

# DropTES Serie III: Experimento en microgravedad con prototipo de brazos robóticos a escala

Nicole Chaves Jiménez<sup>1</sup>  
Ernesto Corrales Corrales<sup>2</sup>  
Moacir Fonseca Becker<sup>2</sup>  
Carlos Mayorga Espinoza<sup>1</sup>  
Renato Rimolo Donadio<sup>1</sup>

Los estudios en condiciones de gravedad reducida o microgravedad son útiles para estudiar fenómenos físicos o el comportamiento de sistemas sin el efecto de la aceleración gravitacional terrestre ( $-9.81\text{m/s}^2 = 1g$ ) a los que están sujetos todos los procesos físicos en nuestro entorno. Si bien es posible lograr esta condición en plataformas en órbita terrestre por períodos largos de tiempo, el costo asociado es típicamente muy alto. Por esta razón, existen otras alternativas de menor costo, como son los cohetes sonda, vuelos parabólicos y las torres de caída libre (“drop towers”) [1]. Las torres son usualmente una alternativa flexible, donde una cápsula con el experimento es lanzada por una catapulta o se deja caer libremente para lograr condiciones de gravedad de hasta  $1e^{-6}g$ . A pesar de que se logran tiempos en condiciones de microgravedad relativamente cortos, de entre 4 y 10 segundos, las torres permiten hacer ajustes y ejecutar los experimentos repetidas veces.

En el año 2010 se lanza la iniciativa “Human Space Technology” (HSTI) [2], promovida por la Oficina de Asuntos del Espacio Ultraterrestre de la Organización de Naciones Unidas (UNOOSA), la cual busca involucrar a más países en actividades relacionadas con la exploración espacial y mejorar los beneficios de esas actividades mediante la cooperación internacional. Dentro de esta iniciativa, producto de una colaboración entre UNOOSA y el Centro de Tecnología Espacial Aplicada y Microgravedad (ZARM), el programa “DropTES Experiment Series” ofrece a un equipo investigador, como su nombre lo indica, la posibilidad de realizar



Figura 1. Torre de Microgravedad “Drop Tower” en el Centro de Tecnología Espacial Aplicada y Microgravedad (ZARM), Universidad de Bremen, Alemania.

una serie de experimentos en la torre de microgravedad del ZARM, en la Universidad de Bremen, Alemania (figura 1).

Un grupo de cuatro estudiantes y un profesor costarricenses participaron en la tercera edición del concurso y lo ganaron con la propuesta denominada “Comportamiento de un manipulador robótico a escala bajo condiciones de microgravedad” [3]. Esta es la primera participación de Costa Rica en dicha iniciativa, con un esfuerzo conjunto de estudiantes y profesores del Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC) y la Universidad de Costa Rica (UCR).

El objetivo general de este trabajo fue el diseño e implementación de un experimento en gravedad reducida para analizar la influencia de las fuerzas inerciales y reactivas sobre brazos robóticos a escala, considerando un marco de referencia no inercial rotatorio.

## Diseño y construcción del prototipo

La primera fase del proyecto consistió en el diseño y construcción del prototipo de manipuladores o brazos robóticos, considerando los requerimientos para ser adaptado a la cápsula de lanzamiento con opción de centrífuga de la torre de microgravedad del ZARM [4].

Consiste en dos brazos a escala idénticos, de aproximadamente 30 centímetros de longitud, colocados simétricamente con respecto al centro del disco de la cápsula. Esta configuración se escogió con la intención de distribuir mejor los esfuerzos y balancear la carga en el interior de la cápsula. Además, la utilización de dos elementos brinda redundancia para la realización del experimento y toma de datos. La figura 2(a) muestra el diseño en computadora del prototipo completo sobre el plato de la centrífuga, el cual, una vez fabricado, pesó alrededor de cinco kilogramos incluyendo el control electrónico.

