
**CLINOSTATO DIRIGIDO POR MICROCONTROLADOR PARA DESARROLLAR EXPERIMENTOS EN
LABORATORIOS DE ENSEÑANZA EN NIVEL MEDIO Y UNIVERSITARIO**

*Jonathan Exequiel Dalurzo, Paula Macarena Roa, Julian Gonzalo Collar, Carlos Alberto Merino, Erika
Natalia Bentz, Lucas Fernandez, Patricio Provasi*

patricio@unne.edu.ar

Universidad Nacional del Nordeste, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales y
Agrimensura

Resumen

En el presente trabajo presentamos dos prototipos funcionales de clinostatos dirigidos por un microcontrolador para simular condiciones de microgravedad en el estudio de crecimiento vegetal, útiles como herramienta docente tanto en el nivel secundario como universitario. La propuesta surge de la necesidad de brindar a los estudiantes de física y biología una plataforma interdisciplinaria que fomente la cooperación entre estas áreas del conocimiento y la comprensión de los principios físicos detrás de la simulación de microgravedad y su aplicación en la investigación biológica. Detallamos el diseño y construcción del dispositivo, destacando componentes clave y aspectos técnicos esenciales para su funcionamiento. Además, exploramos las posibles aplicaciones interdisciplinarias del dispositivo, destacando su relevancia tanto en entornos educativos como en futuras investigaciones relacionadas con el crecimiento de plantas y la agricultura espacial.

Palabras claves clinostato, enseñanza, laboratorio

Abstract

In the present work, we present two functional prototypes of clinostats directed by a microcontroller, which can also serve as a teaching tool at the secondary and university levels, to simulate microgravity conditions in the plant growth study. The proposal arises from the need to provide physics and biology students with an interdisciplinary platform that

encourages cooperation between these areas of knowledge and the understanding of the physical principles behind microgravity simulation and its application in biological research. We detail the design and construction of the device, highlighting key components and technical aspects essential to its operation. Furthermore, we explore the possible interdisciplinary applications of the device, highlighting its relevance both in educational settings and future research related to plant growth and space agriculture.

Keywords clinostat, teaching, laboratory

Introducción

El estudio de los efectos de la gravedad sobre las plantas se inició a partir del 1700 [1], mucho antes de la exploración espacial y desde que comenzó la aventura espacial, a finales de los años 50's, seguida de la casi permanente presencia humana en las diferentes estaciones espaciales, a partir de principios de los años 70's del siglo pasado han cobrado un renovado interés [2]. Las estaciones espaciales actualmente orbitan apenas encima de la mesósfera, al comienzo de la termósfera, *i.e.* aproximadamente a unos 400 km de altitud, y en ellas se vive en un ambiente de microgravedad. El hombre ha notado que la gravedad es un componente importante en la vida, tanto vegetal como animal, y no solo en su efecto sobre la morfología macroscópica, sino que también en la morfología celular [3]. Ahora bien, en el ambiente terráqueo, los cambios morfológicos de las células respecto a las mismas células sanas pueden ser consecuencia, y por tanto indicativos, de algún tipo de enfermedad. También, puede ocurrir

que una célula que está en perfecto estado, al ser sometida artificialmente a una morfología semejante a la de una célula enferma, ésta termine contrayendo aquella dolencia. Es por ello que la investigación de la morfología celular es de importancia en biología.

Además, podríamos ir preparando el terreno para algún tipo de desafío futuro, como ser el de la agricultura espacial, así el estudio de crecimiento de plantas en condiciones de microgravedad es un tópico de relevancia tanto en la biología como en la investigación espacial. La microgravedad, tal como se encuentra en el espacio, presenta un desafío único para las plantas, ya que la falta de una dirección definida de la gravedad puede afectar significativamente su crecimiento y desarrollo. Así, un área de especial interés es la de estudiar los efectos de la ausencia de gravedad, o mejor, de gravedad reducida. Si bien es factible realizar experimentos en las estaciones espaciales los costos de hacerlo son extremadamente altos y no es algo que un grupo de investigación o incluso un país pueda afrontar cotidianamente. Sin embargo, hacer estas investigaciones en la tierra reduce significativamente los costos de los experimentos. De esta forma se pueden realizar un número grande de experimentos y seleccionar los más interesantes para repetirlos en las estaciones espaciales [4,5]. Lograr un dispositivo que permita crear un ambiente de microgravedad no es una tarea trivial y con este trabajo se proponen dos diseños de clinostatos controlados por microprocesadores, que sirve como herramienta para simular condiciones de microgravedad. Además, estos clinostatos se pensaron para experimentos sencillos que se podrían llevar a cabo en un laboratorio de física, bioquímica o biología tanto en el nivel medio como universitario.

