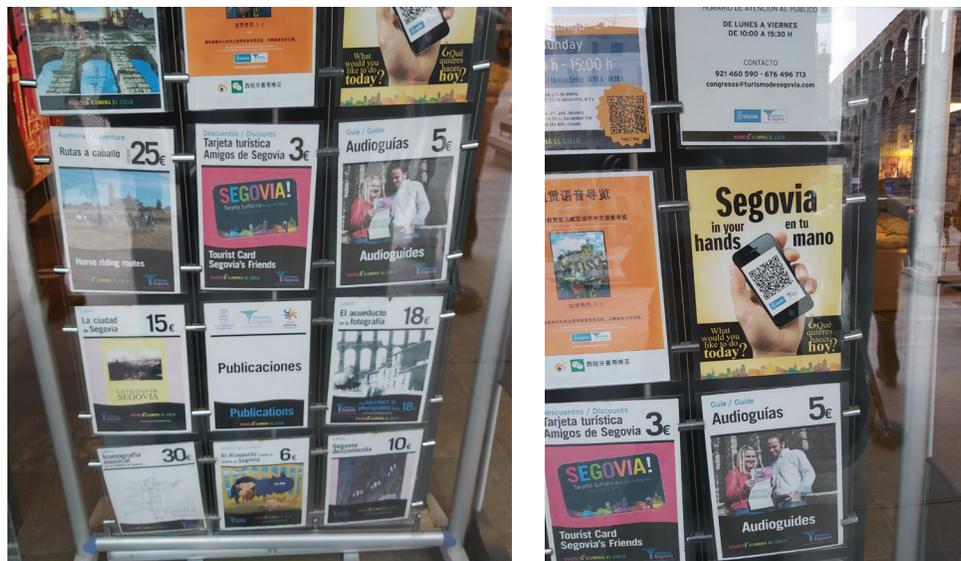
Las aplicaciones móviles en esta ciudad se difunden por medio de folletos turísticos, puntos de información turística y puntos estratégicos de la ciudad (imagen 7), páginas web, noticias y la página oficial de turismo en Segovia; asimismo, en la entrada de cada obra arquitectónica con interés patrimonial o histórico y museos hay letreros con la información correspondiente a la aplicación o página web que proveerá de la información pertinente para cada sitio.

Según Arribas et al [2], para el desarrollo de las actividades turísticas en Segovia se han propuesto infinidad de materiales interpretativos y recursos, desde los clásicos paneles y posters, a las audioguías, pasando por los clásicos folletos, guías y manuales impresos. La irrupción de las tecnologías de la información y de la comunicación (TIC) hace necesario introducir estas herramientas que ponen aún más el valor el patrimonio existente; además de potenciar las posibilidades y la difusión del objeto cultural [21].



**Figura 6.** Promoción de aplicaciones móviles, Catedral de Segovia.

Como segunda ciudad analizada, se procedió a estudiar la implementación de estas tecnologías en la ciudad de Barcelona, principalmente en los sectores con mayor número de edificaciones de carácter patrimonial. Según el Ayuntamiento de Barcelona [22] el turismo es una de las actividades más importantes de Barcelona y representa una prioridad, tanto por la aportación que representa para la economía de la ciudad como por los diversos efectos que genera en la dinámica urbana. La alta cantidad de monumentos, edificios y barrios históricos que componen la ciudad de Barcelona y el aumento en la movilidad la han convertido en una ciudad turística en tiempo récord y probablemente seguirá siéndolo en un futuro próximo.



**Figura 7.** Publicidad de las aplicaciones móviles a las afueras de puestos de información turística.

“Podemos decir que Cataluña está a la vanguardia de la aplicación de tecnologías TIC en el ámbito turístico, las nuevas tecnologías han permitido pasar de un producto turístico homogéneo a un producto individual para cada segmento de visitantes” [23].

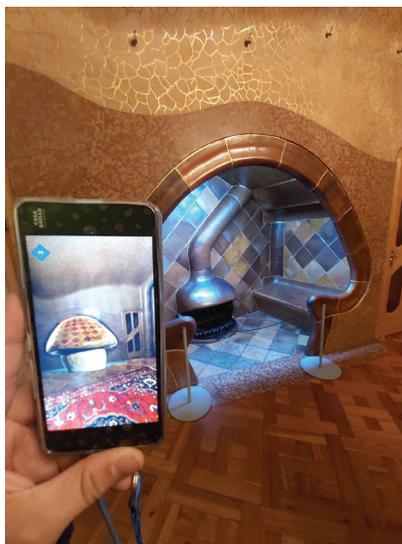
Es por lo anterior que Barcelona ha apostado por la creación y difusión de aplicaciones que permiten explotar su turismo por medio de la puesta en valor de su arquitectura. Tanto iniciativas privadas como públicas se han dado la tarea de crear aplicaciones que utilizan la realidad aumentada para dar a conocer lo más relevante del contexto urbano de la ciudad y de las diferentes edificaciones y monumentos que componen la región (figura 8).



**Figura 8.** Aplicación Rutes Horta-Guinardo.

Entre la iniciativa pública, existen múltiples aplicaciones como: *Ciutat Vella*, *Gracia*, *Horta-Guinardo*, *Nou Barris Rutes Sant Andreu*, *Sarriá-Sant Gervasi*, etc que ofrecen información relevante tanto a turistas como habitantes de la zona para poner en valor el patrimonio histórico y cultural. Dichas aplicaciones, ofrecen rutas turísticas en distintos idiomas, lo que las hacen bastante accesibles para la mayoría de los turistas y la forma en que está diseñada la interfaz, las convierten en herramientas intuitivas sencillas de utilizar.

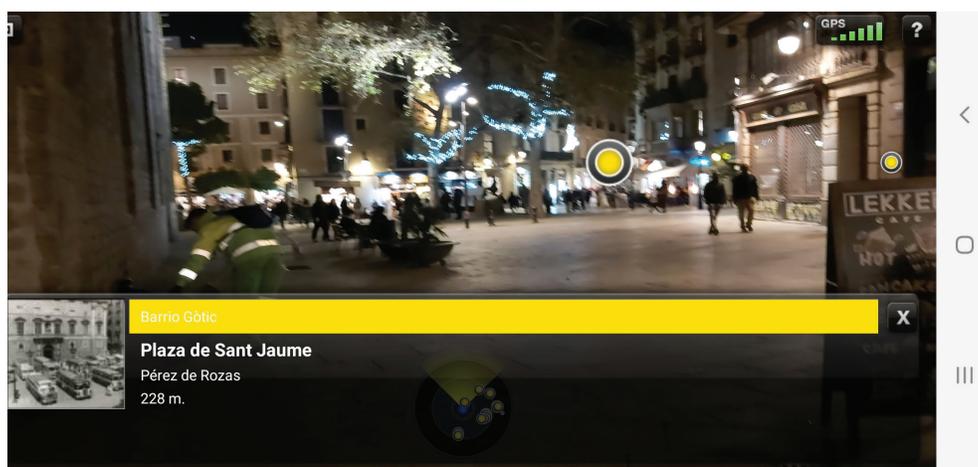
Según diversas fuentes [22] [23], la alta cantidad de turismo que recibe Barcelona año a año ha permitido la posibilidad de proponer aplicaciones que le ofrecen al usuario realizar con un dispositivo móvil rutas preestablecidas en diferentes puntos de la ciudad; el usuario puede escoger la ruta de su preferencia y cada una de ellas utilizará información histórica, imágenes, audioguías y mapas para crear un recorrido dinámico para el usuario; asimismo, estas aplicaciones utilizan la realidad aumentada para generar un contenido visual más interactivo y con la pantalla del dispositivo ir mostrando en tiempo real el nombre del sitio en donde se encuentra o el nombre de la edificación o monumento al que está apuntando la cámara del dispositivo.



**Figura 9.** Dispositivo que utiliza realidad aumentada en el interior de la Casa Batlló, Barcelona.

Dichas iniciativas además proveen de información relevante de la zona donde se encuentra y un video explicativo que muestra información general del lugar; asimismo, muestran listados de diferentes hitos de la ciudad, cada uno de ellos con información pertinente para conocer de su trascendencia histórica y cultural y un mapa que muestra la ubicación de cada uno de los sitios. Las aplicaciones ofrecen el uso de la realidad aumentada en cada una de las rutas que se escoja y dicha herramienta permite generar una experiencia distinta a lo ofrecido comúnmente en otras atracciones turísticas en ciudades con gran valor patrimonial y cultural. La gran mayoría de las aplicaciones no dependen de una conexión a internet permanente para ser utilizadas, con excepción de algunos videos o imágenes que si requieren una conexión para su visualización.

Asimismo, se pone a disposición aplicaciones que vinculan las tecnologías de la información como *Barcelona* y *Visit Barcelona*; aplicaciones de acceso gratuito que no utilizan realidad aumentada, pero ofrecen la información suficiente y actualizada de la ciudad como mapas, zonas de interés, oferta cultural, ocio, comercio, gastronomía y alojamiento, también de información acerca del clima, transporte, itinerarios, tours y noticias recientes de la ciudad.



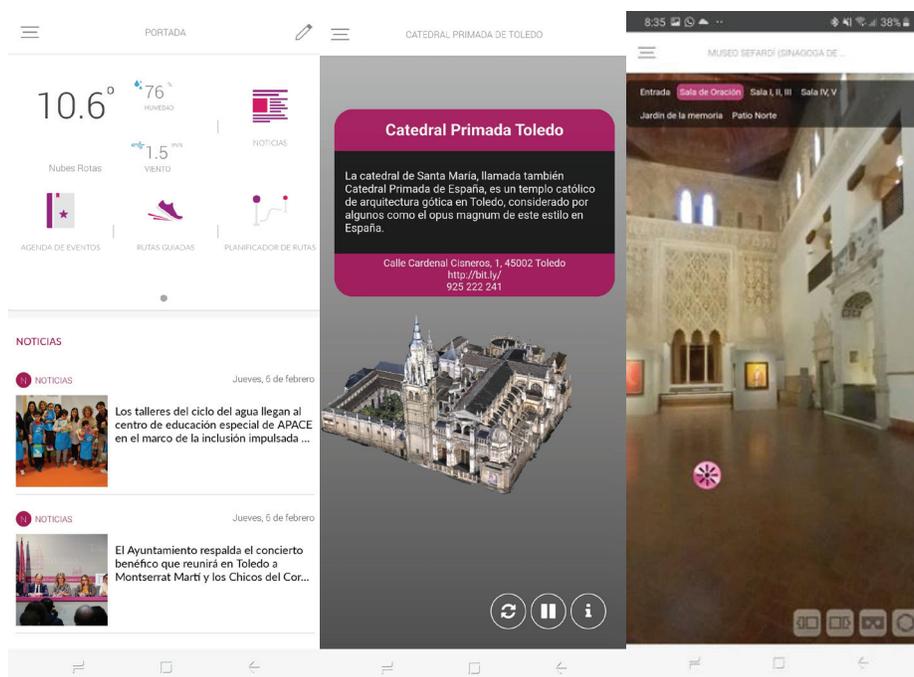
**Figura 10.** Aplicación de la realidad aumentada en contexto urbano.

La gran cantidad de alternativas que el Ayuntamiento de Barcelona ofrece, hace que sea uno de los mejores ejemplos de promoción del patrimonio cultural y arquitectónico de las ciudades analizadas. Asimismo, el hecho de que sean gratuitas y la interfaz accesible para cualquier usuario, aseguran en gran parte el éxito de las aplicaciones.

No obstante, por medio de observación participante y no participante no se logró validar su uso por otros locales y/o turistas; de la misma manera, en los puntos de información turística carecían de la información necesaria para descargar las aplicaciones, en contraste con la ciudad de Segovia que la manera de difundir y promocionar las aplicaciones era más apropiada, dicho inconveniente limitaba la interacción por medio de estas aplicaciones en la ciudad, eran herramientas desconocidas por la gran mayoría de la población y por ende les hacía perder el valor y el gran potencial existente en dichas propuestas.

Finalmente; se estudió las distintas propuestas para la promoción del turismo en la ciudad de Toledo, sitio que data del siglo IV antes de Cristo, su historia, su arquitectura y las culturas que han conformado lo que hoy es la han convertido en Ciudad Patrimonio de la Humanidad. Toledo se ha destacado por que en los últimos años se ha sabido aprovechar las nuevas tecnologías de la información y junto con la realidad aumentada ha logrado promocionar y dar a conocer sus atractivos turísticos y culturales de la zona.

Según Palacios [15] las ciudades donde su mayor fuente de ingresos y sustento económico es el turismo, este debe de explotarse y plantear las herramientas necesarias adecuadas a la época para darse a conocer y seguir manteniendo su gran atractivo en el tiempo. Es por lo que la ciudad de Toledo ha puesto en marcha el proyecto *Toledo Ciudad Inteligente*, —iniciativa pública que adoptó el Ayuntamiento para ofrecer una nueva forma de descubrir el ambiente urbano y visualizar la realidad de una forma distinta ofrecida por teléfonos inteligentes [24].