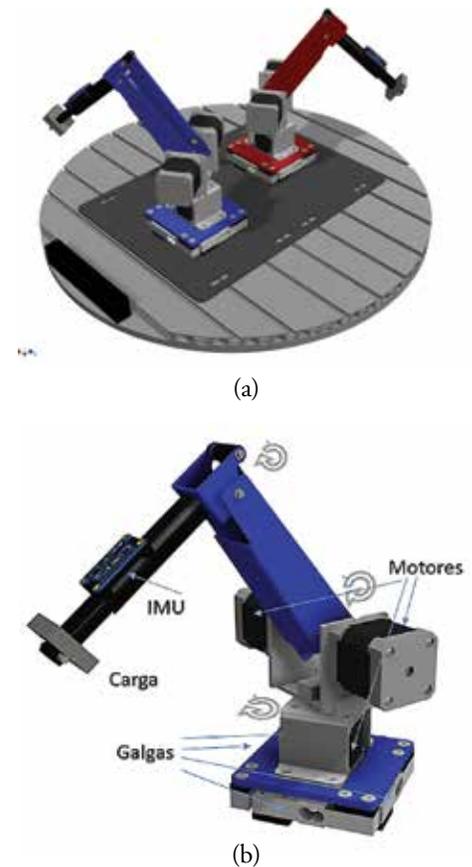


Figura 2. Diseño mecánico tridimensional del prototipo de brazos robóticos a escala. (a) Sistema de dos brazos colocado sobre el plato de la cápsula de lanzamiento. (b) Detalle del diseño de uno de los brazos.

Cada brazo es de tres grados de libertad (3 DoF), los cuales son controlados directamente para los primeros dos ejes y a través de un extensor para el tercero; motores bipolares paso a paso fueron utilizados para el control del movimiento y realización de las secuencias durante los experimentos. La medición de las reacciones durante la ejecución de las secuencias de movimiento se realizó

mediante cuatro celdas de carga (galgas) en la base de cada brazo, con el propósito de determinar las fuerzas trasladadas a la base; mediante un sensor de medición inercial (IMU) de nueve grados de libertad, se monitorearon sobre el extremo exterior de cada manipulador. Las partes mecánicas fueron construidas en aluminio y nylon. El detalle de unos de los dos brazos se muestra en la figura 2(b). El sistema electrónico de los brazos fue parte importante del desarrollo y se basó en una unidad central de control implementada con tarjetas de microcontroladores Arduino. Cada motor cuenta con una tarjeta controladora independiente que permite un manejo de corriente de hasta 2 A; los datos de cada galga se acondicionan con tarjetas de amplificación y los IMU se conectan a través de interfaz serial. Los datos registrados por los sensores durante los experimentos se almacenaron en micro SD.

### Diseño y ejecución del experimento

Con el prototipo construido, la siguiente fase consistió en diseñar el experimento considerando la integración del sistema en la cápsula y sus pruebas preliminares. La secuencia debió ser planeada cuidadosamente debido a que únicamente se cuenta con 4,7 segundos de microgravedad durante la caída de la cápsula desde los aproximadamente 120 metros de altura de la torre. Si bien en modo catapulta se podrían conseguir hasta 9,4 segundos de microgravedad, debido a que se utilizó la centrífuga en los experimentos, no fue posible utilizar esa opción. Las pruebas preliminares del sistema se realizaron en condiciones de gravedad terrestre, ajustando la rutina para ejercitar los tres grados de libertad de los manipuladores, tratando de maximizar los efectos de fuerza sobre los sensores. Adicionalmente, los brazos fueron cargados en sus extremos finales con pesas de 50 gramos con el fin de acentuar efectos de estas fuerzas.

La integración del prototipo en la cápsula, realizada en noviembre del año 2016, fue un reto debido a las consideraciones mecánicas del impacto una vez que la cápsula ha descendido. A pesar del sistema amortiguador de la cápsula, el impacto es relativamente fuerte por lo que el prototipo y alambrado del sistema electrónico debió considerar esta situación y ser ajustado para soportar el im-

pacto. Como señales externas para controlar el experimento desde el exterior de la cápsula se incluyó el disparo de la secuencia de movimiento y el inicio de la adquisición de los datos. Los experimentos fueron registrados en video por medio de tres cámaras: una de alta velocidad en la parte superior de la cápsula, y dos laterales. En la figura 3 se muestra al equipo de trabajo durante la fase de acondicionamiento del prototipo y en la figura 4 el prototipo ya integrado dentro de la cápsula. El trabajo culminó con la ejecución de los experimentos luego de su integración (figuras 5 a 7), con cuatro lanzamientos ejecutados exitosamente en los que se logró completar las secuencias de movimiento y el registro de los datos en la forma de video y mediciones de los sensores en el prototipo. En la figura 5 se muestra el exterior de la cápsula donde se integró el experimento previo a uno de los lanzamientos, así como una vista interna del túnel de la torre de microgravedad por donde descende la cápsula. Más información sobre el funcionamiento de la torre se puede consultar en [5].