Marco Teórico

Con este trabajo también buscamos hacer una propuesta educativa y establecer que la física tiene aplicaciones en todos los campos de las ciencias naturales de forma de ofrecer a los estudiantes la oportunidad de explorar aplicaciones prácticas, en este caso el

biológico. Así, necesitamos establecer algunos conceptos previos.

Gravedad y ambientes de gravedad reducida

La idea de liberarnos de la influencia de la gravedad siempre ha atraído la curiosidad científica. ¿Qué sucedería con los fenómenos físicos y los procesos biológicos si eliminamos la fuerza gravitatoria que conocemos tan bien? La ley de la gravitación universal, formulada por Isaac Newton en 1687, nos enseña que cualquier objeto con masa genera un campo gravitatorio que actúa como una fuerza de atracción sobre otros objetos. En términos matemáticos, esta fuerza se expresa mediante la siguiente ecuación $F_g = G \cdot m_1 \cdot m_2 / r^2$, donde G es la constante de gravitación universal, m_1 y m_2 son las masas de los objetos, y r es la distancia que los separa. En términos sencillos, nos dice que la magnitud de esta fuerza es mayor cuanto más grandes sean las masas de los objetos (por ejemplo, el planeta tierra y una manzana), pero disminuye a medida que alejamos dichos objetos. En particular, la fuerza experimenta una disminución dramática al aumentar la distancia entre los objetos. Por ejemplo, si duplicamos la distancia entre dos cuerpos $r \rightarrow 2r$, la fuerza disminuirá en un factor de 4!

La ingravidez o gravedad cero, que se refiere a la ausencia de fuerza gravitatoria, es un concepto fascinante, pero, en sentido literal, imposible de alcanzar. La única forma de lograrla sería encontrarse en un punto del universo infinitamente alejado de cualquier objeto material.

No obstante, hay una diferencia crucial entre eliminar la gravedad (una tarea literalmente imposible) y suprimir sus efectos. Este último objetivo implica crear condiciones o sistemas de referencia que se comporten como si la fuerza de gravedad no existiera. Afortunadamente, este segundo objetivo sí es posible.

Microgravedad y la estación espacial internacional

Por lo general, asociamos la microgravedad con las condiciones "gravitatorias" presentes en las estaciones espaciales. Ahora bien, ¿cuál es el valor de la aceleración debida a la gravedad en las estaciones espaciales? Realizando un cálculo

sencillo utilizando la expresión que discutimos en la sección anterior, podemos observar que su valor es aproximadamente $g' \sim 8.7 \text{ m/s}^2$ (considerando que la masa de la Tierra es de $6 \times 10^{24} \text{ kg}$, el radio de la Tierra es de 6370 km y que la estación espacial orbita a unos 420 km sobre la superficie terrestre). Entonces, ¿por qué el personal que se encuentra en estas estaciones parece flotar?

Aquí es donde entra en juego el concepto de fuerza centrífuga/centrípeta que actúa sobre los tripulantes y la estación, contrarrestando el efecto de la gravedad. Al alejarnos lo suficiente, podemos visualizar la estación espacial orbitando alrededor de la Tierra en un movimiento circular. Resulta que para cambiar la dirección de la velocidad de la estación, es necesario aplicar una fuerza orientada hacia el centro de la trayectoria circular.

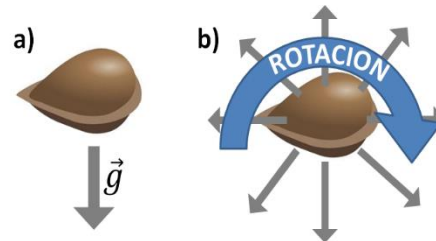
Un ejemplo cotidiano de esta situación sería imaginar una piedra atada a un hilo que hacemos girar circularmente. La tensión en el hilo representa la fuerza que ejercemos para lograr el movimiento circular. Cuantitativamente, la magnitud de esta fuerza se expresa como $F_c = m \cdot v^2 / r$, donde v es la rapidez del movimiento circular. Igualando esta fuerza a la ejercida por la gravedad ($F = m \cdot g'$), incluso podemos calcular la velocidad a que se desplazan estas estaciones, que resulta ser $v = \sqrt{g' \cdot r}$, es decir, aproximadamente $7,7 \text{ km/s}$ (alrededor de 27.600 km/h).