**Figura 11.** Menú principal, visualización de modelos 3D y realidad aumentada en edificaciones patrimoniales de la aplicación Cintoledo.

Tal como lo indica la referencia [24] *Cintoledo* es un proyecto que se ha desarrollado siguiendo dos líneas de actuación; por una parte, aplicaciones y servicios para los vecinos de Toledo y los turistas y, por otra parte, herramientas para mejorar la gestión de la ciudad y facilitar los procesos de toma de las decisiones. Toledo además ha realizado las gestiones necesarias para mantener la conexión de red inalámbrica en gran parte de la ciudad, esto como un plan para asegurar el éxito de la aplicación. La aplicación ofrece locuciones por parte de personajes históricos, que muestran los principales atractivos que la ciudad tiene que ofrecer, rutas para hacer turismo urbano y de una manera didáctica e interactiva promover la cultura de la ciudad; de la misma manera, la aplicación pone a disposición modelos digitales de las principales obras de arquitectura y la oferta comercial, lo que permite a los visitantes vivir una experiencia distinta e innovadora durante su recorrido.

La aplicación municipal dispone del canal *smart* en el cual los ciudadanos pueden comunicarse con el Ayuntamiento para transmitir incidencias que detecten en la prestación de servicios municipales y, además, proporciona información de interés para los usuarios e incluso les permite participar en los plenos municipales enviando sus opiniones o preguntas al equipo de Gobierno [25].

## Recomendaciones

Las ciudades o pueblos cuya economía dependa en gran parte del turismo deben de apostar por alternativas que vinculen las TIC con el turismo, o con formas más innovadoras como la realidad aumentada para dar a conocer su oferta patrimonial y cultural de un manera más ágil, eficiente e interactiva para los usuarios tal como se observó en las ciudades de Segovia, Barcelona y Toledo.

Las universidades deben de seguir apoyando e impulsando proyectos de esta índole que, además de dar a conocer el patrimonio arquitectónico y cultural de una zona, permite sensibilizar a las personas con la historia y la identidad que cada lugar de estos posee, además, daría a conocer la oferta turística local y beneficiar el comercio que existe en estas comunidades.

En relación con las aplicaciones móviles, se debe de tener presente el mantenimiento de la aplicación una vez que esta ha sido publicada, asimismo, se debe de prever un periodo de mejoras, modificaciones y actualizaciones que surgirán una vez haya sido lanzada la aplicación al mercado.

Es necesario que exista un nivel adecuado de conectividad a datos móviles o internet inalámbrica en estos entornos, esto permitirá un correcto funcionamiento de la aplicación. Se debe de realizar las gestiones o ajustes necesarios que permitan que la aplicación funcione correctamente en el lugar destinado para su aplicación.

Tal como se hizo en Segovia, la forma de difundir la información debe de ser la adecuada para que todos los ciudadanos y turistas puedan tener acceso a la aplicación, los puntos de información turística, letreros con códigos QR, publicación en páginas web y publicaciones digitales son algunos ejemplos de técnicas que utilizó este lugar para promocionar su patrimonio arquitectónico

Las aplicaciones que se vayan a proponer para este fin, deben ofrecer una interfaz de uso sencilla; pero a su vez debe de ofrecer diversidad de contenido actualizado que permita ser una herramienta funcional para el usuario y no caer en desuso; de la misma manera, debe de existir algún tipo de interacción entre la aplicación y el usuario más allá de proveer información, en los casos estudiados los juegos virtuales, la capacidad de dejar una opinión, conocer la oferta cultural y comercial de la zona, son ejemplos que las aplicaciones utilizaban para asegurar su éxito y continuidad en el mercado.

## Conclusiones

A manera de conclusión de los casos de estudio anteriormente presentados, Segovia es una de las ciudades que más invierte en la promoción de sus bienes patrimoniales vinculando las TIC para dar a conocer el turismo en la región y ofrecer alternativas más innovadoras a sus visitantes. Los métodos ofrecidos no tienen costo alguno, muestran un interfaz sencillo de utilizar, su uso es aceptado y utilizado por la población y turistas que visitan dicha ciudad y la gran mayoría de ellas son creadas y ofrecidas por parte de iniciativas públicas.

Por otra parte, Barcelona entre las ciudades en estudio, es una de las ciudades que mejor ha logrado vincular el desarrollo de las TIC y las nuevas tecnologías para poner en valor su patrimonio, cultura y arquitectura; las diferentes interfaces aplicadas en cada uno de los softwares para dispositivos móviles eran sencillos y proveían de la información necesaria para conocer de la mejor manera cada parte de la ciudad. Lo relevante de estas aplicaciones es que la gran mayoría son gestionadas por parte de iniciativas públicas y todas ellas tienen como principal objetivo promocionar el turismo por medio de nuevas tecnologías sin ningún fin de lucro.

Tal como se describió en los resultados, Toledo es una ciudad que logró satisfactoriamente generar una aplicación atractiva para la promoción de su turismo; sin embargo, la falta de promoción y difusión de la aplicación generaba que los visitantes usaran folletos y guías de viaje impresas para recorrer la ciudad.

Se ha podido corroborar la importancia de la realidad aumentada durante la última década y su trascendencia en el campo patrimonial y la promoción de las TIC en las ciudades analizadas. Estas herramientas permiten mostrar elementos del pasado que han desaparecido, información adicional invisible a simple vista, además de ser herramientas interactivas y educativas que enriquecen la experiencia turística de un lugar.

La mayoría de las aplicaciones citadas, cumplen una labor didáctica y lúdica, ideal en los entornos culturales, mientras que por otra es posible la difusión de los estudios e investigaciones que quedarían dentro de un marco estrictamente académico.

Entre los principales inconvenientes encontrados en las aplicaciones de realidad aumentada en el turismo, es que habitualmente muestran a los usuarios un número muy elevado de puntos de interés; lo que genera una dificultad para acceder a la información deseada, más cuando este aún no domina o se le dificulta el uso de esta tecnología, por tanto, cuando se plantea, diseña y ejecuta una aplicación con este fin turístico debe de establecerse un contenido específico o una estrategia para que los resultados ofrecidos al usuario sean los adecuados.

En cuanto al funcionamiento de las aplicaciones, aún la tecnología no es capaz de dar solución a problemas gráficos que genera el uso de la realidad aumentada, en muchos casos el resultado no es realista y los edificios existentes ocultan parte o todo el modelo 3D. Una de las maneras que se utiliza para mantener la homogeneidad y estabilidad de la visualización en realidad aumentada es el modelado 3D del contexto inmediato y del objeto arquitectónico para conseguir ese valor de realismo en las aplicaciones y lograr vincular la realidad y la experiencia con la tecnología o elementos virtuales que complementan la visita.

De igual manera, la falta de promoción y difusión de estas herramientas digitales constituye como el principal inconveniente encontrado en los tres casos estudiados, se debe de plantear las estrategias pertinentes para dar a conocer estas herramientas tecnológicas si se desea incluir las TIC en el ámbito turístico de una manera más efectiva.

Este tipo de propuesta cambia la manera en cómo la información es construida y difundida, la incorporación del ciudadano en el proceso creativo y tecnológico que está empezando a surgir, lleva consigo beneficios directos, entre ellos: facilita el desarrollo, aumenta la aceptación y entendimiento del entorno y al igual que los autores Tato, B. y Vallejo, J. [13] permite amplificar y estimular la oferta cultural relacionada con la arquitectura y la ciudad, logrando de esta manera llegar a un público más amplio y diverso.

Las TIC aplicadas al turismo permiten descubrir cosas nuevas y crear nuevas relaciones, estos enlaces proponen una nueva estructura intelectual basada en un sistema de redes y relaciones que favorecen las dinámicas de interacción social lúdicas para vivir la ciudad, como en los casos analizados de Segovia, Barcelona y Toledo.

## Agradecimientos

Esta publicación se llevó a cabo gracias a la Convocatoria de Fondos para Movilidad Estudiantil de CONARE, con el apoyo del Proyecto Amón\_RA del Instituto Tecnológico de Costa Rica, la Escuela de Arquitectura y Urbanismo del ITCR e investigadores de la Universidad Autónoma de Madrid.

## Referencias

- [1] C. Prendes Espinoza, "Realidad aumentada y educación: análisis de experiencias prácticas," no. 46, pp. 187–203, 2014, doi: [10.12795/pixelbit.2015.i46.12](https://doi.org/10.12795/pixelbit.2015.i46.12).
- [2] A. Arribas, A. Díez-Herrero, I. Gutiérrez-Pérez, and J. Vegas. "Desarrollo de un filtro de realidad aumentada para telefonía móvil sobre el patrimonio geológico de la provincia de Segovia." pp. 21-28, 2013.
- [3] J. L. Leiva-Olivencia, "Realidad aumentada bajo tecnología móvil basada en el contexto aplicada a destinos turísticos," 2014.
- [4] J. L. L. Olivencia, A. G. Plaza, and C. R. Jiménez, "Sistemas de recomendación para realidad aumentada en un sistema integral de gestión de destinos," vol. 0, no. 14, pp. 69–81, 2012.
- [5] J. L. Caro, A. Luque, and B. Zayas. "Nuevas tecnologías para la interpretación y promoción de los recursos turísticos culturales," PASOS. Revista De Turismo Y Patrimonio Cultural, vol.13, no.4, pp. 931-945, 2015. Available: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=88140288014>
- [6] MEP, "Flora and Fauna in Costa Rica | Ministerio de Educación Pública, 2018. [Online]. Available: <https://www.mep.go.cr/educatico/flora-and-fauna-costa-rica>. [Accessed: 2020]
- [7] MEP, "¿Qué hay de nuevo en Educatico? | Ministerio de Educación Pública," 2018. [Online]. Available: <https://www.mep.go.cr/educatico/nuevo-educatico>. [Accessed: 2020]
- [8] W. Montes, "Tecnología y emprendimiento: WOW Emotions," 2018. [Online]. Available: <https://www.larepublica.net/noticia/tecnologia-y-emprendimiento-wow-emotions>. [Accessed: 25-Mar-2020]
- [9] "La Realidad Aumentada en Costa Rica," 2019. [Online]. Available: <http://smartechgroup.es/la-realidad-aumentada-en-costa-rica/>. [Accessed: 25-Mar-2020]
- [10] ITNow, "Startup tica, pionera en realidad aumentada," 2017. [Online]. Available: <https://revistaitnow.com/startup-tica-pionera-realidad-aumentada/>. [Accessed: 25-Mar-2020]
- [11] M. Vargas, "Realidad aumentada hace accesibles reliquias del Teatro Nacional," 2017. [Online]. Available: <https://www.nacion.com/tecnologia/moviles/realidad-aumentada-hace-accesibles-reliquias-del/AHHHIVQ5UBG5JPIXVV4LJHBVKM/story/>. [Accessed: 26-Mar-2020]
- [12] D. Porras and E. Solano, "La implementación de la realidad aumentada como valor agregado para la puesta en valor y difusión del paisaje urbano histórico," pp. 147–156, 2019.
- [13] B. Tato and J. Villejas, "Escenarios urbanos," p. 21, 2011.
- [14] E. P. Aguiar, "Observación participante: una introducción.," pp. 80–89, 2015.
- [15] A. Palacios (private communication), 2019.
- [16] C. Hidalgo. (private communication), 2019.

- [17] D. Barrado (private communication), 2019.
- [18] D. A. Barrado-Timón and C. Hidalgo-Giralt, "The Historic City, Its Transmission and Perception via Augmented Reality and Virtual Reality and the Use of the Past as a Resource for the Present: A New Era for Urban Cultural Heritage and Tourism," vol. 11, no. 10, p. 2835, May 2019, doi: [10.3390/su11102835](https://doi.org/10.3390/su11102835).
- [19] D. M. Sastre, I. R. Martín, and L. R. Martín, "La experiencia 5G en el turismo: el caso de Segovia, Ciudad Patrimonio de la Humanidad," no. E24, pp. 336–348, 2019.
- [20] "La realidad aumentada llega al Alcázar," 2019. [Online]. Available: <https://www.eldiasegovia.es/noticia/ZB658E632-EB1A-8E3E-81102DD0874B0E55/201905/la-realidad-aumentada-llega-al-alcazar>. [Accessed: 26-Mar-2020]
- [21] D. Fonseca Escudero, E. Redondo Domínguez, and F. Valls Dalmau, "Motivación y mejora académica utilizando realidad aumentada para el estudio de modelos tridimensionales arquitectónicos," vol. 17, no. 1, pp. 45–64, 2016.
- [22] Ajuntament de Barcelona, "El espacio de encuentro con la gestión de la ciudad de Barcelona.," 2019. [Online]. Available: <https://ajuntament.barcelona.cat/es>. [Accessed: 2019]
- [23] elPeriodico, "Barcelona apuesta por las TIC para impulsar turismo personalizado de calidad," 2013 [Online]. Available: <https://www.elperiodico.com/es/barcelona/20130521/barcelona-apuesta-por-las-tic-para-impulsar-turismo-personalizado-de-calidad-2396086>. [Accessed: 2019]
- [24] ESMARTCITY, "Una plataforma de gestión, turismo inteligente y realidad aumentada vertebran Toledo como smart city," 27-Sep-2019. [Online]. Available: <https://www.esmartcity.es/2018/09/27/plataforma-gestion-turismo-inteligente-realidad-aumentada-vertebra-toledo-como-smart-city>. [Accessed: 2019]
- [25] I. M. Sánchez and A. A. N. Newball, "La ciudad escondida. Toledo, laboratorio de comunicación transmedia," vol. 31, no. 1, pp. 806–827, 2015.