Los primeros dos lanzamientos se ejecutaron con la misma configuración, con una velocidad de rotación de la centrífuga de 30 revoluciones por minuto (rpm), para analizar la repetitividad de los datos. El tercer lanzamiento se realizó sin movimiento giretorio para establecer una base de comparación, mientras que el cuarto lanzamiento se realizó a la velocidad máxima de rotación

que soportó el prototipo experimentalmente, calculada en 35 rpm. Los experimentos fueron complementados con mediciones antes o después del lanzamiento, en condiciones de gravedad terrestre, con el objetivo de tener el comportamiento en condiciones normales de gravedad y establecer una base comparativa adicional. En la figura 6 se incluye una vista del video en el cuarto de controles de la torre, donde se aprecia, a la izquierda, la imagen desde la cámara superior dentro de la cápsula que permitió ver en vivo la secuencia ejecutada. Adicionalmente, otras cámaras registran (parte derecha) el trayecto de la cápsula desde lo alto de la torre hasta que cae en el receptáculo de amortiguamiento.

La participación en esta iniciativa fue una muy buena experiencia para aprender a trabajar con este tipo de instalaciones en condiciones de gravedad reducida. El desarrollo de experimentos con estructuras electromecánicas es poco común en torres debido a su corta duración; sin embargo, en este proyecto se logró demostrar que con un planeamiento cuidadoso del experimento se pueden obtener datos relevantes para evaluar los efectos asociados a un entorno en microgravedad. Actualmente, el equipo investigador se encuentra trabajando en la fase final de documentación técnica del proyecto, de la cual se espera consolidar una publicación científica en un congreso internacional.

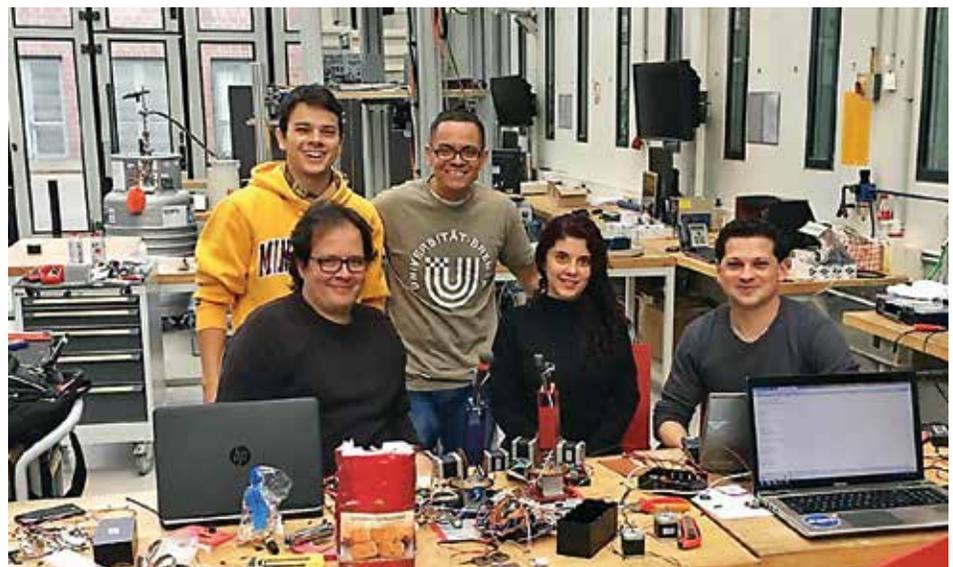


Figura 3. Equipo de trabajo durante la integración del sistema en Bremen. De izquierda a derecha: Moacir Fonseca, Renato Rímolo, Carlos Mayorga, Nicole Chaves y Ernesto Corrales. Foto Cortesía de T. Kónemann, ZARM.

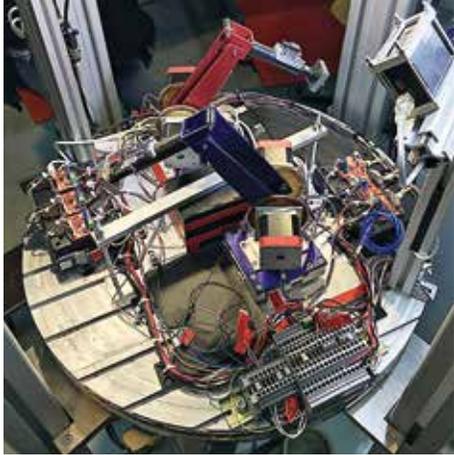


Figura 4. Prototipo de brazo robótico integrado en el interior de la cápsula de lanzamiento.



Figura 5. Cápsula de lanzamiento donde fue colocado el experimento (izquierda), e interior del conducto de lanzamiento en la torre de microgravedad (derecha).



Figura 6. Vista de la ejecución de un experimento desde el centro de mando en la torre de microgravedad. En la imagen se visualiza el prototipo desde la cámara superior en la cápsula (izquierda), y las tomas dentro del conducto de lanzamiento durante la caída de la cápsula.