Evidentemente, realizar experimentos directamente en la Estación Espacial Internacional puede resultar prohibitivamente costoso. Por ello, se buscan alternativas que permitan emular los efectos de la ingravidez de manera más accesible. Un dispositivo utilizado con este propósito es el clinostato, el cual permite emular ambientes de gravedad reducida y resulta ideal para el estudio de crecimiento de plantas en estas condiciones.

Clinostatos

Los clinostatos son máquinas que someten muestras biológicas a rotaciones en direcciones ortogonales diferentes con el fin de redireccionar el vector aceleración de la gravedad \mathbf{g} en el tiempo y de esta forma obtener un promedio temporal muy pequeño (ver Figura 1). Esta herramienta proporciona un

entorno de experimentación más asequible y reproduce de manera efectiva algunas



condiciones observadas en la ingravidez espacial.

Figura 1 Funcionamiento de un clinostato. a) Una semilla es sometida a la acción de la gravedad \mathbf{g} . b) Al rotar la semilla, la gravedad apunta en diferentes direcciones, resultando en un promedio temporal que anula su efecto.

Diseño y construcción del clinostato

En este trabajo, proponemos dos diseños para la construcción de un clinostato. Los clinostatos propuestos se basan en: 1. una plataforma de rotación en un eje horizontal controlada por un microcontrolador, ver Figuras 2-a) y 2-b); y 2. en una plataforma rotante montada sobre un eje oscilante, ver Figuras 2-c) y 2-d).

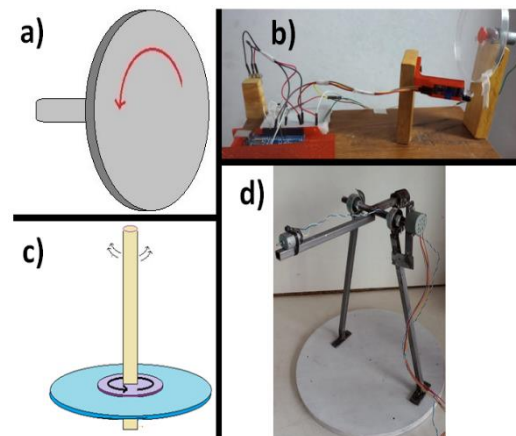


Figura 2 a) Esquema de movimiento y fuerzas en el prototipo 1.0. Una rotación con velocidad angular ω ocurre alrededor del eje horizontal. b) Prototipo 1.0 del clinostato, caracterizado por el movimiento de rotación alrededor del eje horizontal de la placa de petri que albergará semillas. c) Esquema de movimientos de las semillas. d) Prototipo 2.0. Hay dos rotaciones, una con

velocidad angular ω_1 alrededor del eje y una oscilación adicional con velocidad angular ω_2 del sistema completo. d) Prototipo 2.0 del clinostato, caracterizado por el movimiento rotacional alrededor del brazo pendular y su movimiento oscilatorio.

Componentes clave

En el núcleo de nuestro diseño se encuentra una plataforma giratoria, que actúa como la base para la muestra en estudio. Esta plataforma es propulsada por un motor de 5V CC, cuyo giro es controlado con precisión por el microcontrolador, que permite ajustar su velocidad de rotación y sentido de giro de manera precisa. Este controlador, que es el cerebro del sistema, alberga el software necesario para ejecutar esquemas de giros y contragiros según los requisitos experimentales, permitiendo la configuración de tiempos parciales y totales del experimento. Para supervisar la velocidad de rotación, incorporamos un sensor de obstáculos o movimiento, ya que la variación en el peso de la muestra podría influir en esta velocidad. Además, integramos un motor paso a paso de 5V CC para facilitar cambios en el sentido de rotación. Todos estos componentes trabajan en conjunto, con el código programado en el microcontrolador detallado en el Anexo.

Algunos detalles técnicos

La construcción y operación efectiva de los clinostatos mencionados anteriormente requiere atención a diversos detalles técnicos para garantizar su funcionamiento óptimo y la seguridad de los usuarios.

La selección adecuada de componentes es esencial. Los motores deben tener suficiente potencia para girar la muestra durante períodos prolongados, como horas para muestras celulares o días para la germinación de semillas. Un ejemplo práctico podría ser el uso de un motor de ventilador de PC para el movimiento circular continuo, mientras que el movimiento oscilante requiere un motor paso a paso compatible con el microcontrolador elegido.