# Relación entre la fuerza de agarre y pinza con dinamometría isométrica y los desórdenes músculoesqueléticos en la población adulta de Bogotá, Colombia

Relationship between grip and pinch force with isometric dynamometry and musculoskeletal disorders in the Bogota, Colombia adult population

Kevin Pacheco-Arias<sup>1</sup>

---

Pacheco-Arias, K. Relación entre la fuerza de agarre y pinza con dinamometría isométrica y los desórdenes músculoesqueléticos en la población adulta de Bogotá, Colombia. *Tecnología en Marcha*. Vol. 34, especial. Movilidad Estudiantil. Octubre 2021. Pág 78-89.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v34i5.5917>

1 Escuela de Ingeniería en Producción Industrial. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: [k.pache05@hotmail.com](mailto:k.pache05@hotmail.com)  
 <https://orcid.org/0000-0002-3564-5832>



## Palabras clave

Fuerza; agarre; pinza; dinamometría; desórdenes musculoesqueléticos; estadística.

## Resumen

El contar con entornos de trabajo saludables se ha vuelto un desafío importante para la mayoría de las empresas. Dentro de los elementos de promoción que establece la Organización Mundial de la Salud (OMS) se encuentra el adecuado diseño de los puestos de trabajo y el conocimiento de las principales limitaciones de los trabajadores. Por ello, el estudio de las habilidades físicas, como la fuerza de agarre y pinza lateral o palmar se ha vuelto un tema de interés, dado el alto índice de enfermedad laboral en la población adulta de Bogotá. El presente artículo muestra la relación estadística entre la fuerza de agarre y pinza dinamométrica, aspectos como el género, la edad y aquellas afectaciones como el dolor en el cuello, hombro, medio brazo; codo, antebrazo y dedos de los trabajadores del Instituto Colombiano de Bienestar Familiar (ICBF). Esto, mediante un estudio correlacional de corte transversal donde se estudió un N de 317 participantes; 204 mujeres y 113 hombres entre los 18-57 años. Se obtuvo como resultado que no existe relación estadística entre la fuerza de agarre con mano derecha y mano izquierda, dado que  $p=0.006$  era menor al  $\alpha=0.05$ . De igual forma sucedió para la fuerza de pinza lateral con mano derecha y mano izquierda, donde se obtuvo un valor de  $p=0.01$ , menor al  $\alpha=0.05$ . Al analizar la relación entre la fuerza (agarre, pinza lateral y palmar) con respecto al género se obtuvo que existía diferencia estadística entre hombres y mujeres. Finalmente, se analizó su relación con diferentes afectaciones del sistema musculoesquelético.

## Keywords

Force; grip; pinch; dynamometry; musculoskeletal disorders; statistics.

## Abstract

Having a healthy work environment has become a major challenge for most companies. Within the efforts to promote safe work established by the World Health Organization (WHO), they are the adequate job design, the knowledge of the main limitations of the employees, therefore the study of physical capacities and abilities, such as maximum grip strength and lateral and palmar grip has become an interesting topic in consequence the high rate of occupational disease in the Bogota adult population.

This paper points out the statistical relationship between grip and pinch force and aspects such as gender, age; and neck, shoulder, middle arm, elbow, and forearm injuries suffer by the workers of the Colombian Institute of Family Welfare (ICBF). It was done throughout a cross-sectional correlational study, where a 317 participants' population was included, of them: 204 women and 113 men between the ages of 18-57. As result it was obtained that there is not statistical correlation between right- and left-hand grip force, considering that the p value=0.006 is less than the alfa value = 0.05. Likewise, it happens with the pinch force, where the p = 0.01 is less than the alfa value=0.05. When analyzing the statistical correlation between grip force and pinch (palmar and lateral) force it was obtained, as a statistical difference between men and women was obtained. Finally, it was analyzed its correlation with different disorders of the musculoskeletal system.

## Introducción

La tasa de ausentismo laboral en Colombia ha venido en incremento durante los últimos años. De acuerdo con Guerrero y Díaz [1, p. 4] La Organización Internacional del Trabajo (OIT) define el ausentismo laboral como la no asistencia al trabajo por parte del empleado que desde un inicio asistiría, excluyéndose las vacaciones y huelgas. Si se ausenta por causa médica este puede definirse como el período de inasistencia laboral dada una incapacidad en el individuo, haciéndose excepción de los embarazos o temas judiciales.

Con respecto al ausentismo laboral en Colombia, según CELSA [2, p. 12] se ha encontrado que, en 2018, se presentaron 543.540 casos de los cuales la enfermedad general continúa siendo la principal causa de ausencia (63,5%). Gran parte de estas enfermedades se encuentran asociadas con diferentes dolencias o afectaciones del sistema musculoesquelético, conocidos como desórdenes músculoesqueléticos (DME), siendo una de las patologías mayormente diagnosticadas.

De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud [3] los desórdenes musculo esqueléticos más comunes corresponden al dolor de cuello, artrosis, dolor de espalda, las fracturas debidas a la fragilidad ósea, los traumatismos y las enfermedades inflamatorias sistémicas, como la artritis reumatoide. “Los desórdenes músculoesqueléticos son causados por trabajos fatigantes que implican posturas prolongadas, mantenidas y forzadas, con pocas posibilidades de cambio y por fuera de los ángulos confortables”. [4, p. 27]

En relación con varios de los estudios realizados por el Instituto Nacional para la Seguridad y la Salud Ocupacional en el Trabajo (INSSO); en Colombia, las afectaciones del sistema musculoesquelético continúan siendo uno de los problemas de salud mayormente manifestados. Los DME “cubren una amplia gama de problemas de salud que van desde malestar, molestias y dolores menores, a condiciones médicas más graves que pueden conducir a discapacidad permanente”. [5, p. 6]

Como consecuencia de estas afectaciones, la disminución en la fuerza de agarre y pinza se vuelve un punto de interés, ya que la medición de estos esfuerzos permite clínicamente determinar la severidad de las lesiones y obtener un diagnóstico en las habilidades del individuo para el desarrollo de las tareas en el trabajo y parte de sus actividades cotidianas, con el fin de evitar complicaciones futuras en la salud. “Los elementos que intervienen en el desarrollo de actividades laborales es la capacidad prensil o de agarre de las manos, la cual es una función altamente especializada que se debe a una perfecta integración motora y sensorial”. [6, p. 383] Es importante conocer los métodos de valoración funcional que permitan cuantificar la función de prensión de la mano, dado que se presenta como un indicador de riesgo de aquello que limita las funciones del individuo y que repercute en el campo laboral.

El presente artículo, tiene como fin obtener estudios recientes que permitan la valoración en la fuerza de agarre y de pinza en la población del Instituto Colombiano de Bienestar Familiar en Bogotá. Para ello, se ha realizado un muestreo preliminar con el fin de evaluar su posible asociación con los diferentes DME, la edad y el género. Al realizar esta evaluación fue conveniente considerar una serie de aspectos, como lo son: el equipo adecuado para la medición, la posición del paciente a la hora de realizar la medición, instrucciones específicas, normas estadísticas entre otros.

## Metodología

### Tipo de investigación y tamaño de muestra

Este estudio consistió en una investigación correlacional de corte transversal. Se evaluó una población de 317 trabajadores del Instituto Colombiano de Bienestar Familiar (ICBF). Del total de trabajadores, 204 eran mujeres y 113 hombres, todos entre los 18 y los 57 años. Para el análisis se empleó el software estadístico Minitab 18, por medio del cual se analizaron las variables mediante estadísticos descriptivos, pruebas t-student de diferencia de medias y regresión logística binaria. Primeramente, se evaluó la relación estadística entre la fuerza de agarre, pinza lateral y palmar para mano izquierda y mano derecha. Asimismo, se analizó la relación estadística entre ambos géneros, masculino y femenino. Por último, se analizó la relación de estos esfuerzos con la edad y los desórdenes musculoesqueléticos: dolor en el cuello, hombro; medio-brazo, codo; antebrazo, muñeca y dedos.

### Variables de investigación

Para el análisis fue necesario clasificar las variables a estudiar en dos grupos: Variables dependientes y variables independientes. Estas variables representan los valores categóricos y continuos que fueron empleadas a lo largo de la investigación.

**Cuadro 1.** Variables dependientes e independientes en el estudio.

Variables dependientes	Variables independientes	
Fuerza de Agarre	Dolor Cuello	Dolor Codos
Fuerza de Pinza Palmar	Dolor Hombros	Dolor Antebrazo
Fuerza de Pinza Lateral	Dolor Medio brazo	Edad y género

Fuente: Elaboración propia con información proporcionada por la USTA,2019

### Herramientas y materiales para el análisis de datos

Los datos analizados fueron tomados de una base de datos suministrada por la Universidad Santo Tomás, Bogotá, Colombia. Estos datos fueron medidos por los estudiantes Cinthia Reales, Christian Zea y la docente investigadora Magda Viviana Monrroy Silva. Para el análisis se empleó el software estadístico Minitab 18, por medio del cual se analizaron las variables mediante estadísticos descriptivos, pruebas t-student de diferencia de medias y regresión logística binaria.

### Protocolo de medición

Para el protocolo de medición se tomaron en cuenta cada uno de los pasos de la revisión realizada por Cinthia A. Reales, Christian R. Zea F. y Magda V. Monrroy S. [7]

1. La información se recopiló en una población de hombres y mujeres entre los 18 y 57 años pertenecientes a una empresa gubernamental.
2. Se presentó el consentimiento informado a los participantes donde conocen las consideraciones éticas, la seguridad de los datos y posturas, junto con el protocolo de medición.
3. Por medio de la dinamometría isométrica, específicamente con el dinamómetro Jamar, se valoró la fuerza máxima de pinza, pinza palmar y pinza lateral de la mano.

## Resultados y discusión

### Relación entre la fuerza de agarre con mano derecha y mano izquierda

Primeramente, se analizó la relación estadística entre el esfuerzo de agarre con mano derecha y mano izquierda para la población en estudio. En el cuadro 2. Se muestra el resumen estadístico (valor mínimo, promedio, máximo, desviación estándar, etc.) de la fuerza de agarre para un N=317.

**Cuadro 2.** Resumen estadístico de la fuerza máxima de agarre.

Fuerza de agarre Kg/F		No. Participantes	Mano Derecha				Mano Izquierda			
			Min	Prom	Máx	Desv. Est	Min	Prom	Máx	Desv. Est
Población total		317	10	33,4	62	10,4	10	31,7	65	10,3
Edad	Entre 18 - 24 años	11	21,3	29,1	40,3	6,2	20	29,3	44	6,6
	Entre 25 - 32años	81	18	33,9	55,3	8,6	13,3	31,7	57	9,1
	Entre 33 - 40 años	96	12	34,3	61,7	11,8	12	32,6	65	11,5
	Entre 41 - 48 años	48	17,3	33,3	59,3	11	17,3	32,5	57	11
	Entre 49 - 56 años	49	10	32,9	62	10,8	11	31,5	57	11
	Mayor de 57	33	10	32,2	62	10,2	10	29	49	8,6
Género	Femenino	205	10	27,4	46,7	5,7	10	25,9	44	5,6
	Masculino	113	18	44,1	62	8	21,7	42,2	65	8,2
Dominancia	Derecha	288	10	33,7	62	10,3	10	31,8	65	10,3
	Izquierda	22	15	32	54,7	10,8	13	33,2	56	10,8
	Ambas	8	17,3	24	33,3	5,9	16,3	24,5	32	5,6
IMC	Peso Bajo	3	34,7	39,9	44,3	4,9	23,3	34,7	43	10,3
	Adecuado	141	10	31,3	61,3	9,4	11	29,6	60	9,2
	Sobrepeso	138	13,7	35,9	62	11,1	10	34,1	57	10,9
	Obesidad Grado 1	27	17,3	30,6	52,3	8,4	15	29,6	49	65
	Obesidad Grado 2	9	17,3	35,6	59,7	11,8	18,7	34,1	65	13,9

Fuente: Elaboración propia con información brindada por la USTA, 2019

De acuerdo con el cuadro 2. para la evaluación de la Fuerza de agarre con mano derecha y mano izquierda, se obtiene como resultado que en general la muestra de N=317 presenta un mayor registro de fuerza de agarre en la mano derecha, con un promedio de 33,4 *Kgf* y una desviación en los datos de 10,4 *Kgf*. El registro más alto en edad sobre la fuerza de agarre promedio en mano derecha la registran aquellos participantes que se encuentran en un rango de 33 y 40 años con una fuerza promedio de 34,3 *Kgf* y una desviación de 11,8 *Kgf*. Para la variable de género en los participantes, se evidencia que la mayor fuerza de agarre en mano derecha la presenta el género masculino con un valor de 44,1 *Kgf* con una desviación de 8,0 *Kgf*. El valor de la fuerza de agarre de acuerdo con la mano dominante evidencia que las personas con dominancia en la mano derecha (diestros), registran mayor fuerza en su mano dominante con un promedio de 33,7 *Kgf* y una desviación de 10,3 *Kgf*. De igual forma, las personas con dominancia en la mano izquierda (zurdos), quienes registraron mayor fuerza en su mano dominante con un valor promedio de 33,2 *Kgf* y una desviación estándar de 10,8 *Kgf*.