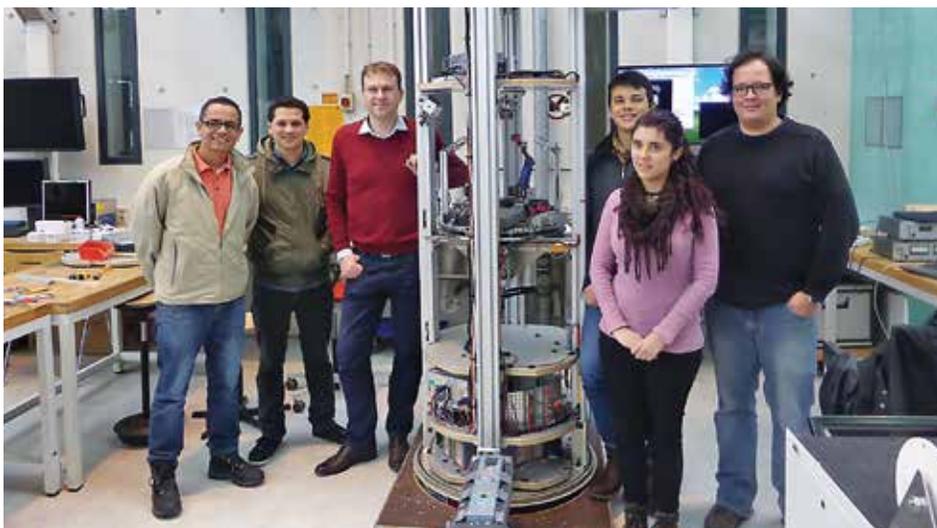


Figura 7. Experimento integrado con el equipo participante y el director técnico de la torre de microgravedad (de izquierda a derecha): Carlos Mayorga, Ernesto Corrales, Thorben Könemann, Moacir Fonseca, Nicole Chaves y Renato Rímolo. Fotografía cortesía de UNOOSA.

### Agradecimientos

La realización de este proyecto fue posible gracias al excelente apoyo logístico de UNOOSA por medio de los señores Takatori Miyoshi, Ahmed Osman, y Ayami Ko-

jima. Se agradece además el extraordinario apoyo logístico y técnico de parte del ZARM durante la planificación del proyecto y su ejecución en Bremen, en especial al Dipl. Ing. Fred Otken y al Dipl. Ing. Manfred Behrens,

por toda la ayuda técnica, y al Dr. Thorben Könemann por el seguimiento y apoyo logístico a la iniciativa. El agradecimiento es extensivo a la Agencia Aeroespacial Alemana: *German Aerospace Center-DLR, Space Management*, por el apoyo al programa DropTES. El respaldo del Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC) también fue fundamental para la exitosa conclusión del proyecto, mediante el Comité de Becas y la Vicerrectoría de Vida Estudiantil y Servicios Académicos (VIESA). El desarrollo del prototipo utilizado en este trabajo fue posible gracias al apoyo de la Vicerrectoría de Investigación y Extensión (VIE) del TEC, por medio de un proyecto de investigación estudiantil, y al señor Edgar Sánchez, del taller Teknomáquinas de Costa Rica, por la ayuda y subvención en la fabricación de las piezas mecánicas. ■

### Referencias

- [1] Agencia Espacial Europea (ESA). "Microgravity and Drop Towers". En línea, marzo, 2017: [http://www.esa.int/Education/Microgravity\\_and\\_drop\\_towers](http://www.esa.int/Education/Microgravity_and_drop_towers).
- [2] Human Space Technology Initiative (HSTI), United Nations Office for Outer Space Affairs (UNOOSA). "Drop Tower Experiment Series (DropTES)". En línea, marzo 2017: <http://www.unoosa.org/oosa/en/ourwork/psa/hsti/capacity-building/droptes.html>.
- [3] Human Space Technology Initiative (HSTI), United Nations Office for Outer Space Affairs (UNOOSA). "DropTES Third Cycle". En línea, marzo 2017: <http://www.unoosa.org/oosa/en/ourwork/psa/hsti/capacity-building/droptes-third-cycle.html>.
- [4] ZARM, ZARM Drop Tower Bremen, User Manual. Version April 26, 2012. En línea, marzo 2017: [https://www.zarm.uni-bremen.de/fileadmin/user\\_upload/drop\\_tower/Users\\_Manual\\_0412.pdf](https://www.zarm.uni-bremen.de/fileadmin/user_upload/drop_tower/Users_Manual_0412.pdf)
- [5] The Bremen Drop Tower. En línea, marzo 2017: <https://www.zarm.uni-bremen.de/drop-tower.html>

<sup>1</sup> Instituto Tecnológico de Costa Rica

<sup>2</sup> Universidad de Costa Rica