El control de velocidad y dirección es crucial. Programar el microcontrolador para manejar la velocidad del motor es esencial, pero también lo es el control en tiempo real mediante sensores, como un sensor de obstáculos o movimiento (un

láser con resistencia fotovoltaica). Esto permite precisar las fuerzas involucradas en el experimento.

En términos de alimentación y seguridad, se pueden implementar medidas adicionales, como interruptores de apagado de emergencia, para detener rápidamente la rotación si es necesario.

Además, la personalización y mejoras son factibles dependiendo del microcontrolador utilizado. Por ejemplo, es posible controlar el funcionamiento a través de una página web o teléfono móvil utilizando el Internet de las Cosas (IoT).

Efectos sobre las muestras

En el caso del prototipo 1.0, que presenta un movimiento circular constante y horizontal en relación con la gravedad, la fuerza centrífuga está directamente vinculada a la velocidad de rotación. Esta fuerza se calcula utilizando la fórmula derivada en la sección teórica: $F_c = m \cdot v^2 / r = m \cdot \omega^2 \cdot r$, donde m representa la masa promedio de las células en el caso de un cultivo celular. Los demás parámetros, ω y r , corresponden a la velocidad programada en el microcontrolador y la distancia al eje de giro de la muestra. Es fundamental superponer este cálculo con el valor de g , que actúa exclusivamente en la dirección hacia el centro de la Tierra.

En cuanto al prototipo 2.0, los cálculos para la rotación continua son similares, pero los efectos de la gravedad sobre las muestras son más complejos. Además de la gravedad, en este caso, se debe considerar la superposición del movimiento pendular con velocidad constante, exceptuando claro en los extremos del movimiento donde cambia de dirección y su velocidad angular es nula.

Conclusiones

La creación de un clinostato microcontrolado representa un puente innovador entre la biología y la ingeniería, con la matemática y la física como cimientos del mismo, capaz de abrir nuevas oportunidades para el estudio del crecimiento de las plantas en entornos de microgravedad simulada. Este dispositivo de aplicación de en diversas disciplinas, no solo cumple con los requisitos de los biólogos al

proporcionar una herramienta accesible para sus investigaciones, sino que también destaca la versatilidad de la tecnología.

Los clinostatos ofrecen un enfoque práctico y económico para simular microgravedad, brindando a los estudiantes y científicos la oportunidad de comprender y explorar fenómenos físicos y biológicos. Además, este proyecto destaca la importancia de la colaboración entre diferentes campos, alentando a los estudiantes a aplicar conceptos de física en un contexto biológico. Estos dispositivos no solo satisfacen una necesidad específica, sino que también ilustran cómo la tecnología puede unir disciplinas y promover un enfoque integral hacia la educación y la investigación interdisciplinaria.

Bibliografía

1-W. Briegleb "Some qualitative and quantitative aspects of the fast-rotating clinostat as a research tool", ASGSB Bulletin : Publication of the American Society for Gravitational and Space Biology. 1992 Oct;5(2):23-30. PMID: 11537638.

R. R. Dedop2-h and M. H. Dipert, "The Physical Basis of Gravity Stimulus Nullification by Clinostat Rotation1", Plant Physiol. (1971) 47, 756-764.

3-J. Hauslage, V. Cevik and R. Hemmersbach, "Pyrocystis noctiluca represents an excellent bioassay for shear forces induced in ground-based microgravity simulators (clinostat and random positioning machine)", Microgravity Sci. Technol. 23, 67–71 (2011), doi:10.1038/s41526-017-0016-x

4-W. Y. Chu and K. K. Tsia, "EuniceScope: Low-Cost Imaging Platform for Studying Microgravity Cell Biology," in *IEEE Open Journal of Engineering in Medicine and Biology*, vol. 4, pp. 204-211, 2023, doi: 10.1109/OJEMB.2023.3257991.

5-T. Hoson, S. Kamisaka, Y. Masuda, M. Yamashita, and B. Buchen "Evaluation of the three-dimensional clinostat as a simulator of weightlessness" *Planta* (1997) 203: S187-S197, doi:10.1007/PL00008108

Agradecimientos

Los autores de este trabajo agradecen a la Secretaria General de Ciencia y Técnica de UNNE por el subsidio PI 21F015 Res. N° 776-21 CS.