Finalmente, con respecto al índice ,de masa corporal (IMC), el mayor registro de dicha fuerza se caracterizó en la mano derecha con los participantes catalogados con peso bajo, con un valor promedio de 39,9 *Kgf* con una desviación estándar de 4,9 Kg/F.

Con el fin de conocer si existía diferencia significativa entre la fuerza máxima de agarre de mano derecha y mano izquierda de la población en estudio, se realizó una prueba de diferencia de medias t-student con un nivel de confianza del 95% y un  $\alpha = 5\%$ , donde se planteó la siguiente hipótesis:

*Hipótesis*

Ho: No existe diferencia significativa entre la Fuerza de Agarre de la mano derecha y la mano izquierda.

Ho:  $\mu$  agarre derecha =  $\mu$  agarre izquierda.

H1: Existe diferencia significativa entre la Fuerza de Agarre de la mano derecha y la mano izquierda.

H1:  $\mu$  agarre derecha  $\neq$   $\mu$  agarre izquierda.

**Cuadro 3.** Resultados prueba t para diferencia de medias.

Prueba t student para diferencia de medias							
Fuerza de agarre	No se asumen varianzas iguales	t	gl	valor de p	95% intervalo de confianza de la diferencia		
		2,74	631	0,006	2,278	inferior	superior
						0,645	3,912

Fuente: Elaboración propia con el software Minitab 18.

Según los resultados obtenidos en el cuadro 3. es posible concluir que la fuerza de agarre con mano derecha y mano izquierda de la población adulta de Bogotá es diferente, dado que el valor de  $p=0,006$  es menor a  $\alpha = 5\%$ . Es posible concluir que se incurre en Error tipo I, al rechazar Ho.

**Relación entre la fuerza máxima de pinza lateral con mano derecha y mano izquierda**

En segundo lugar, se analizó la relación estadística entre la fuerza de pinza con mano derecha y mano izquierda de la población en estudio. En el cuadro 4. se muestra el estadístico descriptivo (valor mínimo, promedio, máximo, desviación estándar, etc.) para un N=317.

**Cuadro 4.** Resumen estadístico fuerza máxima de pinza lateral.

Fuerza de Pinza lateral/ key (Kg/F)		No. Participantes	Mano Derecha				Mano Izquierda			
			Min	Prom	Máx	Desv. Est	Min	Prom	Máx	Desv. Est
Población total		317	3	7,5	13,2	1,9	1,7	7	14	1,8
Edad	Entre 18 - 24 años	11	5,6	7,1	9	1,3	4,8	6,7	8,8	1,4
	Entre 25 - 32 años	81	3,9	7,3	12	1,7	3,5	6,9	11	1,6
	Entre 33 - 40 años	96	4,7	7,7	13,2	2	4,1	7,1	14	1,8
	Entre 41 - 48 años	48	3,5	8	12,2	2,1	4,3	7,5	11	1,8
	Entre 49 - 56 años	49	3	7,4	11,7	2,2	1,7	7	11	2,1
	Mayor de 57	33	3,5	7,2	11	1,8	3,2	6,4	9,7	1,5
Género	Femenino	205	3	6,5	10,2	1,3	1,7	6,1	11	1,2
	Masculino	113	5,4	9,4	13,2	1,5	4,2	8,7	14	1,4
Dominancia	Derecha	288	3	7,6	12,6	1,9	1,7	7	12	1,7
	Izquierda	22	4,1	7,3	13,2	2,5	3,7	7,4	14	2,2
	Ambas	8	5,2	6,1	7,1	0,7	5	6,1	7,1	0,7
IMC	Peso Bajo	3	8	9,2	10,5	1,3	6,5	7,8	8,4	1,1
	Adecuado	141	3	7	11,5	1,7	1,7	6,5	10	1,5
	Sobrepeso	138	3,5	8	12,6	2	3,2	7,5	14	1,9
	Obesidad Grado 1	27	4,8	7,3	11,4	1,7	5,1	7,1	11	1,6
	Obesidad Grado 2	9	4,6	8,6	13,2	2,8	4	7,6	10	2,3

Fuente: Elaboración propia con información brindada por la USTA, 2019

De acuerdo con el cuadro 4 para la valoración la fuerza de pinza lateral para la mano derecha y mano izquierda es posible denotar que en general la muestra de  $N=317$  presenta un mayor registro de fuerza de pinza en la mano derecha, con un promedio de  $7,5 \text{ Kg}$  y una desviación en los datos de  $1,9 \text{ Kg}$ . El registro más alto en edad sobre la fuerza de agarre promedio en mano derecha la registran aquellos que se encuentran en un rango entre los 41 y 48 años con una fuerza promedio de  $8,0 \text{ Kg}$  y una desviación de  $2,1 \text{ Kg}$ . Para la variable de género en los participantes, se evidencia que la mayor fuerza de agarre en mano derecha la presenta el género masculino con un valor de  $9,4 \text{ Kg}$  y una desviación de  $13,2 \text{ Kg}$ . El valor de la fuerza de pinza lateral de acuerdo con la mano dominante evidencia que las personas con dominancia en la mano derecha (diestros) registran mayor fuerza en su mano dominante con un promedio de  $7,6 \text{ Kg}$  y una desviación de  $1,9 \text{ Kg}$ . De igual forma, las personas con dominancia en la mano izquierda (zurdos) registraron mayor fuerza en su mano dominante con un valor promedio de  $7,4 \text{ Kg}$  y una desviación estándar de  $2,2 \text{ Kg}$ . Con respecto al índice de masa corporal (IMC), el mayor registro de dicha fuerza se caracterizó en la mano derecha con los participantes catalogados con peso bajo, con un valor promedio de  $9,2 \text{ Kg}$  con una desviación estándar de  $1,3 \text{ Kg}$ .

Al igual que el caso anterior, para conocer si existía diferencia significativa entre la fuerza máxima de pinza de mano derecha y mano izquierda de la población en estudio, se realizó una prueba de diferencia de medias t-student con un nivel de confianza del 95% y un  $\alpha = 5\%$ , donde se planteó la siguiente hipótesis:

*Hipótesis*

Ho: No existe diferencia significativa entre la Fuerza de Pinza Lateral mano derecha y la mano izquierda.

Ho:  $\mu$  pinza derecha =  $\mu$  pinza lateral izquierda.

H1: Existe diferencia significativa entre la Fuerza de Pinza Lateral de la mano derecha y la mano izquierda.

H1:  $\mu$  pinza derecha  $\neq$   $\mu$  pinza lateral izquierda.

**Cuadro 5.** Resultados prueba t student para diferencia de medias.

Prueba t para diferencia de medias							
Fuerza de agarre	No se asumen varianzas iguales	t	gl	valor de p	95% intervalo de confianza de la diferencia		
		3,45	627	0,001	Diferencia	inferior	superior
					0,506	0,218	0,794

Fuente: Elaboración propia con software Minitab 18.

Según los datos que se muestran en el cuadro 5. es posible concluir que la fuerza de pinza lateral con mano derecha y mano izquierda presentan diferencia significativa. Esto dado a que el valor de  $p=0,001$  es menor al  $\alpha = 5\%$ , por lo que se rechaza Ho. Es posible inducir que se incurre en Error tipo I, al rechazar el Ho.

Luego de concluir que para los esfuerzos analizados anteriormente (agarre y pinza) tanto la mano derecha como la mano izquierda eran significativamente diferentes se procede analizar la relación estadística con respecto al género. Los resultados se resumen en el cuadro 6.

**Cuadro 6.** Relación estadísticas tipo de fuerza vrs género.

Resultados relación estadística Fuerzas vrs Género			
Variable Continua	Variable Categórica	Relación estadística	
		Derecha	Izquierda
Fuerza Agarre	Género (Masculino vrs Femenino)	No	No
Fuerza Pinza Lateral	Género (Masculino vrs Femenino)	No	No
Fuerza Pinza Palmar	Género (Masculino vrs Femenino)	No	No

De acuerdo con el cuadro 6 es posible denotar que para cada una de las variables fuerza de agarre, pinza lateral y pinza palmar derecha e izquierda, no existe relación estadística entre el género masculino y femenino. Es decir, la fuerza de los hombres y las mujeres dista significativamente.

### *Regresión logística binaria*

Luego de analizar si existía diferencia significativa entre el género masculino y femenino por cada una de las fuerzas presentadas, se procede analizar su relación estadística con la edad y otras afectaciones comunes como el tipo de dolor presente en el paciente (cuello, hombro; medio-brazo, codo; antebrazo, muñeca y dedos) a fin de conocer si cada una de estas variables afecta directamente la respuesta. “La regresión logística es una técnica estadística multivariable destinada al análisis de una relación de dependencia entre una variable dependiente y un conjunto de variables independientes, de forma similar a como actúa el análisis de regresión lineal clásico” [8, p. 5].

### Relación entre la fuerza de agarre, el género, la edad y los desórdenes musculo esqueléticos (DME)

En el cuadro 7. se presentan los resultados obtenidos a partir del análisis de regresión logística binaria entre la fuerza de agarre y las variables independientes.

**Cuadro 7.** Resumen resultados ajuste modelo logístico binario fuerza máximo de agarre.

Resultados ajuste modelo logístico binario					
Tipo de dolor	Variable Continua	Relación estadística		Variable Categórica	Relación estadística
		Derecho	Izquierdo		
Cuello	Fuerza Agarre	No	No	Género	Sí
	Edad	No			
Hombro derecho	Fuerza Agarre	No	No	Género	Sí
	Edad	Sí			
Hombro izquierdo	Fuerza Agarre	No	No	Género	Sí
	Edad	No			
Medio brazo derecho	Fuerza Agarre	No	No	Género	No
	Edad	No			
Medio brazo izquierdo	Fuerza Agarre	No	No	Género	No
	Edad	No			
Codo derecho	Fuerza Agarre	No	No	Género	No
	Edad	No			
Codo izquierdo	Fuerza Agarre	No	No	Género	No
	Edad	No			
Antebrazo derecho	Fuerza Agarre	No	No	Género	No
	Edad	No			
Antebrazo izquierdo	Fuerza Agarre	No	No	Género	No
	Edad	No			
Muñeca derecha	Fuerza Agarre	No	No	Género	No
	Edad	No			
Muñeca izquierda	Fuerza Agarre	No	No	Género	No
	Edad	No			
Dedos derecha	Fuerza Agarre	No	No	Género	No
	Edad	Sí			
Dedos izquierda	Fuerza Agarre	No	No	Género	No
	Edad	No			

Según los resultados del cuadro 7. se obtiene que, ninguna de las afectaciones o dolencias por DME afecta la fuerza de agarre(derecha o izquierda) del paciente. Sin embargo, se puede apreciar que, el dolor en el hombro derecho y los dedos sí presentan relación estadística con la edad, lo que significa que estas dolencias aumentan o disminuyen conforme la edad del paciente. Con respecto al género, se puede apreciar que, únicamente el dolor en el cuello y los hombros se presenta con la misma intensidad tanto en hombres como mujeres, pues sí presentan relación estadística significativa.

### Relación entre la fuerza de pinza lateral, el género, la edad y los desórdenes musculo esqueléticos (DME)

En el cuadro 8. se presentan los resultados obtenidos a partir del análisis de regresión logística binaria entre la fuerza de pinza lateral y las variables independientes.

**Cuadro 8.** Resumen resultados ajuste modelo logístico binario fuerza pinza lateral.

Resultados ajuste modelo logístico binario					
Tipo de dolor	Variable Continua	Relación estadística		Variable Categórica	Relación estadística
		Derecho	Izquierdo		
Cuello	Fuerza Pinza Lateral	No	No	Género	Sí
	Edad	No			
Hombro derecho	Fuerza Pinza Lateral	No	No	Género	Sí
	Edad	Sí			
Hombro izquierdo	Fuerza Pinza Lateral	Sí	No	Género	Sí
	Edad	No			
Medio brazo derecho	Fuerza Pinza Lateral	No	No	Género	Sí
	Edad	No			
Medio brazo izquierdo	Fuerza Pinza Lateral	No	No	Género	No
	Edad	No			
Codo derecho	Fuerza Pinza Lateral	Sí	No	Género	No
	Edad	No			
Codo izquierdo	Fuerza Pinza Lateral	No	No	Género	No
	Edad	No			
Antebrazo derecho	Fuerza Pinza Lateral	No	No	Género	No
	Edad	No			
Antebrazo izquierdo	Fuerza Pinza Lateral	No	No	Género	No
	Edad	No			
Muñeca derecha	Fuerza Piza Lateral	No	No	Género	No
	Edad	No			
Muñeca izquierda	Fuerza Pinza Lateral	No	No	Género	No
	Edad	No			
Dedos derecha	Fuerza Pinza Lateral	Sí	No	Género	No
Dedos izquierda	Fuerza Pinza Lateral	No	No	Género	No
	Edad	No			

De acuerdo con los resultados del cuadro 8. se observa que, de todas las afectaciones analizadas por DME, únicamente el dolor en hombro derecho, codo derecho y los dedos de la mano derecha afectan la fuerza de pinza lateral del paciente. A su vez, se denota que tanto el dolor en el hombro derecho como los dedos de la mano derecha se relaciona estadísticamente con la edad, por lo que estos aumentan o disminuyen en proporción a esta. Por otra parte, también se puede observar que, el dolor en el cuello, los hombros (derecho e izquierdo) y el medio brazo derecho se presenta con la misma intensidad tanto para hombres como mujeres al existir relación estadística significativa.

### Relación entre la fuerza de pinza palmar, el género, la edad y los desórdenes musculo esqueléticos (DME)

En el cuadro 9. se presentan los resultados obtenidos a partir del análisis de regresión logística binaria entre la fuerza de pinza palmar y las demás variables independientes.

**Cuadro 9.** Resumen resultados ajuste modelo logístico binario fuerza pinza palmar.

Resultados ajuste modelo logístico binario					
Tipo de dolor	Variable Continua	Relación estadística		Variable Categórica	Relación estadística
		Derecho	Izquierdo		
Cuello	Fuerza Pinza Palmar	No	No	Género	Sí
	Edad	No			
Hombro derecho	Fuerza Pinza Palmar	No	No	Género	Sí
	Edad	No			
Hombro izquierdo	Fuerza Pinza Palmar	No	No	Género	Sí
	Edad	No			
Medio brazo derecho	Fuerza Pinza Palmar	Sí	No	Género	Sí
	Edad	No			
Medio brazo izquierdo	Fuerza Pinza Palmar	No	No	Género	No
	Edad	No			
Codo derecho	Fuerza Pinza Palmar	Sí	No	Género	No
	Edad	No			
Codo izquierdo	Fuerza Pinza Palmar	No	No	Género	No
	Edad	No			
Antebrazo derecho	Fuerza Pinza Palmar	No	No	Género	No
	Edad	No			
Antebrazo izquierdo	Fuerza Pinza Palmar	No	No	Género	No
	Edad	No			
Muñeca derecha	Fuerza Pinza Palmar	No	No	Género	No
	Edad	No			
Muñeca izquierda	Fuerza Pinza Palmar	No	No	Género	No
	Edad	No			
Dedos derecha	Fuerza Pinza Palmar	No	No	Género	No
	Edad	Sí			
Dedos izquierda	Fuerza Pinza Palmar	No	No	Género	No
	Edad	No			

De acuerdo con los resultados del cuadro 9 es posible denotar que, de todas las afectaciones analizadas, el dolor en el medio brazo y codo derechos son las únicas que presentan relación estadística con la fuerza de pinza palmar derecha. También es posible denotar que el dolor en los dedos de la mano derecha se relaciona estadísticamente con la edad, por lo que este aumenta o disminuye en proporción a esta. Por último, es posible apreciar que, el dolor en el cuello, los hombros y el medio brazo derecho es el mismo tanto para hombres como mujeres, pues presentan relación estadística significativa.

## Conclusiones y/o recomendaciones

- Se determinó que existe diferencia estadística significativa entre la fuerza de agarre con mano derecha y mano izquierda de la población en estudio, con un valor de  $p=0,006$  menor al alfa de 0,05.
- Se obtiene que existe diferencia estadística significativa entre la fuerza de pinza con mano izquierda y mano derecha, con un valor de  $p$  de 0,001 menor al alfa de 0,05.
- Se determinó que existe diferencia estadística significativa entre el género: masculino y femenino con respecto a cada una de las fuerzas: agarre, pinza lateral y palmar.
- Se determinó que la fuerza de agarre no se ve afectada por ninguna de los desórdenes musculoesqueléticos en el paciente.
- Se obtuvo que la fuerza de pinza lateral se ve afectada únicamente por el dolor en el hombro, dolor en el codo derecho, dolor en los dedos derecha y la edad la edad del paciente.
- Se concluye que la fuerza de pinza palmar, únicamente se ve afectada por el dolor en el medio brazo derecho.
- Con los resultados obtenidos de esta investigación es posible dar continuidad a otros estudios relacionados con la influencia de los desórdenes musculoesqueléticos en el campo laboral y salud de la población adulta de Bogotá, Colombia.

## Agradecimientos

Agradezco a los semilleros de investigación científica de la Universidad Santo Tomás de Aquino (USTA), Bogotá Colombia por permitirme realizar mi pasantía y llevar a cabo esta investigación, en especial a los docentes investigadores el Ing. Diego Fernando Sánchez Zambrano y a la Ing. Magda Viviana Monrroy Silva por su apoyo, asesoría y acompañamiento en todo momento. Finalmente agradezco a mi universidad; el Instituto Tecnológico de Costa Rica, al programa de Movilidad Estudiantil (TEC-CONARE) y la Escuela de Ingeniería en Producción Industrial por permitirme el desarrollo de experiencia tan enriquecedora en el trabajo de investigaciones como la expuesta a largo de este artículo.

## Referencias

- [1] A. Guerrero y K. Diaz, «Caracterización del ausentismo laboral por causas médicas en una empresa de alimentos de la ciudad de Bogotá D.C 2013-2014,» Universidad del Rosario, Bogotá, 2016.
- [2] CESLA, «Tercer Informe de seguimiento sobre ausentismo laboral e incapacidades médicas,» Medellín, Colombia, 2019.
- [3] OMS, «Organización Mundial de la Salud,» 9 Agosto 2019. [En línea]. Available: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/musculoskeletal-conditions#:~:text=Como%20se%20indica%20en%20la,asociados%20como%20tendones%20y%20ligamentos>.
- [4] C. Ordóñez, E. Gómez y A. Calvo , «Desórdenes músculo esqueléticos relacionados con el trabajo,» *Revista Colombiana de Salud ocupacional*, p. 26, 2016.
- [5] S. Malca Sandoval, «Trastornos musculoesqueléticos de origen laboral en el cuello y las extremidades superiores de los fisioterapeutas en Cataluña,» 2017. [En línea]. Available: <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/420862/Tsms1de1.pdf?sequence=2&isAllowed=y>. [Último acceso: 05 Septiembre 2017].
- [6] C. Zea, M. P. Caro y L. A. Quintana , «LA. Análisis de la disminución de fuerza de agarre en la mano por uso de guante en actividades de aseo y cafetería,» *Revista de ciencias de la salud*, p. 383, 2016.
- [7] M. V. Monrroy Silva, C. Zea y C. Reales, Interviewees, *Relación entre la Fuerza de Agarre y Pinza con Dinamometría Isométrica y los desórdenes musculoesqueléticos en la población adulta de Bogotá*. [Entrevista]. 2019.
- [8] P. López Roldan y S. Fachelli, *Metodología de la investigación Social Cuantitativa*, Barcelona: Universidad Autónoma de Barcelona, 2015, p. 5.

# Estación de recarga para dotar de mayor autonomía al Robobo

## Charging station to provide greater autonomy to the Robobo

Mónica Vizcaíno-Delgado<sup>1</sup>

---

Vizcaíno-Delgado, M. Estación de recarga para dotar de mayor autonomía al Robobo. *Tecnología en Marcha*. Vol. 34, especial. Movilidad Estudiantil. Octubre 2021. Pág 90-100.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v34i5.5919>

1 Área académica de ingeniería mecatrónica. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: [monivii94@gmail.com](mailto:monivii94@gmail.com)



## Palabras clave

Plataforma robótica móvil; robótica autónoma; robótica colectiva; baterías de LiPo.

## Resumen

Robobo consiste en una plataforma robótica móvil desarrollada por la compañía MINT de la Universidade da Coruña. Actualmente se utiliza como una herramienta para el aprendizaje y el aprovechamiento de las capacidades de la robótica autónoma y colaborativa en escuelas y centros de investigación, además cuenta con un paquete comercial educativo que incluye cuatro unidades. Sin embargo, el funcionamiento del Robobo carece de un proceso de recarga autónomo, automatizado, homogéneo o simultáneo. Es por lo tanto que este artículo trata la importancia y el diseño de un primer prototipo electromecánico de una estación de recarga para obtener un ciclo de carga autónomo y simultáneo de hasta cuatro plataformas robóticas móviles Robobo.

## Keywords

Robotic mobile platform; autonomous robotics; collective robotics; LiPo batteries.

## Abstract

Robobo is a mobile robotic platform developed by Universidade da Coruña's MINT company. It is currently used as a tool for learning and benefit from the different advantages of autonomous and collaborative robotics at schools and investigation centers, it also can be found on the market as an educational package that includes four units. However, Robobo's performance lacks on an autonomous, automated, homogeneous or simultaneous recharging process. Therefore, this article treats the importance and the design of a first electromechanical prototype of a charging station as an approach to obtain an autonomous and simultaneous charging cycle of up to four Robobo mobile platforms.

## Introducción

Robobo es un robot educativo creado por la Universidade da Coruña para realizar proyectos de robótica autónoma. Su diseño consiste en una base móvil a la que se acopla un teléfono inteligente y posee características que le permiten ser utilizado no solo de forma individual en hogares, sino también en instituciones educativas y de investigación; desde escuelas hasta universidades. En cualquier nivel, permite el acceso a todos los sensores y actuadores de la plataforma robótica y del teléfono inteligente, y a todas las funcionalidades proporcionadas por el sistema operativo de Android [1].

Se identificaron deficiencias en el proceso de recarga del Robobo debido a su entorno usual de funcionamiento, que implica el uso simultáneo de múltiples plataformas y por lo tanto la posible necesidad de recargas simultáneas. Esto genera dependencia en el número de toma corrientes y de cargadores de pared disponibles. Además, la ausencia de la total autonomía del Robobo, y específicamente en su proceso de recarga, podrían derivar en posibles daños eléctricos o mecánicos de su base. En conjunto, estos factores derivan en un alto tiempo total de recarga y afectan la disponibilidad de Robobos.

Es por lo tanto que este artículo trata la importancia y el diseño de un primer prototipo de una estación de recarga que permita la carga autónoma y simultánea de hasta cuatro plataformas robóticas móviles Robobo. A continuación se presenta la caracterización de la robótica y

los tipos de robots, de acuerdo con el Grupo de Robótica (GtRob) del Comité Español de Automática; se describen los requerimientos básicos para obtener una solución de recarga autónoma y simultánea óptima; y se concluye con un resumen del diseño electromecánico y del algoritmo que describe el funcionamiento del prototipo, el cual se detalla más a fondo en [2], donde se presenta el proceso para la obtención, desarrollo y validación del mismo.

## Desarrollo

### La robótica y sus ramas

Hoy en día es posible encontrar diversas definiciones de la palabra robot. De acuerdo con la Real Academia Española [3], su significado viene de la palabra checa *robot*, que se refiere a “trabajo o prestación personal”. En la enciclopedia británica [4] se amplía el término de robot a una máquina operada automáticamente que sustituye el esfuerzo de los humanos, aunque no tiene por qué poseer apariencia humana o desarrollar sus actividades a la manera de los humanos. Por lo tanto, por extensión, la robótica es la disciplina de la ingeniería encargada del diseño, construcción, programación y funcionamiento de los robots.

En [5] se utiliza el término de robot inteligente para referirse a una máquina capaz de extraer información de su entorno y utilizar el conocimiento obtenido para moverse de manera segura y significativa. Actualmente, la robótica se está abriendo camino a una nueva generación de robots con fines más allá de la ejecución de tareas repetitivas y más hacia los robots inteligentes. Cada vez se busca más dotar a los robots de capacidades cognitivas, como la percepción, la selección de acciones, el aprendizaje y el razonamiento, a través de métodos neuro-evolutivos como en el caso de [6].

Los nuevos paradigmas tienen como objetivo la obtención de robots que satisfacen las tareas para las que fueron programados a través de una mayor autonomía en la adquisición, organización y utilización del conocimiento y de sus habilidades. Algunas líneas de investigación actuales corresponden, por ejemplo, a las que tienen lugar en [7] sobre el uso de algoritmos evolutivos para el desarrollo de los controladores de los robots; la robótica cognitiva; y los sistemas de robótica colaborativa o sistemas multi-robot. En todas ellas, se aplican técnicas de inteligencia artificial para diseñar los controladores que doten a los robots del mayor grado de autonomía posible.

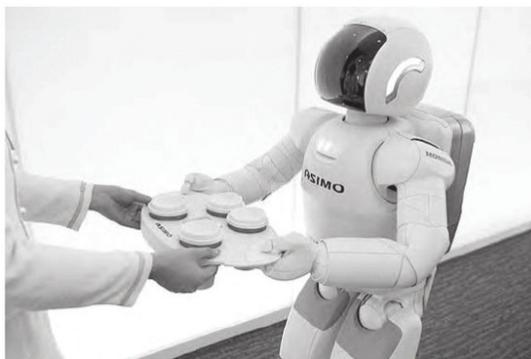
Algunos de los tipos de robots considerados por el Grupo de Robótica (GtRob) del Comité Español de Automática, son [8]:

- Los robots autónomos, que poseen la instrumentación necesaria para proporcionarles autonomía [8], es decir, que no requieran la supervisión humana. Entre estos están por ejemplo los vehículos aéreos autónomos o UAV (por sus siglas en inglés Unmanned Aerial Vehicles) como el de la figura 1, o vehículos submarinos autónomos o AUV (Autonomous Underwater Vehicle).



**Figura 1.** Robot Aéreo Autónomo (UAV) [8].

- Los robots de servicio, que de acuerdo con la Federación Internacional de Robótica (IFR) operan de manera parcial o totalmente autónoma, para desarrollar servicios útiles para el bienestar de los humanos y equipos; excluyendo las aplicaciones de manufactura. Se caracterizan por la falta de estructuración de su entorno y sus tareas a realizar, lo que obliga a los robots de servicio a contar con un grado de inteligencia que se traduce en el empleo de sensores y software adecuado para la toma rápida de decisiones [8].
- Los robots de educación, que son un tipo de robots de servicio diseñados para aportar elementos de ayuda que contribuyen a mejorar esta actividad [9]. Sirven como instrumento para provocar aprendizajes en los estudiantes adoptando como metodología la experimentación, que les permite aprender a concebir, manipular, controlar, operar y trabajar con robots pedagógicos [10].
- Los robots de entretenimiento u ocio; son un tipo de robots de servicio que contribuye, de alguna manera, en actividades de ocio de las personas. Pueden ser robots juguetes y mascotas que suelen incorporar capacidades avanzadas de interacción con el usuario, para lo cual deben incorporar modos de comportamiento evolutivo que les permitan tomar decisiones, en base a la respuesta que observa en el humano [8]. Este tipo de robots también abarca los utilizados en parques de atracciones o parques temáticos.
- Los robots humanoides, inspirados en las capacidades humanas y su aspecto, como el robot ASIMO de la figura 2 [8].



**Figura 2.** Robot humanoide ASIMO de Honda [8].

- Los robots personales, son un tipo de robot de servicio usualmente destinados para uso doméstico. Sirven a los humanos como ayudantes o colaboradores en sus quehaceres o actividades diarias [8].

- Los sistemas multi robots o de robótica colectiva, que consiste en grupos de robots trabajando de manera conjunta para lograr objetivos comunes. Este tipo de sistemas se utilizan para resolver tareas que un solo individuo es incapaz de realizar, o bien, en tareas que se obtiene ganancia, en términos de tiempo, por ejemplo, si son ejecutadas por más de un individuo [11].

## Robobo

Robobo es un robot educativo que fue desarrollado por la compañía MINT y el Grupo de Integrado de Ingeniería (GII) de la Universidade da Coruña, y consiste en una base móvil como la de la figura 3, a la que se acopla un teléfono inteligente para realizar proyectos de robótica autónoma tanto en aulas, como a nivel particular y de investigación. El uso del teléfono inteligente en el Robobo hace que adquiera un largo ciclo de vida al ser tecnología en constante actualización, y provee a la plataforma con hardware de alto nivel en términos de sensores, comunicación y capacidades de procesamiento para crear lecciones más interactivas en las aulas y explotar la interacción entre humanos y robots [12].



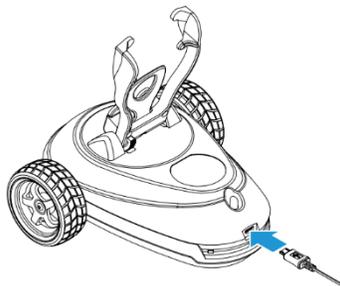
**Figura 3.** Robot educativo Robobo [1].

Robobo se encuentra en el mercado a un precio de alrededor de €299 [13], el cual se considera bajo en comparación con robots similares como los mencionados en [2]. Cuenta con una serie de aplicaciones que permiten programar a Robobo fácilmente desde cualquier ordenador mediante conexión wifi, y con un diseño que le permite desempeñarse en sistemas multi robot. Actualmente, el uso de Robobo en las aulas y centros de investigación se ha dado en instituciones como el Centro de Enseñanza Infantil Primaria de Sigüeiro, ELDE college en los Países Bajos, el Centro de Formación Profesional Panevezio de Lituania, la Universidad de Ramon Llull campus la Salle y la Universidad de Porto de Portugal [14].

La programación del Robobo se puede dar en tres niveles distintos. El primero de ellos es mediante bloques de Scratch, orientado a programadores principiantes; el segundo se basa en JAVA Android, un nivel intermedio para estudiantes con experiencia en robótica para la programación basada en texto; y el tercero corresponde a ROS (Robot Operating System), que está enfocado a usuarios avanzados, como estudiantes de informática, ingeniería o robótica, o bien grupos de investigación en el área de la robótica autónoma y robótica colectiva [1].

Su proceso de recarga se lleva a cabo de manera individual y manual con un cargador USB estándar, como se indica en la figura 4, por lo que carece de autonomía. Por otro lado, a nivel comercial se dispone del paquete educativo de cuatro unidades de la figura 5. El paquete comercial incluye un cable USB tipo A Macho a micro USB tipo B Macho por cada base, sin el cargador de pared [13]; por lo cual los tiempos de carga del robot pueden variar de acuerdo

con las características del cargador utilizado por el usuario final e implica un elevado número de cargadores de pared, lo cual es un inconveniente si el número de Robobos es mayor a las tomas de corriente disponibles en la sala.



**Figura 4.** Carga de la batería del Robobo [15].



**Figura 5.** Paquete educativo del Robobo [13].

Ante la ausencia de un proceso de recarga autónomo, automatizado, homogéneo y simultáneo de las bases móviles del Robobo, se decidió desarrollar una base de recarga que permita la recarga autónoma y simultánea de cuatro plataformas robóticas móviles. Lo cual abre las posibilidades de programar el proceso de acuerdo con las prioridades y características de las tareas a realizar; por ejemplo, para permitir al usuario controlar el o los robots recargándose, el nivel de batería al que se acoplarán o desacoplarán los robots, para ejemplificar en las aulas un proceso de recarga autónomo, entre otros.

Sin embargo, para la automatización óptima del proceso de recarga se debieron considerar los requerimientos y factores generales, mecánicos y eléctricos que se indican a continuación:

#### Requerimientos Generales

- El precio de fabricación del prototipo está dentro del rango de los €50-70.
- El prototipo cumple con la normativa de Conformidad Europea (CE) para productos de media tensión.
- El diseño de la base de recarga no implica modificaciones de las características de la plataforma robótica móvil Robobo.
- Los robots pueden aproximarse y acoplarse al dispositivo siempre y cuando ambos se encuentren sobre una superficie con pocas irregularidades.
- Cuando una plataforma robótica se encuentra acoplada a la base de recarga, la base indica, de manera visual al usuario, si el Robobo está cargando o si concluyó su ciclo de carga.

- Siempre y cuando no exista un obstáculo entre el Robobo y la estación de recarga (como una pared, por ejemplo), el sistema de detección tiene un rango de cobertura de 360°.

### Requerimientos Mecánicos

- Las dimensiones máximas de la estructura ensamblada son: 350 mm de alto, 450 mm de largo y 450 mm de ancho.
- La estructura está diseñada de tal forma que el usuario puede armar y desarmar el prototipo para el acceso y mantenimiento del circuito eléctrico.

### Requerimientos Eléctricos

- La base de recarga se alimenta del sistema eléctrico de 110 a 240 V.
- El prototipo es capaz de recargar de manera homogénea y simultánea hasta cuatro Robobos.
- El sistema es capaz de suministrar una corriente homogénea a cada Robobo con un valor entre 1 a 1.5 A durante el proceso de carga, con 5 V.
- El diseño e implementación del circuito electrónico debe tomar en cuenta la posibilidad de una futura comercialización de cargadores individuales, por lo que puede subdividirse en cuatro partes o subestaciones independientes.
- La solución planteada debe de contar con protecciones del sistema eléctrico en caso de cortocircuito.
- El circuito eléctrico incluye LED rojos para indicar cuando una subestación de carga se encuentre encendida pero desocupada.

Los requerimientos mencionados se implementaron y validaron en [2], donde se describe en detalle el diseño final de la base de recarga con cuatro subestaciones eléctricamente independientes entre sí. Su circuito eléctrico se basó en el uso del amplificador operacional APX321 [16] configurado como comparador no inversor, y permite identificar tres estados de carga: a) carga en curso, b) tiempo de carga concluido, y c) disponible, como se muestra en el cuadro 1.

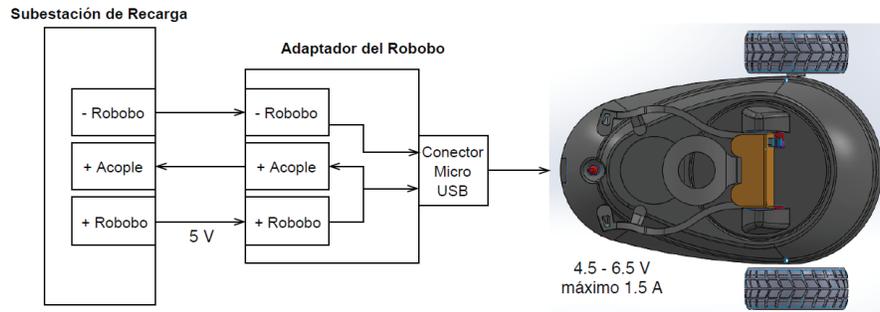
**Cuadro 1.** Estados de la subestación de carga [2].

Estado de la Subestación de Carga	Color de LED encendido	Modo de operación del LTC1733	$I_{Robobo}$ (mA)
Carga en curso	Verde	Modo corriente constante	1000
		C/10	100
Tiempo de carga concluido	Azul	Modo Apagado	2
		Modo Suspensión	0.005
Disponible	Rojo	No aplica	No aplica

A cada estado se le asoció el color de LED de la segunda columna de el cuadro 1, que permite a los usuarios y operadores reconocerles fácilmente. Además, Robobo permite ser programado para identificar colores en las imágenes que obtiene a partir de las cámaras del teléfono

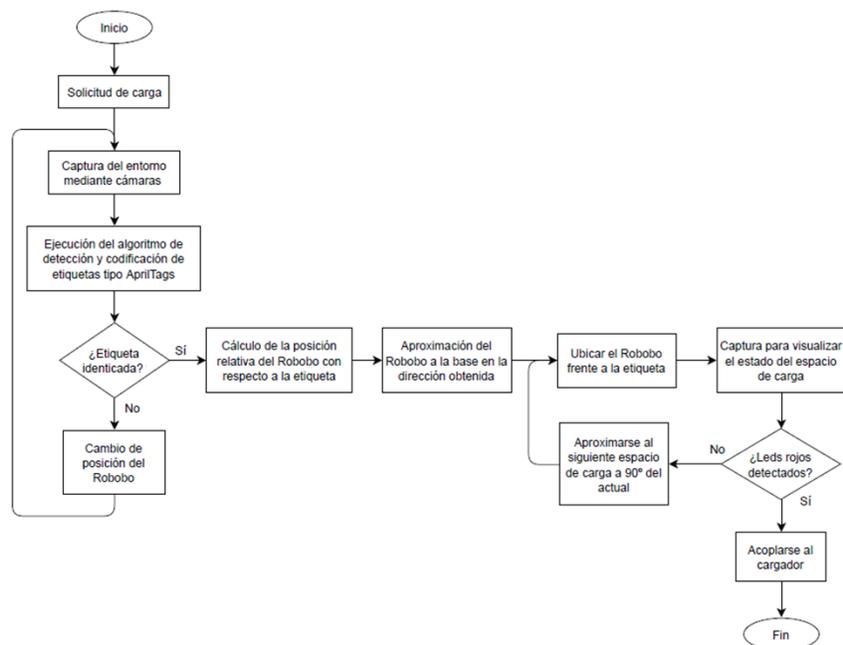
inteligente, por lo que puede reconocer los estados mencionados y actuar conforme a ellos. La segunda y tercera columna del cuadro 1 representan la configuración del cargador interno LTC1733 [17] que posee el Robobo para cargar la batería LiPo que posee.

Se implementó una carga por contacto entre el Robobo y la base, para lo cual fue necesario incorporar un adaptador como en la figura 6 para la conexión del puerto USB del robot con la subestación. El adaptador y la subestación cuentan con un contacto *+Acople* que permite identificar cuando un Robobo está conectado a la subestación de carga y encender ya sea los LED en verde o azul cuando el Robobo está conectado, y en rojo cuando no.

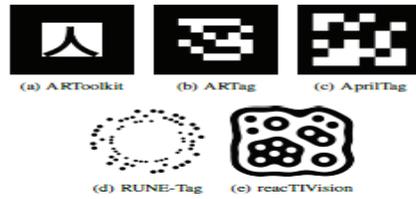


**Figura 6.** Sistema de carga con adaptador para el Robobo con tres contactos. [2]. Elaborado mediante Diagramly y SolidWorks.

Se propuso implementar el algoritmo mostrado en la figura 7 para el reconocimiento de la base de recarga, en el cual se utilizan las cámaras del teléfono inteligente para identificar etiquetas de tipo AprilTag que se deben incorporar en la estación de recarga. El sistema de detección y codificación de AprilTag permite estimar la posición de sus etiquetas en una imagen con un mejor desempeño en comparación con otros sistemas, como ARToolkit o ARTag, en cuanto a la tasa de falsos positivos y la exactitud de ubicación [18]. En la figura 8 se muestran ejemplos de las etiquetas que utilizan estos sistemas.

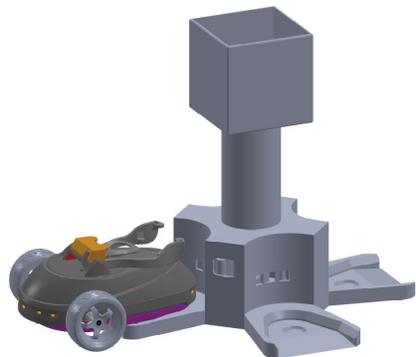


**Figura 7.** Proceso de aproximación a la base de recarga mediante reconocimiento de AprilTags [2]. Elaborado mediante Diagramly.



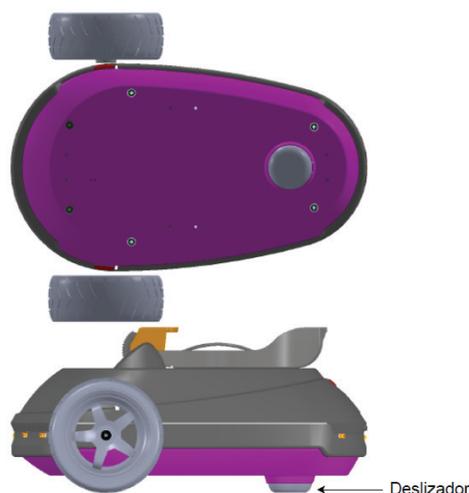
**Figura 8.** Comparación de etiquetas visuales fiduciales [19].

Se diseñó la estructura de la fFigura 9. Propuesta de diseño cilíndrico y cubo con etiquetas de reconocimiento [2]. Elaborado mediante SolidWorks. de 344.96 mm de largo y ancho, con 317.6 mm de alto, con los planos mecánicos descritos en [2]. El prototipo se compone de 6 partes o piezas: una base principal, su tapa en forma de X o cruz, cuatro rampas desmontables, un cilindro, y un prisma con cuatro caras laterales para colocar los April Tag y que el sistema de detección permitiera un mayor rango de cobertura.



**Figura 9.** Propuesta de diseño cilíndrico y cubo con etiquetas de reconocimiento [2]. Elaborado mediante SolidWorks.

Las rampas permitieron disminuir el área de la estación en el suelo. Además, a estas se les añadió un escalón para el deslizador que posee el Robobo en su tapa inferior, que se puede observar en la fFigura 10. Detalle del deslizador del Robobo [2]. Elaborado mediante SolidWorks., y así facilitar el posicionamiento del Robobo en la estación de recarga. Finalmente, la base principal alberga el circuito eléctrico con dos LED RGB por cada subestación para identificar los tres estados de carga antes mencionados en el cuadro 1.



**Figura 10.** Detalle del deslizador del Robobo [2]. Elaborado mediante SolidWorks.

## Conclusiones

- Se identificaron los tipos de robots considerados por el Grupo de Robótica (GtRob) del Comité Español de Automática que buscan incorporar tecnologías y algoritmos de funcionamiento que les permitan mayor autonomía.
- Se resumió la importancia de la implementación de un proceso de recarga autónoma para el Robobo.
- Se definieron los requerimientos generales, eléctricos y mecánicos necesarios para la recarga autónoma e independiente de una plataforma robótica móvil.
- Se resumió el diseño de un prototipo electromecánico para el acople y recarga simultánea de hasta cuatro plataformas robóticas Robobo, descrito por los planos eléctricos en [2], acorde con la normativa de Conformidad Europea CE para productos de media tensión, y los planos mecánicos del mismo documento que contemplan la implementación futura de un sistema de reconocimiento con etiquetas de tipo AprilTag.

## Referencias

- [1] MINT, «¿Qué es Robobo?,» [En línea]. Available: <https://theroboboproject.com/que-es-robobo/>. [Último acceso: 03 julio 2018].
- [2] M. Vizcaíno, «Diseño de una Base de Recarga para la Plataforma Robótica Móvil Robobo,» 2019.
- [3] Real Academia Española, «Robot».
- [4] H. Moravec, «Robot,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.britannica.com/technology/robot-technology>. [Último acceso: febrero 2019].
- [5] A. Andrew, Behavior-Based Robotics, Massachusetts: Cambridge, 1998.
- [6] GII, «DREAM: Deferred Restructuring of Experience in Autonomous Machines.,» 2018. [En línea]. Available: <http://www.gii.udc.es/proyectos/detalle/342>. [Último acceso: febrero 2019].
- [7] GII, «Robótica y Cognición,» 2014. [En línea]. Available: <http://www.gii.udc.es/investigacion/detalle/5>. [Último acceso: enero 2019].
- [8] A. Barrientos, Fundamentos de robótica, 2 ed., McGraw-Hill, 2007.
- [9] R. Aracil, C. Balaguer y M. Armanda, «Robots de servicio,» *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, vol. 5, nº 2, pp. 6-13, 2008.
- [10] E. Ruiz, Los robots en la educación, Ediciones Díaz de Santos, 2007.



- [11] L. Fernández y A. Muñoz, «Investigación sobre los Requisitos del Movimiento Colectivo Coordinado en un Sistema Multi-agente,» *Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial*, 2007.
- [12] F. Bellas, M. Naya, G. Varela, L. Llamas y e. al., «The Robobo Project: Bringing Educational Robotics Closer to Real-World Applications,» A Coruña, 2017.
- [13] MINT, «Tienda,» [En línea]. Available: <https://theroboboproject.com/producto/pack-ensenanza-secundaria/>. [Último acceso: 03 julio 2018].
- [14] MINT, «Robobo en la educación,» [En línea]. Available: <https://theroboboproject.com/educacion/>. [Último acceso: enero 2019].
- [15] MINT, «Manual de Usuario,» España.
- [16] Diodes Incorporated, «APX321/APX358/APX324,» 2009.
- [17] Linear Technology Corporation, «LTC1733 Monolithic Linear Lithium-Ion Battery Charger with Thermal Regulation.,» USA.
- [18] E. Olson, «AprilTag: A robust flexible visual fiducial system,» University of Michigan, 2011. [En línea]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5979561>. [Último acceso: 10 setiembre 2018].
- [19] J. Wang y E. Olson, «AprilTag 2: Efficient and robust fiducial detection,» Michigan, Estados Unidos, 2016.
- [20] MINT, «Especificaciones,» España.

# Diseño y desarrollo de un simulador de código abierto para un robot submarino de propósito general

Design and development of an open source simulator for a general purpose submarine.

Eva Corella-Solís<sup>1</sup>

---

Corella-Solís, E. Diseño y desarrollo de un simulador de código abierto para un robot submarino de propósito general. *Tecnología en Marcha*. Vol. 34, especial. Movilidad Estudiantil. Octubre 2021. Pág 101-108.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v34i5.5920>



1 Ingeniera Mecatrónica. Universidad de la Coruña, Escuela Politécnica Superior, Grupo Integrado de Ingeniería. España.  
Correo electrónico: [evamcorella@gmail.com](mailto:evamcorella@gmail.com)  
 <https://orcid.org/0000-0003-4751-2567>

## Palabras clave

Gazebo; modelado; robot; simulador; submarino.

## Resumen

El proyecto desarrollado en esta tesis es un simulador para un robot submarino, el cual cuenta con 6 grados de libertad, haciendo uso de ROS, Gazebo y UUV Simulator para su funcionamiento. Para el desarrollo del proyecto se generó un modelado 3D y un modelado físico matemático para adaptar el submarino Kai, del Grupo Integrado de Ingeniería, de la Universidad de la Coruña, al vehículo implementado en el simulador. También se realizó un mundo para que el submarino opere en condiciones similares a las reales. Al final de la tesis se presenta la documentación y los resultados que respaldan el proyecto.

## Keywords

Gazebo; modeling; robot; simulator; submarine.

## Abstract

The project development in this thesis is a simulator for an underwater robot, which counts with 6 degrees of freedom, using ROS, Gazebo and UUV Simulator for his operation. For the development of the project, a 3D modeling and a mathematical physical modeling was created to adapt the submarine Kai, from El Grupo Integrado de Ingeniería, of the Universidad de la Coruña, to the vehicle implemented in the simulator. A world was also made for the submarine to operate in conditions like the real ones. The documentation and the results that validate this project are at the end of the document.

## Introducción

El proyecto consiste en la creación de un simulador para un robot submarino del Grupo Integrado de Ingeniería, de la Universidad de La Coruña, el mismo cuenta con motores, luces, cámara, láser, sonar imagen, sonar obstáculos, elementos que están representados en el UUV (Unmanned Underwater Vehicles). Se utiliza un modelado físico y matemático para describir la planta, estos datos son utilizados por el simulador, para generar movimientos y acciones de acuerdo con sus inercias y momentos.

## Plataformas utilizadas

Para realizar el proyecto se hizo uso de dos plataformas, ROS y Gazebo, la elección se dio posterior a una investigación, la cual indico que Gazebo resultaba ser la mejor elección para desarrollar el simulador. Una de las ventajas que presenta Gazebo es su capacidad de permitir variar todos los aspectos que afectan el funcionamiento de una simulación.

Se logra modificar todos los parámetros gracias a que tiene dos entornos, por lo cual es bastante editable, requiere más complejidad, ya que las rutinas no están prediseñadas, pero brinda más libertad a la hora del diseño del mundo y de los modelos. Estos entornos son Gazebo Server, en donde se trabaja todo el código de los modelos, sin existir ninguna interfaz gráfica, y Graphical Client, en donde se puede modificar la simulación y se ven todos los elementos que la componen. [1]

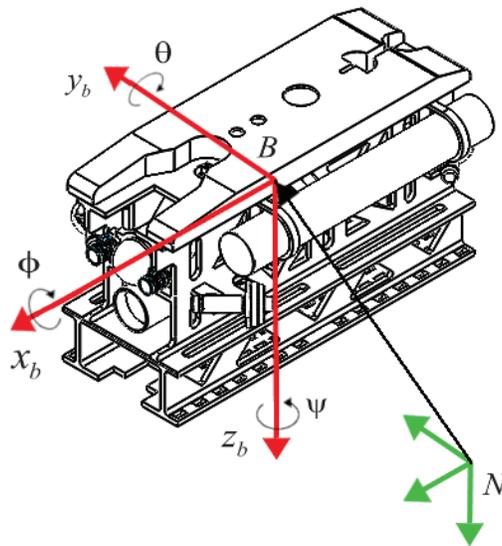
## Modelado matemático

Para la implementación del simulador era necesario realizar un modelado completo del vehículo, primero se mostrarán las ecuaciones que rigen el modelado matemático de la planta.

La notación utilizada para el desarrollo matemático se muestra en el cuadro 1, así como en la figura 1.

**Cuadro 1.** Notación de movimientos para submarinos.

Movimiento	Nombre	Posición	Velocidad	Fuerza
Traslación en x	<i>Surge</i>	x	<i>u</i>	X
Traslación en y	<i>Sway</i>	y	<i>v</i>	Y
Traslación en z	<i>Heave</i>	z	<i>w</i>	Z
Rotación en x	<i>Roll</i>	$\Phi$	<i>p</i>	K
Rotación en y	<i>Pitch</i>	$\theta$	<i>q</i>	M
Rotación en z	<i>Yaw</i>	$\Psi$	<i>r</i>	N



**Figura 1.** Notación en robótica submarina.

El movimiento del submarino en el simulador está dado por la formulación vectorial desarrollada por Fossen, en su libro *Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control*. [2]

La ecuación de Fossen se muestra a continuación:

$$M\dot{\gamma} + C(\gamma)\gamma + D(\gamma)\gamma + g(\eta) = \tau + g_o + w$$

Analizando cada sección, primero se tiene la matriz M, la cual contiene la información de la inercia y la matriz de la masa añadida.

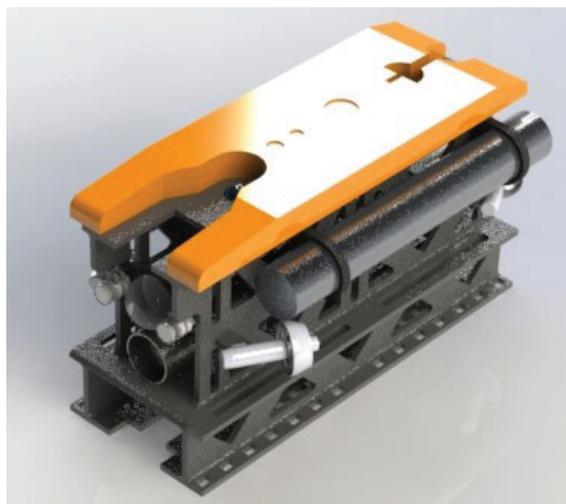
En la matriz C se encuentra la información de las fuerzas centrífugas, así como de coriolis y en la matriz D se representa la información de la viscosidad, y el vector  $g(\eta)$ , que contempla la fuerza de gravedad y la fuerza de flotación.

En el otro lado de la ecuación se encuentra el vector  $\tau$  que contiene las fuerzas provocadas por los propulsores del submarino. Los últimos vectores son  $g_o$ , el cual representa la fuerza de lastre, y el vector  $w$ , que contiene las perturbaciones ambientales, esto contempla desde el viento hasta las corrientes marinas.

### Modelado 3D

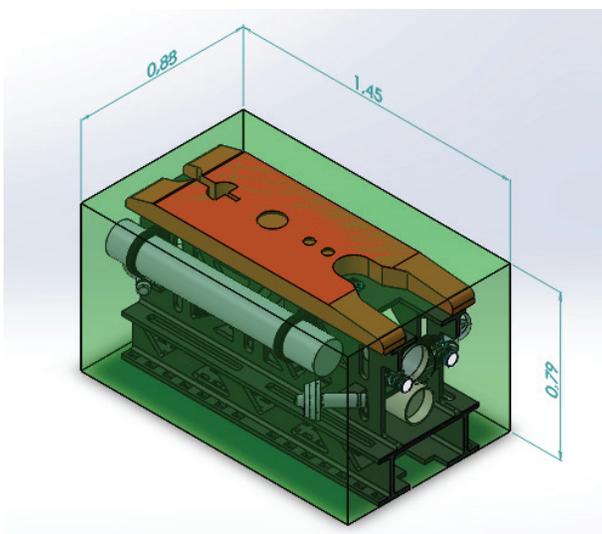
Para el modelado 3D se hizo uso de SolidWorks ya que presenta la herramienta SW2URDF, con la cual se puede modelar un elemento y convertirlo en un archivo compatible para trabajar en Gazebo.

En la figura 2 se muestra el modelo realizado en SolidWorks renderizado.



**Figura 2.** Modelado 3D del submarino.

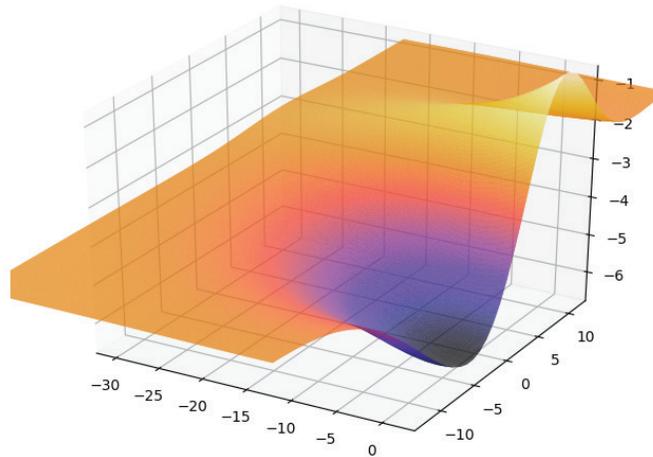
Además, era necesario crear un elemento de colisión, ya que el mallado anterior no contiene propiedades físicas, por lo cual funciona como un elemento visual, para comprobar su funcionamiento en el mundo se determino el cuadrado de color verde que se aprecia en la figura 3.



**Figura 3.** Medidas generales del modelo de colisión.

## Diseño del mundo

Para poner el submarino en funcionamiento es necesario tener un ambiente realista, en el cual sea posible probar las propiedades físicas del submarino. Se realizó un fondo del océano mediante un mapeado de puntos en Python, con esto se generó un mallado, como se ve en la figura 4.



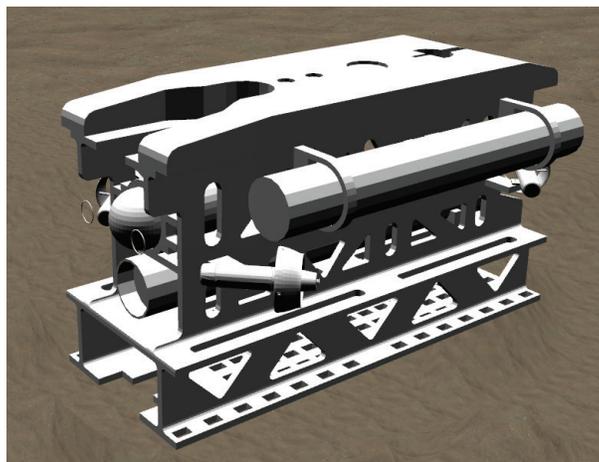
**Figura 4.** Mapeado 3D de los puntos para la superficie del fondo del mar.

## Resultados

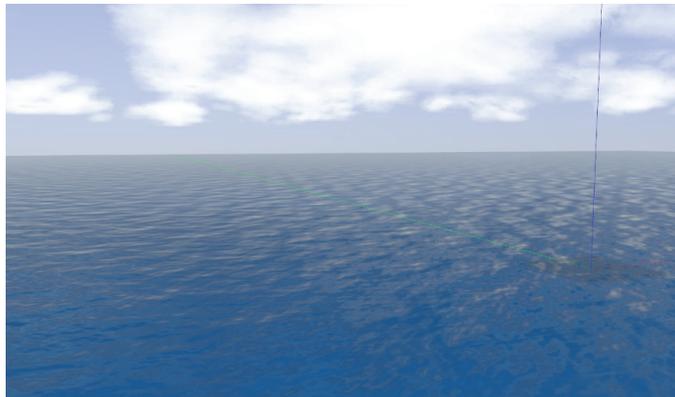
Para la comprobación del funcionamiento se verificaron las propiedades programadas para el simulador, dentro de las cuales destacan la capacidad de flotabilidad del vehículo, así como la representación de una colisión entre el mundo y el vehículo.

### Mundo y Vehículo

Los elementos se ingresan en el simulador de tal forma que se abren de manera simultánea, en las imágenes a continuación se muestra el vehículo y el mundo en funcionamiento en la plataforma de Gazebo.



**Figura 5.** Vehículo en Gazebo.

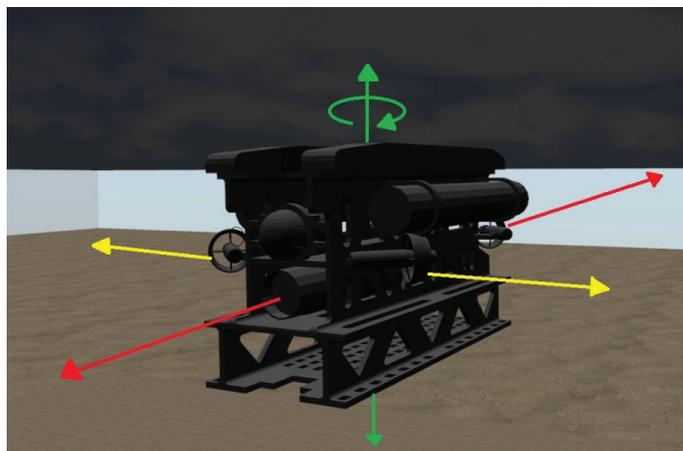


**Figura 6.** Mundo en Gazebo.

### Movimiento

Se logró la implementación de 4 movimiento del submarino:

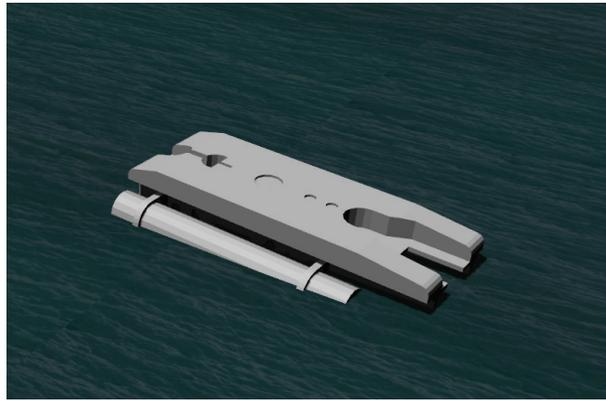
- Rotacional en el eje z [verde].
- Longitudinal en el eje z [verde].
- Longitudinal en el eje y [amarillo].
- Longitudinal en el eje x [rojo].



**Figura 7.** Movimientos del submarino.

### Flotabilidad

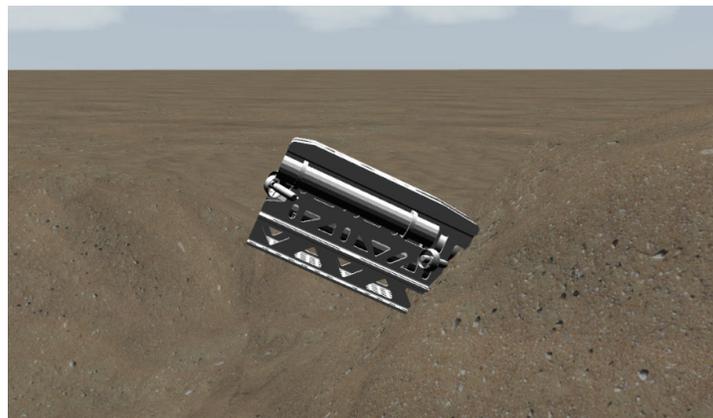
Para comprobar la flotabilidad del vehículo se colocó dentro del océano, sin ningún control y este respondió al irse hacia la superficie, siendo afectado por el movimiento de las olas del océano.



**Figura 8.** Submarino flotando en la superficie del océano.

### Colisión

Tanto el mundo como el vehículo cuentan con elementos sólidos de colisión, que permiten a la simulación comprobar los límites que tienen los elementos. En la imagen que se muestra a continuación se puede ver como el submarino está chocando directamente con el fondo del océano.



**Figura 9.** Colisión entre el submarino y el fondo del océano.

### Conclusiones

De acuerdo con la investigación realizada, el programa para la realización del simulador que más se adaptaba a las necesidades fue Gazebo, el cual presentó elementos de compatibilidad con ROS, que permitieron el desarrollo de propiedades hidrostáticas necesarias para el submarino.

La formalización del modelo físico matemático del vehículo permitió la sustitución de valores dentro del código de simulación, así como la comprensión de las fuerzas presentes en el submarino.

El modelo 3D del submarino corresponde visualmente con el real, y genera los movimientos básicos del submarino en sus grados de libertad.

Se generó un modelado del mundo el cual contempla dos secciones con densidades distintas, y además elementos sólidos de colisión, que permiten el manejo del submarino como si este estuviera sumergido en el mar.

## Referencias

- [1] Cuevas, C. (2016). Ros-Gazebo. Una valiosa herramienta de vanguardia para el desarrollo de la robótica. Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/315920834\\_Ros-gazebo\\_una\\_valiosa\\_Herramienta\\_de\\_Vanguardia\\_para\\_el\\_Desarrollo\\_de\\_la\\_Robotica](https://www.researchgate.net/publication/315920834_Ros-gazebo_una_valiosa_Herramienta_de_Vanguardia_para_el_Desarrollo_de_la_Robotica)
- [2] Fossen, T. (2011). *Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control*. Recuperado de <http://dl.kashti.ir/ENBOOKS/HMCH.pdf>